

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：51501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540582

研究課題名(和文) 大気圧 $\mu$ プラズマとマイクロバブル技術の融合による新規液中プロセスの開発

研究課題名(英文) Development of the novel liquid processing by combining an atmospheric-pressure microplasma with microbubbles

研究代表者

吉木 宏之 (YOSHIKI, Hiroyuki)

鶴岡工業高等専門学校・その他部局等・その他

研究者番号：00300525

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：パルス高電圧を印加する注射針電極とGND間で大気圧 $\mu$ プラズマ流を生成して、プラズマガスを微細気泡化する事でインジゴカルミン水溶液の脱色、大腸菌・一般細菌の不活化、酸化グラファイトの合成を行った。当該プラズマのオゾン生成量は低く溶存オゾンは検出限界(0.25ppm)以下であり、高濃度オゾンを用いない水処理の可能性を示した。O<sub>2</sub>ガス系ではOHラジカル等による急激な酸化分解が、N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>ガス系では溶液の弱酸性化に伴う溶存NO<sub>2</sub>イオンによるニトロソ化反応による緩慢な分解が起こる事を明らかにした。また、ESR測定やテレフタル酸化学プローブ法でO<sub>2</sub>プラズマバブリングによるOHラジカル生成を検証した。

研究成果の概要(英文)：Atmospheric-pressure microplasma flow was generated between a surgical needle electrode and GND by a pulsed high voltage. Decolorization of an indigo carmine solution, sterilization of E-coli and bacteria and synthesis of graphite oxide were studied using microbubbles of the plasma gas. Since ozone production efficiency is low and the ozone concentration dissolved in water is less than 0.25 ppm, it suggests the possibility of water treatment without using dense ozone. In O<sub>2</sub> plasma bubbling, rapid oxidation occurs due to OH radicals. On the other hand, N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> plasma bubbling shows organic compounds were decomposed slowly via introducing nitroso groups with NO<sub>2</sub> ions under weak acidity. Furthermore, ESR measurement and chemical probe method using terephthalic acid showed OH radicals generated in water by the O<sub>2</sub> plasma bubbling.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：大気圧プラズマ 酸素ラジカル 微細気泡 有機物分解 殺菌処理 OHラジカル プラズマ化学

1. 研究開始当初の背景

近年、液中または気液界面にプラズマを生成することで、水処理・浄化、滅菌処理、有害物質の分解、または新規ナノ物質の作製に応用する試みが行なわれている。例えば、液中に電極を設けてパルス通電することでジュール加熱により気泡が発生し、その気泡の中でプラズマ生成する方法や、液面に大気圧プラズマを照射する方法等が提案されている。しかし、液体の加熱、放電の安定維持、大容量の電源を必要とする等の問題点がある。また、液面にプラズマ照射する方法ではプラズマ-液体の接触領域が限定される為、液体を循環させる等して化学反応に寄与するラジカルを液体全体へ拡散させる必要がある。しかも、液体と反応せず大気中へ拡散・消失するプラズマ損失も無視できず処理効率の上で問題がある。

他方、気体放電プラズマを用いない水処理方法として『マイクロバブル技術』が知られている。これは、小型容器内で水などの液体を高速回転させて渦流(毎秒 400~600 回転)を作り、この中に空気などの気体を導入しせん断・粉碎させてマイクロバブルを発生させるもので、牡蠣・ホタテ貝の養殖や水質浄化に応用されている。さらに、マイクロ・ナノバブル自体は液中を長時間浮遊し、やがて自己消滅(自然圧壊現象)する過程で表面エネルギーを開放し、ヒドロキシルラジカル( $\cdot\text{OH}$ )等を生成することが知られており、液中プラズマ技術と融合することでさらに強力な液中反応を可能にすると期待される。

2. 研究の目的

本研究課題では、気体放電で生成したイオン・電子や、反応性に富むラジカルを“マイクロバブル”化して液中に拡散させることでアフタープラズマ気相-液体接触面積を格段に増加させ、また液体中を長時間浮遊するマイクロバブルを気液反応場として利用することで化学反応効率を向上させて、水処理・浄化、汚染物の分解、滅菌処理、さらには液中でのナノ物質の合成を実現する**プラズマ-マイクロバブル融合による新規液中プロセスを開発する。**

- (1) 大気圧  $\mu$  プラズマと各種微細気泡発生器を融合した『プラズマ・バブラー』により溶液中に生成するオゾン、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{NO}_2$  等の活性種や  $\text{OH}$  等のフリーラジカルの分析・調査。
- (2) 水処理・浄化、汚染物の分解・除去への応用技術の確立と反応メカニズムの解明。
- (3) 滅菌処理技術やバイオ・医療への応用の可能性の探索。
- (4)  $\text{O}_2$  プラズマ・バブリングによるグラファイト粉末から酸化グラファイト (GO) 合成。

3. 研究の方法

(1) 大気圧  $\mu$  プラズマおよびマイクロバブル発生方法の最適化:

注射針を電極兼ガスノズルとした大気圧  $\mu$  プラズマ源と、微細気泡発生手段として高速回転気液剪断方式のマイクロバブル発生装置を

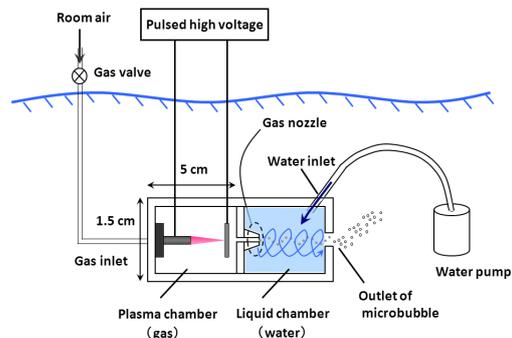


図1 プラズマ・マイクロバブル装置の概念図  
融合したプラズマ・マイクロバブル装置の概念図を図1に示す。また、微細気泡発生手段を焼結セラミックスバブラーに置換えたプラズマ・バブラー装置も試作した。これらの装置を用いて、水処理に於けるプラズマガス種(空気、 $\text{O}_2$ 、さらに  $\text{N}_2/\text{O}_2$ 、 $\text{He}/\text{O}_2$ 、 $\text{Ar}/\text{O}_2$  混合ガス)、ガス流量、バブル径依存性を調査する。

プラズマ中のラジカル分析は発光分光分析で行う。プラズマガス分析は、ガス検知管(オゾン、 $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ )や紫外吸収式オゾンモニターで行う。処理水中の溶存物質(オゾン、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 等)は多項目水質計(共立理化学研究所、デジタルパックテスト)で行う。また、プラズマ・バブリングによる  $\text{OH}$  ラジカル生成の検証は、電子スピン共鳴(ESR)測定およびテレフタル酸(TA)を用いた化学プローブ法を用いる。また、インジゴカルミン水溶液の脱色処理では、紫外可視吸光度(島津、UVmini 1240)および液体クロマトグラフ(HPLC、JASCO GULLIVER)測定により分解過程を調べる。

(2) 液中プロセスの解明と処理条件の最適化:  
染料(インジゴカルミン)の分解・大腸菌群や一般細菌の不活化等の液中プロセスの解明、GOの合成に適したプラズマ条件、液体媒質(溶液)の温度、pH値などの反応条件の最適化。

4. 研究成果

(1) 大気圧プラズマとマイクロバブルの融合:  
本研究で試作したプラズマ・マイクロバブル発生装置の写真を図2に示す。大気圧  $\mu$  プラズマ源は、外径/内径が 0.7/0.5 mm のステンレススチールパイプの正極(パイプ電極)と、5 mm 角の銅板の負極を電極間隔約 5 mm で対向させた構造となっている。パイプ電極にガスを導入して高電圧パルスを印加することで両電極間に大気圧  $\mu$  プラズマを発生させる。本実験で用いたガスは室内空気と一般酸素( $\text{O}_2$ )である。

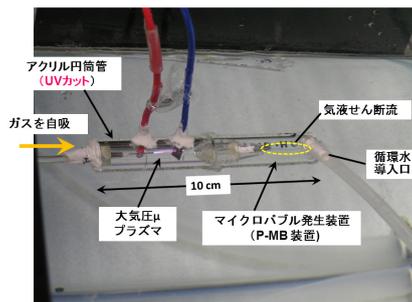


図2 プラズマ・マイクロバブル装置の試作機

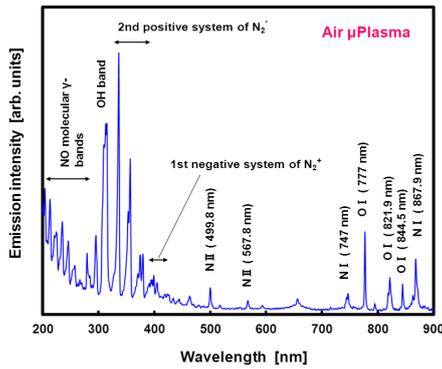


図 3(a) 空気  $\mu$  プラズマの発光スペクトル  
 マイクロバブル発生室内で高速回転する水流により負圧力となり、ガスが自吸されてパイプ電極に導入される。また、パルス電圧の波高値  $V_{pp}$  は 6 - 7 kV、パルス間隔は 1 ms、パルス持続時間は約 0.1 ms である。空気、 $O_2$  ガスをプラズマ化した後の活性ガス（プラズマガス）は、マイクロバブル発生室に自吸されて気液剪断流を生成することでマイクロバブル化される。循環水ポンプの排出容量は 13 L/分で、この時自吸されるガス流量は 0.01 L/分である。また、マイクロバブルの平均気泡径は 50  $\mu$ m である。

プラズマの発光分光分析をマルチチャンネル分光器（浜松ホトニクス、PMA-11）で行った。図 3(a)、(b) に空気、 $O_2$  プラズマの発光スペクトルを示す。空気プラズマでは原子状酸素 OI、原子状窒素 NI、窒素イオン線 NII、窒素励起分子バンド、NO バンドを確認した。他方、 $O_2$  プラズマでは多数の原子状酸素 OI 線や OH 線を確認した。また、ガスのオゾン濃度はガス検知管（北川式、182SA）で行なった。空気プラズマガスのオゾン濃度は 18 ppm 程度であった。

プラズマガスのバブリングによる有機物の分解効果を調べるために、一般的な評価指標として用いられるインジゴカルミン水溶液（濃青色）の脱色実験を行った。インジゴカルミン粉末（和光純薬工業）をイオン交換水 10 L に溶解させて濃度 10、30 mg/L の水溶液を準備した。インジゴカルミン水溶液は 610 nm に強い吸収ピークを有する。プラズマガス処理でインジゴカルミンの構造が壊れて当該ピークが消失することで脱色に至る。多項目水質計を用いて処理水の吸光度を測定して脱色過程を調べた。

図 4 にインジゴカルミン水溶液の脱色曲線を示す。空気プラズマガスでは 5 時間処理後から 610 nm の吸光度が減少を始め、インジゴカルミ

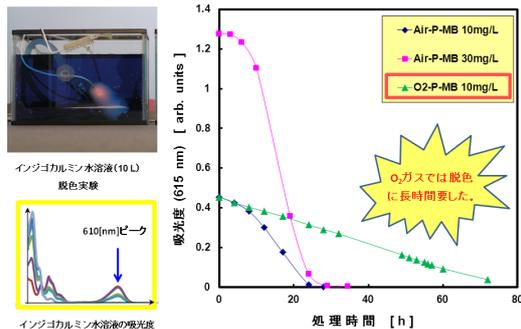


図 4 空気プラズマバブルによる染料水の脱色曲線

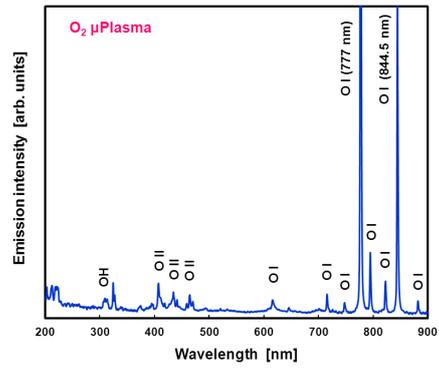


図 3(b)  $O_2$   $\mu$  プラズマの発光スペクトル  
 ンの濃度に依らず約 30 時間処理で脱色が完了した。この時、水溶液の pH は処理と共に減少し 10 時間処理後には 3.7 程度の弱酸性を示した。他方、 $O_2$  プラズマガスでは 70 時間処理後も脱色が完了しておらず、これはプラズマガス流量が少ない (0.01 L/分) 事と関連していると思われる。

(2) 染料水脱色のプラズマガス流量依存性：  
 焼結セラミックス微細気泡発生器（バブラー）を用いて試作したプラズマ・バブラーの写真を図 5 に示す。プラズマ源とセラミックスバブラー間の距離  $L$  を可変できる分離型 ( $L = 0.25\text{--}5\text{ m}$ ) と、一体型を用意してインジゴカルミン水溶液の脱色過程の  $O_2$  流量依存性を調べた。図 6 に  $L=0.25\text{ m}$  とした時の脱色完了時間の  $O_2$  流量依存性を示す。インジゴカルミン水溶液の容積 1.0 L、濃度 20 mg/L とした。分離型、一体型共に  $O_2$  流量の増加に伴い脱色時間が減少した。また、流量の減少につれて分離型と一体型の差異が顕著になる事が判った。次に、 $O_2$  プラズマで生成するオゾン濃度を紫外吸収式オゾンモニター（荏原実業株、EG-2001）で測定した。図 7 にオゾン濃度の  $O_2$  流量依存性を示す。 $O_2$  流量とともにオゾン濃度の増加が見られる。この結果、①  $O_2$  プラズマガスのバブリング処理では  $O_2$  流量が重要なパラメーターとなる事がわかった。

オゾンは比較的安定に存在する酸素活性種である。図 6 に於ける分離型と一体型の顕著な差異は単にオゾン濃度の減少だけに起因するとは言えない。そこで、分離型のプラズマ源 - バブラー間距離  $L$  を変化させて脱色時間を調べた結果を図 8 に示す。 $L$  が 1.5 m 以上では脱色時間はほぼ一定値となるのに対し、 $L < 1.5\text{ m}$  では  $L$  の減少で脱色時間が短くなった。この結

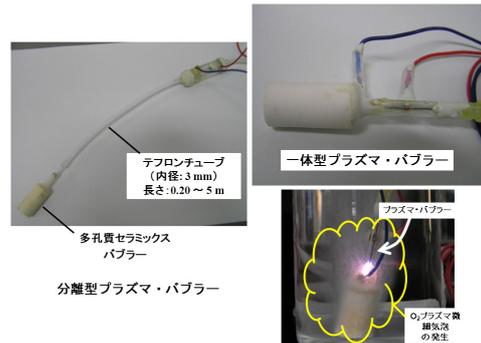


図 5 プラズマ・微細気泡バブラーの試作機

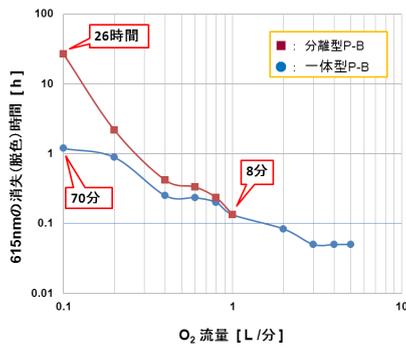
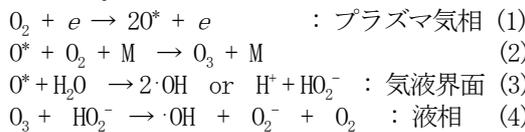


図6 プラズマ・バブラーによるインジゴカルミン溶液の脱色時間のO<sub>2</sub>流量依存性

果から、インジゴカルミンの分解にはオゾンのみならず、寿命の短い原子状酸素ラジカル O\* やヒドロキシラジカル OH 等の酸素活性種 (ROS) が寄与していることが示唆された。

そこで、テレフタル酸 (TA) を化学プローブとした OH ラジカル生成の検証を行った。TA:2mM、NaOH:5mM の水溶液を HCl で pH を 6.5-8.0 以内に調整した水溶液に O<sub>2</sub> プラズマガスのバブリングを行った。TA は OH ラジカル の存在下で水酸化テレフタル酸 (HTA) を生成し、310 nm の UV 照射で 425 nm 付近の青色蛍光を発する。図 9 に O<sub>2</sub> プラズマガス・バブリングによる TA 水溶液の経時変化を示す。HTA が合成されている事から、O<sub>2</sub> プラズマガスにより溶液中に OH ラジカルが生成した事が明らかとなった。

OH ラジカル生成として、以下の反応過程が考えられる。



次に、液体クロマトグラフ (HPLC) で脱色後のインジゴカルミン水溶液を分析した。脱色前後の溶液の吸光度スペクトルと HPLC シグナルを図 10 に示す。以上から、少なくとも 3~4 のインジゴカルミン分解生成物を確認した。

(3) N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマガスによる染料水の脱色過程:

N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> 混合ガス流量を 1.0 L/分、N<sub>2</sub>:O<sub>2</sub> 比率をパラメーターとして N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> プラズマガスをバブリングした時のインジゴカルミン水溶液の 610 nm の吸光度の変化を図 11 に示す。N<sub>2</sub>:O<sub>2</sub> = 3:7 と 4:6 を境にして脱色時間が急激に増加した。これはプラズマ中で

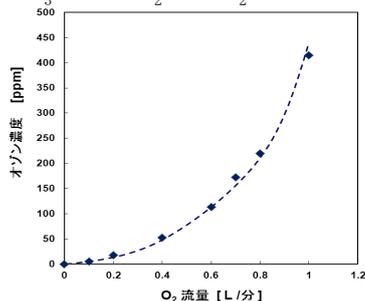
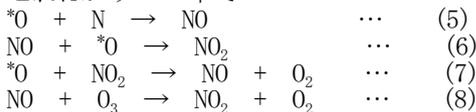


図7 0.2μ プラズマのオゾン濃度のO<sub>2</sub>流量依存性

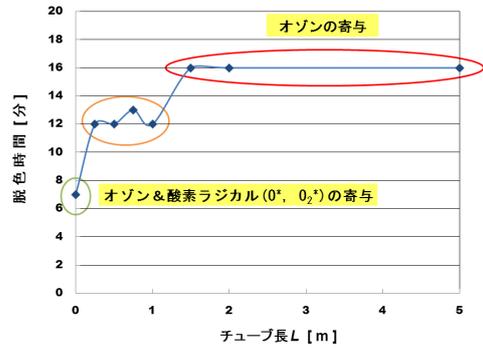


図8 脱色時間のプラズマ源とバブラー間距離依存性等の反応により\*O およびオゾン濃度の減少が起こる為と考えられる。ガス検知管による測定では活性酸素種 (オゾン、\*O 等) の濃度は急激に減少するのに対し、窒素酸化物 (NO<sub>2</sub>、NO) 濃度は増加する。

N<sub>2</sub>:O<sub>2</sub> = 8:2 (模擬空気) での脱色時間は約 9.5 時間と O<sub>2</sub> プラズマガスの場合の 700 倍以上の時間を要した。ここで、N<sub>2</sub>:O<sub>2</sub> = 3:7 を境にした脱色曲線 (図 11) の特性の変化は単に\*O の枯渇による酸化分解能の低下に起因するのみならず、インジゴカルミンの分解に寄与する活性種の違いに因ることが O<sub>2</sub> および空気プラズマガス・バブリング処理水を用いたインジゴカルミン脱色実験で明らかになる。

(4) プラズマガス処理水の活性度評価:

イオン交換水 1.0 L に O<sub>2</sub> および空気プラズマガスのバブリング処理を行う。ガス流量は 1.0 L/分として、処理水の pH が定常状態になるまで長時間バブリング処理を行った。両処理水の pH、溶存オゾン、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub> 濃度を表 1 に示す。pH は 4.0 前後で弱酸性を示した。また、溶存オゾン、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 濃度は共に低いが、空気プラズマ処理水中の溶存 NO<sub>2</sub> は高濃度である。

この処理水 1.0 L にインジゴカルミン粉末 30mg を添加した水溶液の 610 nm の吸光度の時間変化を調べた。空気プラズマバブル処理水では 2.5 日で脱色が完了したのに対し、O<sub>2</sub> プラズマバブル処理水では 20 日後でも吸光度は 60% 程度減少したに留まっている。O<sub>2</sub> プラズマバブル処理水に於ける緩慢な脱色は溶存オゾンや H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> によるものと考えられる。他方、空気プラズマバブル処理水中には NO<sub>2</sub> 等の窒素酸化物やオゾン、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> を含んでおり、これら酸化物が弱酸性 (pH~3.7) 下で化学反応することでペルオキシ亜硝酸イオン ONOO<sup>-</sup> や、NO<sup>•</sup>、NO<sub>2</sub><sup>•</sup> 等のラジカルを生成すると考えられる。

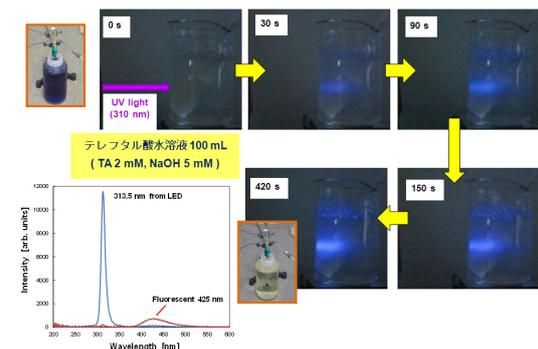


図9 TA を化学プローブ法とした OH ラジカル の検証

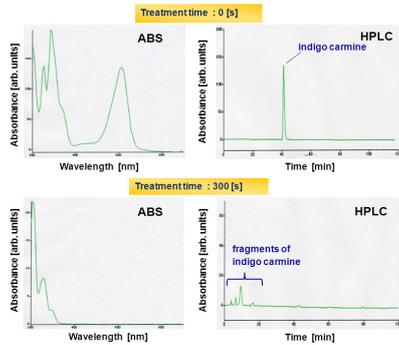


図10 インジゴカルミン処理液のHPLC分析  
 $\text{NO}^{\cdot}$  はインジゴカルミンの2級アミン部位 ( $\text{C}_2\text{N-H}$ ) と反応してニトロソ化合物 ( $\text{C}_2\text{N-N=O}$ ) を生成する。これによりインジゴカルミンが開裂して分解が進行すると考えられる。

(5) プラズマガス・バブリングによる環境汚水の大腸菌群の殺菌処理:

学校周辺の家畜の堆肥を含む環境汚水を採取し、 $\text{O}_2$  および空気プラズマガス・バブリングによる大腸菌群の不活化処理を試みた。大腸菌群の不活化評価は大腸菌群・大腸菌用検査用チューブ (コロナ技研工業、STチューブ) で行った。STチューブ付属の綿棒で被検体 (処理後の汚水) を微量サンプリングして、乳糖とpH試薬を含む液体培地 (青色) で35-37°Cで24時間培養する。微量サンプル中に大腸菌群が存在すると、乳糖を分解して培養液を酸性に傾け、pH試薬の色が黄色に変色する。この様に、液体培地の色の変化から大腸菌群の陽性・陰性が判定できる。

採集した堆肥を含む環境汚水0.05 mL および0.15 mL を純水100 mL に滴下して汚濁濃度が約3倍異なる2つのサンプルを用意した。最初に $\text{O}_2$  プラズマガス・バブリング処理の結果を示す。 $\text{O}_2$  ガス流量を0.8 L/分、高電圧パルスの条件はインジゴカルミン水溶液の脱色実験と同じである。実験開始から15分毎に処理水のサンプリングを行い24時間培養後のSTチューブの色の変化から大腸菌群の生存の判定を行う。この結果から、処理水中の大腸菌群の陽性・陰性結果の処理時間依存性を表2に示す。サンプリング回数は3回で、全て同じ結果を示した。高濃度の汚水では180分後に、低濃度の汚水では75分後に陰性反応を示し大腸菌群は不活化された。菌数の計数を行っていないが、汚濁濃度が約3倍異なるので菌数も約3倍程度の差があると考えられる。不活化に要する時間に約2.4倍の差が生じており、この様な粗い実験でも不活化処理時間が菌数に比例して伸びる結果が得られた。

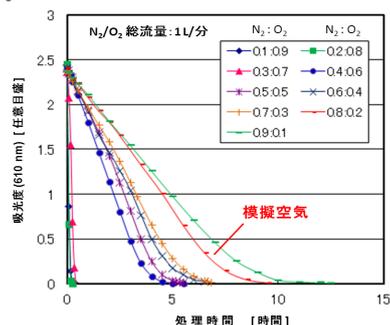


図11  $\text{N}_2/\text{O}_2$  プラズマガスによる染料水の脱色曲線

表1 プラズマガス処理水のpH、溶存物質、OH生成

Plasma gas	pH	$\text{O}_3$ [mg/L]	$\text{H}_2\text{O}_2$ [mg/L]	$\text{NO}_2$ [mg/L]	OHラジカルの発生*
$\text{O}_2$	5.5 - 7.0	< 0.25	< 0.10	< 0.02	○
Air	3.6 - 4.0	0.20	0.10	20 - 25	×

\* 化学フロー法

次に、空気プラズマガス・バブリング処理の結果を示す。処理条件は空気ガス流量 (0.8 L/分) を含めて、 $\text{O}_2$  プラズマ処理と全て同じとした。表3に陽性・陰性判定結果の処理時間依存性を示す。汚水の濃度によらず6h以上9h未満の処理時間で不活化が完了した。このことから、 $\text{O}_2$  プラズマ処理との顕著な差異が確認された。

この理由を考察する。 $\text{O}_2$  プラズマガス・バブリングでは高濃度の $\text{O}^{\cdot}$ 、OHラジカル (酸化力が極めて高い) およびオゾンがバブル界面に存在する菌を酸化分解する。他方、空気プラズマの場合は処理水中に $\text{NO}_2$ 、 $\text{NO}_3$ 等の窒素酸化物が多量に生成される結果 (表2参照)、これらの窒素酸化物による化学反応で菌の細胞膜が酸化分解されて不活化が起こると考えられる。

次に、NBRCより分譲を受けた標準大腸菌株 (*Escherichia coli* 3301株) を用いた殺菌処理実験を行った。 $10^7$  CFU/ml程度に前培養した菌液10mlを試験直前に滅菌水50mlに添加し、回転子および攪拌装置にて攪拌 (400rpm) しながら30分間 $\text{O}_2$  プラズマガス・バブルにて処理した。プラズマガス・バブル処理していない試験区を対照とし、デソキシコレート寒天培地にて大腸菌数を測定した。結果を図12に示す。酸素ガスを通気したプラズマガス・バブルにて処理した大腸菌液は、菌体による濁りがなく、対照における大腸菌の生菌数が $1.1 \times 10^6$  CFU/mlであったのに対して、プラズマガス・バブル処理した菌液からは大腸菌は検出されなかった。これは酸素ラジカルやオゾンによる殺菌効果と言える。

表2  $\text{O}_2$  プラズマガス処理での大腸菌群の不活化判定

処理時間 [分]	細菌反応 (±)	
	低濃度汚水	高濃度汚水
0	+	+
15	+	+
30	+	+
45	+	+
60	+	+
75	-	+
90	-	+
105	-	+
120	-	+
150	-	+
180	-	-
210	-	-

表3 空気プラズマガス処理での大腸菌群の不活化判定

処理時間 [時間]	細菌反応 (±)	
	低濃度汚水	高濃度汚水
0	+	+
3	+	+
6	+	+
9	-	-
12	-	-
15	-	-
18	-	-
21	-	-
24	-	-



図12 O<sub>2</sub>プラズマガスによる大腸菌株の不活化処理

(6) グラファイト粉末からGOの合成:

最大平均粒子径が約30 μmのグラファイト粉末 (SEC カーボン(株) SNO-30) 1.0 gをイオン交換水 100 mLに添加し、O<sub>2</sub>プラズマガス・バブリング処理を行った。O<sub>2</sub>流量 2.0 L/分、処理時間を 10 hとした。処理後の液体をスライドグラスに塗布し、水分を蒸発後にX線回折(XRD)を行った。XRD分析結果を図13に示す。グラファイトは層間隔0.334 nmに対応する2θ≒27°に強いピークが現れるが、処理後のサンプルでは2θ≒14.6°付近に弱いピークが現れた。これは、グラファイトの層間にOH、COOH等の酸素官能基が導入されて層間が広がった為と考えられ、GOが合成されたことを示唆している。

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 2 件)

- ① 吉木宏之、特集：排水処理・汚泥除去技術 “大気圧プラズマとマイクロバブルの融合による水処理技術の試み”、食品工業、査読無、第56巻第14号(2013) pp. 59-65.
- ② 吉木宏之、乙坂佳輝、大気圧高周波プラズマによるガラス細管内壁の二酸化チタンコーティング、査読有、J. Vac. Soc. Jpn. (真空), 57(4) (2014) pp. 163-166.

[学会発表] (計 11 件)

- ① H. Yoshiki, K. Sato, Syafiq and T. Sugawara, Water Treatment by Bubbling of Atmospheric-Pressure Plasma Radical Flow, 8<sup>th</sup> International Conference on Reactive Plasmas/31<sup>st</sup> Symposium on Plasma Processing (ICRP-8/SPP-31, Fukuoka, Japan, February 4-7, 2014), Abstracts 5P-PM-S09-P17.
- ② H. Yoshiki, Modification of inner walls of a commercial microfluidic chip by pulsed micro plasma treatment, 21<sup>th</sup> International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC 21, Cairns, Australia, August 4-9, 2013), <http://www.ispc-conference.org/Proceedings ID 527>.
- ③ H. Yoshiki, K. Okuda and K. Sato, Plasma-Microbubble Generator for Water Purification, 4<sup>th</sup> International Conference on Plasma Medicine (icpm4 2012, Orleans, France, June 18, 2012), Abstracts P129.
- ④ H. Yoshiki and S. Ishikawa, Decolorization of Indigo Carmine Solution Using Plasma-Microbubbles, The 5<sup>th</sup> International Conference on Plasma-Nanotechnology & Science (IC-PLANTS 2012, Aichi, Japan, Mar. 9-10, 2012) P14.
- ⑤ 吉木宏之、板垣 伸、五十嵐 侑、プラズマラジカル流のバブリングによる水処理の研究 [2]、第61回応用物理学会春季学術講演会 (青山学院大学, 2014) 17p-F3-14、予稿集 DVD 08-017.

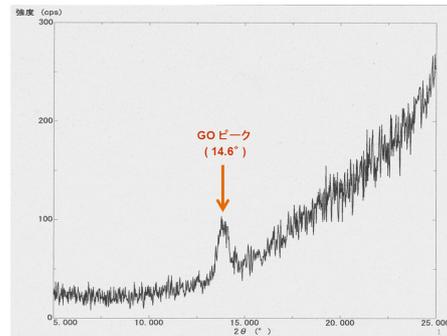


図13 O<sub>2</sub>プラズマ処理後のグラファイト粉末のX線回折

- ⑥ 吉木宏之、プラズマラジカル流のバブリングによる大腸菌群の殺菌処理、第74回応用物理学会秋季学術講演会 (同志社大学, 2013) 19p-C1-17、予稿集 DVD 08-071.
- ⑦ 吉木宏之、佐藤航平、プラズマラジカル流のバブリングによる水処理の研究、第60回応用物理学会春季学術講演会 (神奈川工科大学, 2013) 29a-B9-3、予稿集 DVD 08-039.
- ⑧ 佐藤航平、シャフィック、吉木宏之、プラズマガスのバブリングによる水処理の研究、第18回高専シンポジウムin仙台 (仙台高専, 2013) PC-18、予稿集 p. 414.
- ⑨ 吉木宏之、奥田航紀、佐藤一誠、石川修一、矢作友弘、瀬川透、プラズマ・マイクロバブルを用いたインジゴカルミン水溶液の脱色、第59回応用物理学関係連合講演会 (早稲田大学, 2012) 16p-A7-21、予稿集 DVD 08-069.
- ⑩ 吉木宏之、パルスマイクロ放電を用いたプラスチック製マイクロ流路チップ内壁処理、第52回真空に関する連合講演会 (学習院大学, 2011) 予稿集 18Bp-6.
- ⑪ H. Yoshiki, S. Ishikawa, Water purification technology by combining an atmospheric-pressure  $\mu$ plasma with microbubbles, 第24回プラズマ材料科学シンポジウム (SPSM-24) (大阪大学, 2011) アブストラクト p. 79.

[図書] (計 1 件)

- ① 吉木宏之 他、(株)エヌ・ティー・エス出版、排水・汚水処理技術集成 Vol. 2、2013、分筆部 “プラズマラジカル流のバブリングを用いた水処理技術”、pp. 241-248.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 1 件)

名称：液体処理装置  
発明者：吉木宏之、石川修一  
権利者：独立行政法人 国立高等専門学校機構、石川修一  
種類：特許  
番号：特許第 5099612 号  
取得年月日：2012年10月5日  
国内外の別：国内  
[その他]  
ホームページ等 無し

6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
吉木 宏之 (YOSHIKI, Hiroyuki)  
鶴岡工業高等専門学校・教授  
研究者番号：00300525
- (2) 研究分担者 無し
- (3) 連携研究者 無し