



小特集 水中プラズマが拓く新しい無機・有機・バイオプロセス

2. 水中プラズマの形成とその特性

安岡 康一, 前原 常弘¹⁾, 勝木 淳²⁾, 浪平 隆男²⁾, 金子 俊郎³⁾, 畠山 力三³⁾

東京工業大学, ¹⁾愛媛大学, ²⁾熊本大学, ³⁾東北大学

(原稿受付: 2008年 8 月30日)

水中プラズマの形成方法は、大きく「水中気泡内ガスのプラズマ化」および「水そのもののプラズマ化」の二つに大別される。また、近年では、正負イオンを包括する電解質水溶液やイオン液体などの液体自身をプラズマととらえた研究も進められている。本章では、「水中気泡内ガスのプラズマ化」の例として、外部より水中へ直接供給された気泡内における「水中単一気泡内パルスプラズマ」および「気液二相流内パルスプラズマ」、並びに外部エネルギーにより水中へ直接形成された気泡内における「水中 RF プラズマ」を、「水そのもののプラズマ化」の例として、「水中パルスプラズマ」、液体自身をプラズマととらえる「電解質プラズマ」など種々の水中プラズマ形成方法とその特性について紹介する。

Keywords:

discharge plasma generated inside bubble, underwater rf plasma, underwater pulsed discharge plasma, electrolyte plasma

2.1 水中単一気泡内および気液二相流内パルスプラズマ

プラズマによる水処理方法は、(1)気相中で生成したラジカルを利用する方法、(2)処理水とプラズマを直接接触させてラジカル生成と水処理を同時に行う方法とに大別できる。活性酸素中で最大の酸化電位をもつ OH ラジカルは、大気中での寿命が約 1 ms 以下と短いため、生成と利用を短時間に行う必要がある。このため処理水近くでラジカルを生成させる(2)の方法は、効率の良い水処理を実現できる可能性が高い。ラジカル生成方法は、水中でのパルスストリーマ放電や、水中の気泡にパルス電界を加えて気泡内にプラズマを発生させる方法[1]など多数の研究例がある。文献[2]ではプラズマ電流値で多くの例を分類している。筆者らは気泡内に繰り返しパルスプラズマを発生させて利用する以下の研究を進めている。

(a) 単一気泡内パルスプラズマ

この方法は、セラミックス板に開けた直径 200 μm 以下の小孔を通してガスを水中に供給し、小孔下部に置いた金属電極に高速高電圧パルスを加えて気泡内にプラズマを

生させる。図 1 に電極構造を示す[3, 4]。一定流量の気体を流すと、小孔上部に気泡が現れその後成長して離れる過程を繰り返す。気泡の長さは約 7 mm あり小さいチャンバーとして機能する。

図 2 は高速ビデオカメラで撮影した酸素気泡の写真で、露光時間は 0.3 ms である。このように時々刻々と変化する気泡とともに放電形状も変化する。図 2 の 1.7 ms から 6.7 ms までを気泡生成消滅周期と考えると、1つの気泡の寿命は 5 ms 程度である。1 kHz の高電圧パルスでは、1気泡内に 5 回プラズマが形成される。駆動回路は 4.2 nF のコンデンサと高速半導体スイッチからなり、立ち上がり 10 ns、パルス幅 150 ns 程度のパルス電圧を発生する。なお、気泡内プラズマの並列駆動は容易である[4]。

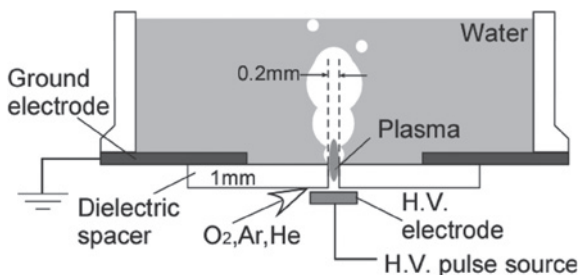


図 1 単一気泡内プラズマの電極構造。

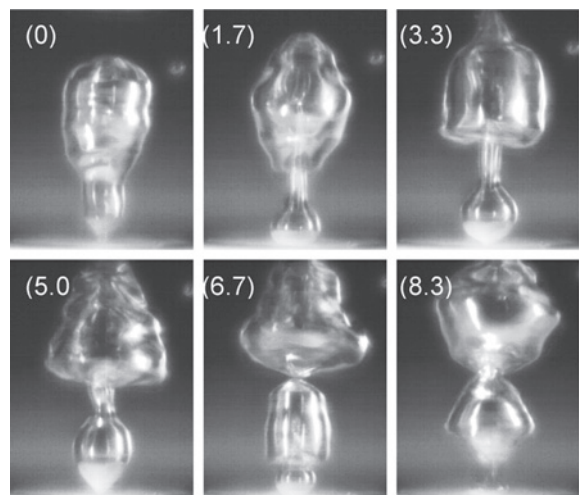


図 2 酸素気泡の進展 (時刻 ms)。

図3は1つの電源で20並列駆動した時の印加電圧と放電電流波形を示す。充電電圧は8 kVである。パルス電圧によって処理水が充電されて電圧が残るため、電極間に並列に放電抵抗を接続して500 ns程度で減少させている。電流ピーク値は20 A程度である。図1からわかるように、駆動回路から見た負荷特性は容量性であるが、それと並列にプラズマや処理水の抵抗が加わる。パルス幅が長くなるとこれら抵抗成分を流れる電流が増すため、使用するガスや処理水導電率によって、放電電流波形や電流経路が時間的に変化していく。

図4は酸素気泡内に発生したプラズマのICCD写真（露光時間5 ns）である。図3の波形と合わせて見ると、電圧印加直後で大きな変位電流が流れている時は、小孔上部に左右対称な弱い発光のプラズマが発生する。その後15 ns

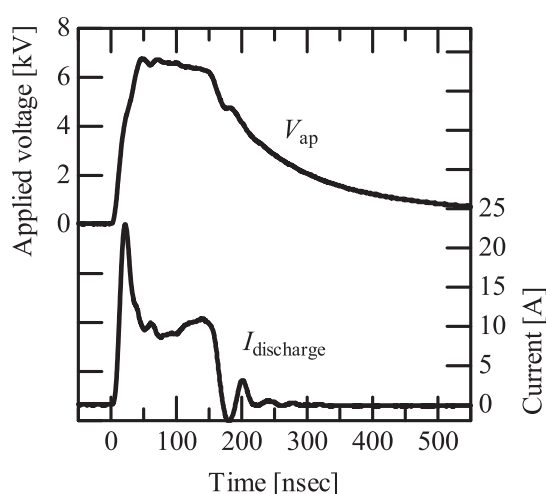


図3 印加電圧および放電電流波形。

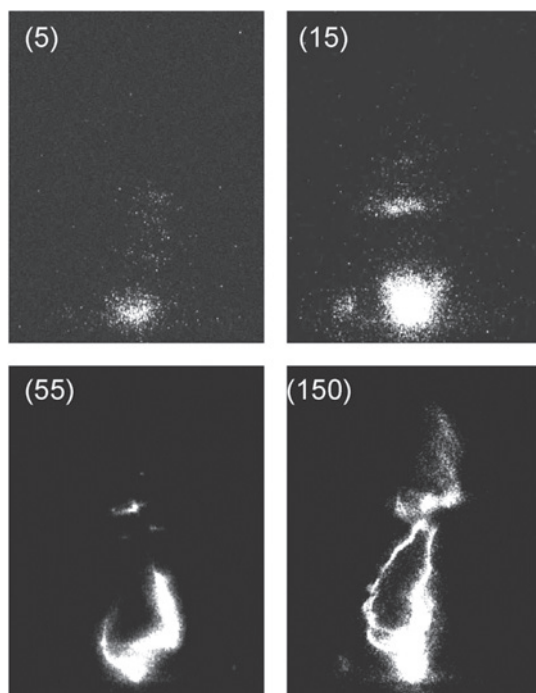


図4 酸素気泡内放電の進展（時刻 ns）。

になると発光部分が拡大するが、そのすぐ上の発光は上の気泡下部での反射光である。このようにプラズマは気泡の形状に沿って広がっていく。さらに時間が経過するとプラズマは収縮しはじめ、やはり気泡内面に沿って大きく移動する。このように気泡内プラズマは常に気泡内面に沿って、処理水と接触しながら生成と消滅を繰り返していると考えられる。

(b) 気液二相流内パルスプラズマ

プラズマと気泡の接触面積を拡大する方法として、気体と液体が混合した状態の気液二相流を使うこともできる。図5にリアクタ断面図を示す。二重のガラス円筒に挟まれた1 mm程度の空間に処理液を満たし、下からバブラーで気泡を送り込むと小さい気泡は結合して大きくなる。気泡率は70%程度で、Churn流と呼ばれる流れである。

両ガラス円筒の処理水外側面にはメッシュ電極があり、この間に高速パルス電圧を加えて、二相流の気泡内にバリア放電を発生させる。メッシュ電極間には処理水もあるため一部の電流は処理水を通過する。電流パルス幅は使用するガス種によって自然に変化し、酸素では100 ns程度、Arなどの希ガスでは200 ns程度である。両側にガラス誘電体で、放電空間に水蒸気が含まれることからプラズマを発生するには高い電界が必要である。酸素放電では30 kV程度を必要とする。

露光時間5 nsのICCDカメラによる写真を図6に示す。処理水は酢酸水溶液で、酢酸濃度を増すと粘性が増し気泡は小さくなる。ただしどちらの場合も気泡内に放電が形成されていることがわかる。また放電開始直後は気泡全体から発光が見られるのに対して、時間が経過すると放電発光は気泡と処理水の境界に集中してくることがわかる。以上2種の方法により処理水中の気泡に繰り返しパルス放

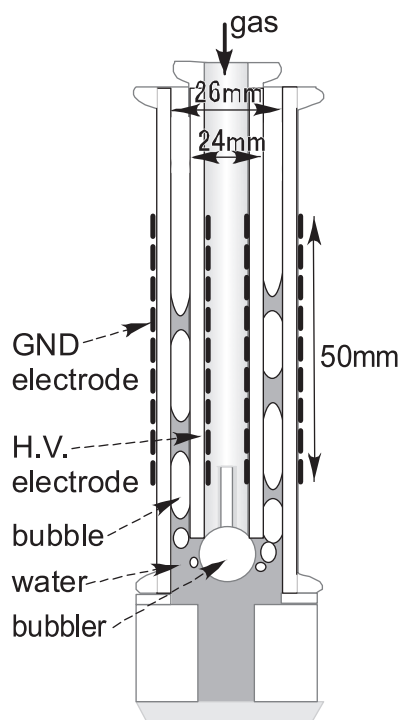


図5 気液二相流リアクタ。

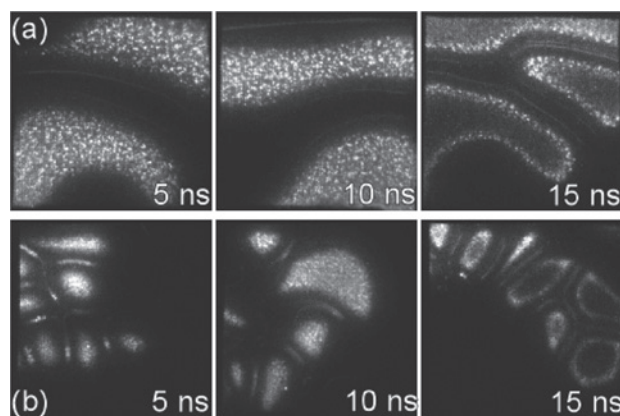


図6 酢酸濃度 10 ppm(a), 200 ppm(b)の放電写真。

電を安定して発生することができる。

安岡康一（東京工業大学）

2.2 水中 RF プラズマ

水中 RF プラズマは水中に挿入された電極に RF を印加して、発生させている(図7)。水中に置かれた上下一対の電極に整合器・共振器を通じて RF (13.56 MHz) が供給される[5]。上部電極は接地されており、下部電極の周囲はアルミナのパイプで覆われている。周囲を覆わない場合には側面からの高周波電流が漏れ、先端部の電圧が十分に上昇しないため、プラズマの発生が困難となる。高周波の印加によって、下部電極直上の水が温められ、気泡が発生する。さらに電力を上げると、気泡内にプラズマが発生する。下部電極の径が $\phi 2.8$ mm の場合、500 W 前後の入力によって、プラズマを発生させることができ、発生後は 100 W 程度の入力によって維持することが可能である。電極の径が小さくなる、もしくは、減圧する場合などにはプラズマの発生および維持に要する電力は小さくなる。また、水温が高い方がプラズマの発生および維持は容易であるようである。そのため、水温を 60–80℃ に維持して実験を行っている。プラズマの発光スペクトルからは OH ラジカル (A-X, 309 nm)、水素 (H_{α} 656 nm, H_{β} 486 nm)、酸素 (OI, 777 nm) などが観測され、水分子が解離していることがわかる。その他に電極材料の発光が見られる場合もあり、また、純水でなく水溶液を用いた場合には溶質からの発光も見られる。電極材料としては銅やタングステンを使用している。ここでは入射電力を 160 W、電極を銅に、水は純水に固定した結果を示す。

プラズマの研究を行う場合に、基礎パラメータとして、温度・密度の評価は重要である。本プラズマではプローブの挿入が困難であるため、分光計測による評価を試みた。分光計測における温度評価では分子スペクトルが温度(回転温度・振動温度)に依存する現象がしばしば利用される。本プラズマでは OH ラジカルのスペクトルから温度を評価した。スペクトルのシミュレーションプログラムとしては LIFBASE を用いた[6]。一方、電子密度に関しては線スペクトルのシュタルク広がりを利用することができる。特に、水素のスペクトルの広がりから電子密度を評価する方

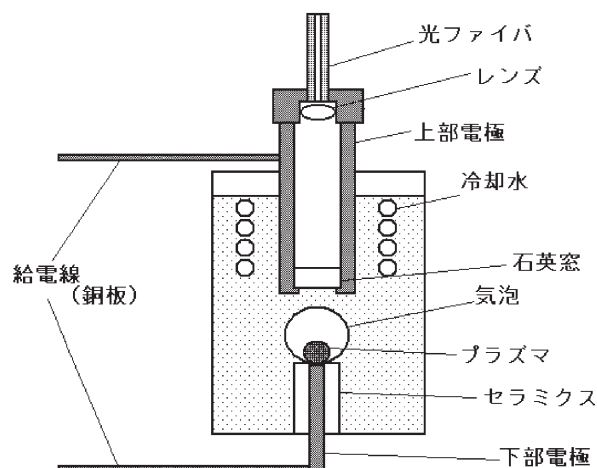


図7 装置の概念図。

法はもっとも一般的であり、密度と広がりに関連づける Table が用意されている[7]。今回は H_{β} 線の広がりを計測することで、電子密度の評価を行った。なお、この OH スペクトル・ H_{β} スペクトルの計測は京都大学の岩前敦助手(現・原子力機構)の協力の下に行われた。

発光スペクトルは上部電極に取りつけられた計測窓から集光レンズ・光ファイバを通じて分光器へと送られる。OH スペクトルの計測では 1 m 級ツェルニーターナー型分光器に ICCD 検出器 (IMAX-512, Princeton Instruments) を取りつけたものが用いられた。図 8 (a) にその一例を示す。分光器の計測範囲が 2.5 nm であるので、このスペクトルを得るために計測範囲を変えて (305.4–307.9 nm, 307.4–309.9 nm, 309.4–311.9 nm)、3 回の計測を行った(1 回の計測は 25 秒間である)。プラズマが安定して維持されていることから、それぞれのスペクトルは矛盾なく接続することができた。一方、様々な温度でスペクトルを計算し、実験から得たスペクトルと比較した。この際、回転温度と振動温度は等しいと仮定している。その結果、図 8 (a) ともっとも良い一致を 3600 K で得た。そのスペクトルを図 8 (b) に示す。入射電力を 110–260 W で変化させたが、3500 K 前後であり、大きな変化は見られなかった。

図 9 に H_{β} 線の計測結果を示す。OH スペクトルの計測と同様に上部電極から計測を行った。1 m 級ツェルニーターナー型分光器に CCD 検出器 (BS-42N, BITRAN) を取りつけたものが用いられた。計測時間は 10 分であり、プラズマは安定して維持された。図中の黒点が計測結果である。装置の分解能(装置関数)は He-Ne レーザーを用いて評価され、0.017 nm (FWHM) であった(図中の破線)。図から明らかに、 H_{β} 線の広がりには比べ、十分小さい。他に、共鳴広がり 0.005 nm、ファンデルワールス広がり 0.016 nm、ドップラー広がり 0.02 nm と見積もられた。これらの広がりを見積もりについては文献[8]を参照した。また、ファンデルワールス広がりを見積もりでは 3600 K でのモル分率を用いている(4.2 参照)。Table [7] から得たシュタルク広がりこれらの広がりをたたみ込み、フィッティングした結果が図 9 の実線である。この線は $3.1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ に対応している。

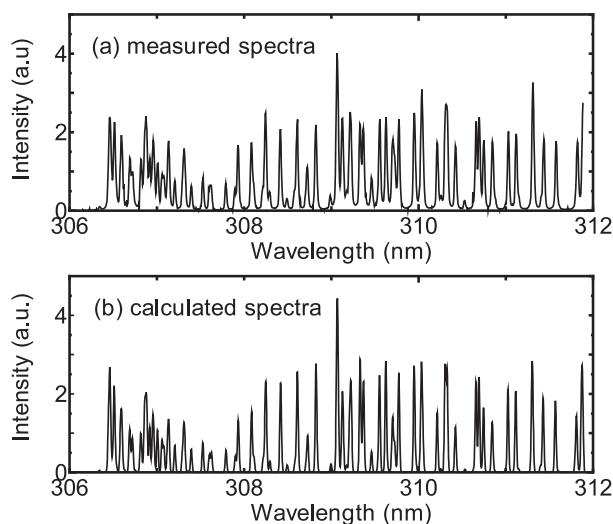


図8 OH スペクトル (306–312 nm) (a)計測スペクトルと(b)計算スペクトル (3600 K)。

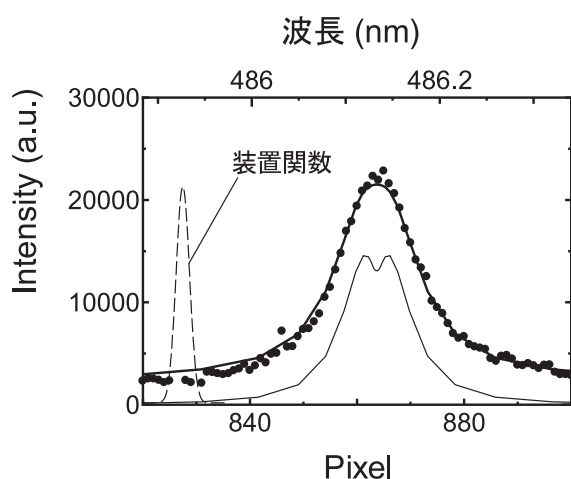


図9 H_{β} スペクトル ●実測値, — (太) フィッティング結果, — (細) シュタルク効果のみの広がり。

本プラズマは電極上部に発生した気泡内に発生するため、プラズマの物性以外に気泡の振る舞いも重要である。筆者らはまず、高速カメラ (Photoron, Fastcam-512PCI) を用いて、気泡の挙動を観測した。その例を図10に示す。気泡は球形ではなく、キノコ状をしている (0 ms)。石突きの部分にプラズマが存在している。キノコの傘の部分が浮力によって、石突き部から離れ (4–8 ms)、上昇する。離れた傘の部分は熱の供給が絶たれるために、急激に収縮する (12–20 ms)。この急激な収縮は気泡の大部分が水蒸気から成っているため、エネルギー供給が絶えると液体の水に戻ると考えられる。収縮後に残った小さな気泡は水の分解によって発生した水素や酸素である。傘の部分が消滅した後、石突きの部分が成長する (16–28 ms)。さらに成長し (32–36 ms)、再び、キノコ型となる (40–44 ms)。このような挙動を約 50 ms 周期で繰り返す。通常、高速カメラ撮影では、照明が強く、プラズマの発光は弱いため、気泡とプラズマの同時撮影は困難である。プラズマが食塩水でオレンジ色に強く光ることを利用すれば気泡とプラズマを同

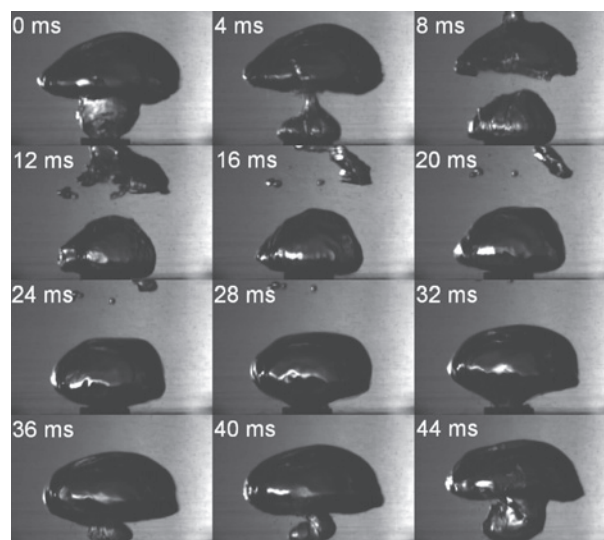


図10 高速カメラで捉えた気泡の挙動。

時に観測することが可能となる。このような計測から気泡の周期的な消滅・生成にかかわらず、プラズマは消滅することなく、維持されていることがわかった。ただし、気泡の形状によってプラズマの発光の反射に違いがあり、一定形状に維持されているか否かは明らかではない。

前原常弘 (愛媛大学)

2.3 水中パルスプラズマ

水中ストリーマ放電プラズマは、ヒドロキシラジカルなどの化学活性粒子 [9, 10]、紫外線、ストリーマの進展に伴う衝撃波 [11, 12] およびストリーマ先端における強電界を伴うことから、これらの作用を水中の有機物の分解や微生物駆除に利用する試みが行われている [10, 13–16]。水中で放電プラズマを生成するためにはパルス高電圧が必要である。水の絶縁破壊電界は 1 MV/cm を超えるため、一様電界系電極を用いたプラズマ生成は容易ではないが、針電極や線電極などの非一様電界系電極を用いれば 20 kV 程度の電圧で生成可能である。本節では水中パルスストリーマ放電プラズマの特徴や物性について述べる。

2.3.1 外観と構造

図11は線対円筒電極に正極性パルス高電圧を印加して得られるストリーマ放電プラズマである [16]。線電極の場

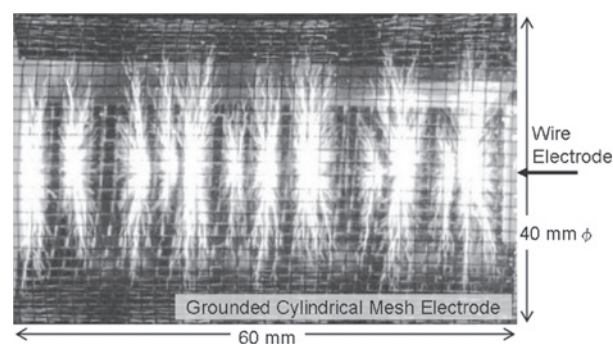


図11 同軸円筒電極中における水中パルスストリーマ放電の様子 (導電率=10 mS/m) [16]。

合、線に沿った複数の点から円盤状の放電が発生する。それぞれの放電は直径 100 μm 程度以上の多くのフィラメント状プラズマから成る。このプラズマは、外観が気中放電のストリーマに類似することから、ストリーマと呼ばれることが多い。ストリーマの空間密度は電極から遠いほど小さくなる。電極に沿った放電の数、直径やストリーマの空間密度は、印加電圧波形、電極形状や水の導電率に依存する。針電極の場合針先端を中心とする球状プラズマになる。一方、負極性電圧を印加した場合は図11のように空間的に広がる複数放電の形成は難しい[17]。

2.3.2 プラズマ生成特性

図12は図11の放電時の電極間電圧と電流の波形である。波形は電源インピーダンス、電極構成や水の導電率に依存する。電圧印加後、線電極表面電界が放電発生しきい値(約 3 MV/cm) [17]を超えると発光と同時に電流が流れ始める。この後時間とともに電流は増加し、電圧は逆に減少する。これは、放電体積の増加に伴い放電表面積が増加することと、放電と円筒電極との距離が小さくなり電極間の抵抗が減少するためである。このことは、投入された電力がプラズマのみではなく液体にも吸収されることを意味する。図13は、線対平板電極で生成した放電プラズマの時間分解連続写真から得た放電長さの経時変化である。放電は線電極状の複数の点で始まり、竹ぼうきのような形で広が

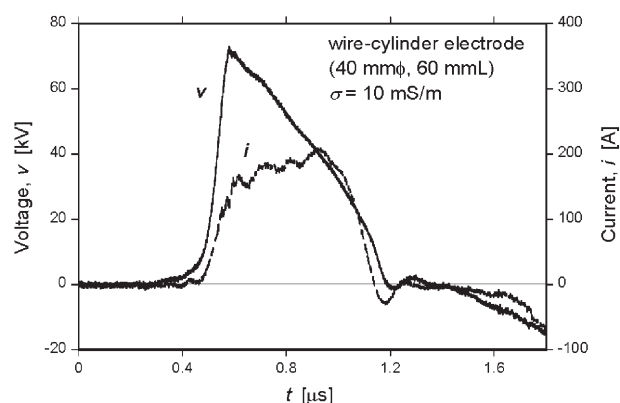


図12 印加電圧電流波形[16].

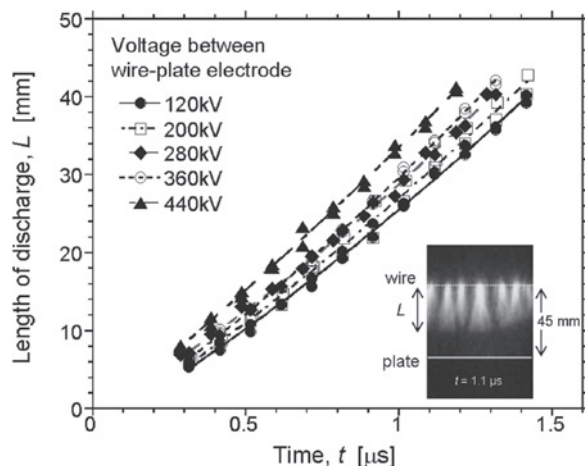


図13 線対平板電極における水中ストリーマの進展距離の印加電圧依存性 (導電率=10 mS/m) [18].

りかつ隣り合う放電の空間電荷の影響を受けながら平板電極に向かって約 30 mm/ μs で進展する。放電進展速度は電圧にあまり依存しない[17, 18]。

ストリーマ先端は 1 MV/cm を超える超高電界を伴う高エネルギー密度プラズマ状態であると考えられ、これが液体界面を気化しながら液中へと進展する[19]。気化機構として、ガス相で加速されたイオンの水分子への衝突、および液相における電子電流によるジュール加熱が考えられる。ただ、負極性電圧印加の場合にストリーマが進展しにくいという事実から、気化機構として前者が支配的であることが示唆される。

2.3.3 プラズマ物性

水中に置いた針対平板電極で生成したストリーマ放電プラズマの電子温度と電子密度を発光分光法で計測した例[20]を示す。針電極は銅製である。図14は放電の静止写真と針電極近傍における銅原子の発光スペクトルを示す。スペクトル強度比から算出した温度は約 15,000 K である。図14と同様のプラズマについて、 H_{β} 線のスペクトル広がりから求めた電子密度の経時変化を電圧・電流波形とともに図15に示す。通電中、電力が大きく変化しているにもかかわらず、電子密度は 10^{18} cm^{-3} を超える高密度に保たれる。

詳細な光学観測[11, 12]から、ストリーマは水の気化を伴いながらステップ状に進み、ステップの際に衝撃波が生成されることが明らかとなっている。衝撃波のシュリーレン像のストリーク撮影によって得られる衝撃波伝播速度とユゴニオの式から、放電近傍で 1 GPa 程度の圧力が発生することが明らかとなっている。

図16は、1 mM の塩化カリウム溶液中に置いた針対平板電極で生成した放電プラズマの発光スペクトルである。水素原子からの発光とともに 300 nm 近傍の OH ラジカルからの強い発光があり、放電近傍では OH ラジカルが豊富に生成されることがわかる。この OH ラジカルは H_2O_2 に変わり、連続的な放電生成によって液中に H_2O_2 が蓄積される[10]。

勝木 淳, 浪平隆男 (熊本大学)

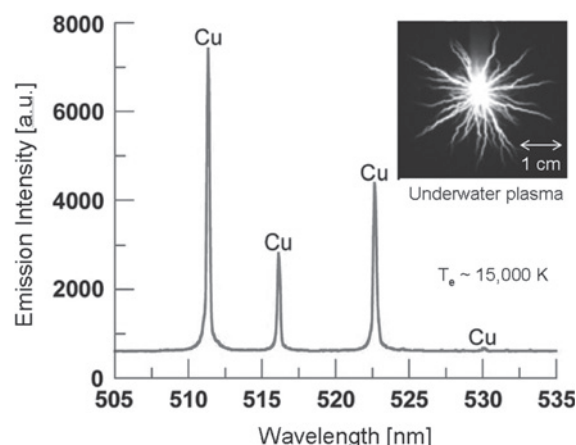


図14 水中パルスプラズマからの銅原子スペクトル[20].

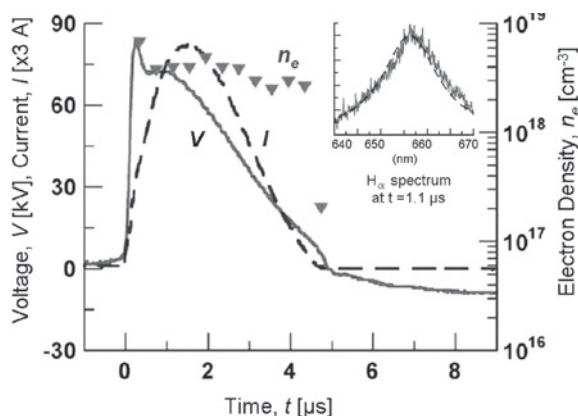


図15 水中パルス放電中電子密度の経時変化[20].

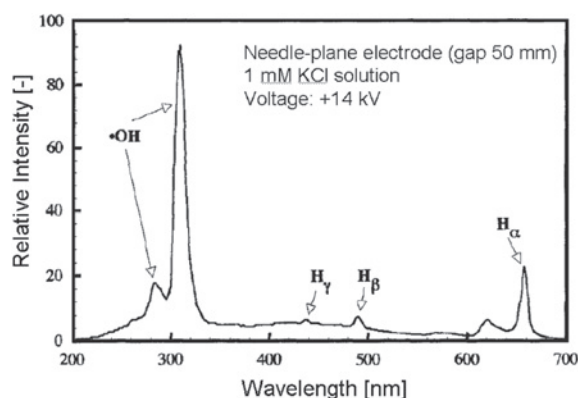


図16 水中パルスプラズマからの発光スペクトル[10].

2.4 電解質プラズマ

近年、従来のシリコンをベースとした固体エレクトロニクスに代わり、分子材料をデバイスとして用いる「分子エレクトロニクス」が次世代エレクトロニクスの有力候補として注目を集めている。その中でも特に、DNAを代表とする生体高分子は、遺伝情報を担うという医学的観点のみならず、その特異な構造から新機能性複合ナノ材料構築の Building Block として期待されており、きわめて興味深い物質である。

DNA は分子内に存在するリン酸基のため溶液中において多価負イオンとして振る舞う。このようなイオンを含む溶液は一般に電解質溶液と呼ばれ、1920年代にデバイとヒュッケルによって電解質溶液のイオン挙動に関する理論[21]が構築され、その後、気体プラズマ理論へ発展した歴史的経緯がある。したがって筆者らは、この電解質溶液を“電解質プラズマ”と定義し、気体プラズマと同様に取り扱うことを提案している[22]。電解質プラズマは荷電粒子（電解質）と中性粒子（溶媒）から構成され準中性であることから、気体プラズマと本質的には同じといえる。しかし一方で、電解質プラズマは液体であるため、密度が非常に高く、温度が低いことに起因して、デバイ長が nm オーダと極端に短いことが特徴であり、また高密度であることから従来の気体プラズマとは異なる物理的・化学的反応が期待でき、新物質創製に大きな可能性を秘めていると考える

ことができる。

本研究では、これまで東北大学で行われ実績のあるアルカリフリーレンプラズマ中などにおいてカーボンナノチューブ（CNT）塗付基板への直流バイアス印加に伴うイオン照射法（基板バイアス法）[23]を、DNA が負イオンとして存在する溶液（電解質プラズマ）に適用し、DNA を照射した炭素ベースの新機能性物質の創製を実現することを目的としている。

図17に電解質プラズマ実験装置図を示す。5 cm³ の DNA 水溶液中に 5 mm × 40 mm のアルミニウム製アノード、およびカソード電極を挿入し、直流電圧 V_{DC} および高周波電圧 V_{RF} を独立に印加する。DNA は溶液中で負イオンとして存在するので、直流電場を印加することで、アノードへの DNA 負イオン照射を行うことができる。また電極に用いているアルミニウムは、DNA 分子への表面活性が高い材料として知られている[24]ため、照射された DNA 負イオンはアノード電極表面に半永久的に吸着する。したがって、照射時間の経過と共に溶液濃度が減少することになり、その減少量から DNA 負イオン照射量を見積ることが可能である。本実験では、アデニン（A）で構成される 1 重螺旋 DNA を用いており、1 本の DNA 内に存在する塩基数（鎖長）を添字 x で A_x のように表す。ここでは、 $A_5 \sim A_{59}$ を使用した。

図18に DNA 塩基照射量の鎖長依存性を塩基数密度 n_{base} の変化量 Δn_{base} として示す。破線は初期塩基数密度、白丸は10分経過後の塩基数密度であり、その変化量は棒グラフで示している。初期塩基数密度を一定とした場合（図18上）、塩基数密度の変化量は、鎖長に依らずほぼ一定であることがわかった。すなわち、DNA 塩基照射量が一定であることから、鎖長が短いほど（1 本の DNA を構成する塩基数が少ないほど）照射される DNA 負イオン数は多くなる。次に、初期の DNA 負イオン数密度を一定にした条件で照射を行ったところ（図18下）、DNA 鎖長が長くなるにつれて塩基照射量が多くなることがわかった。これらの結果から、DNA の照射量は初期の塩基数密度に依存していると

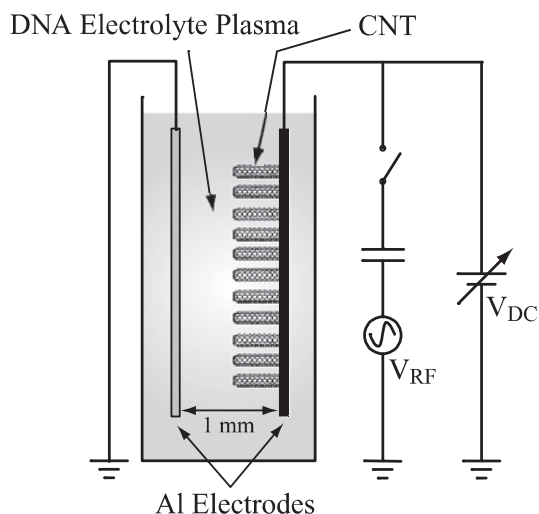


図17 電解質プラズマ実験装置。

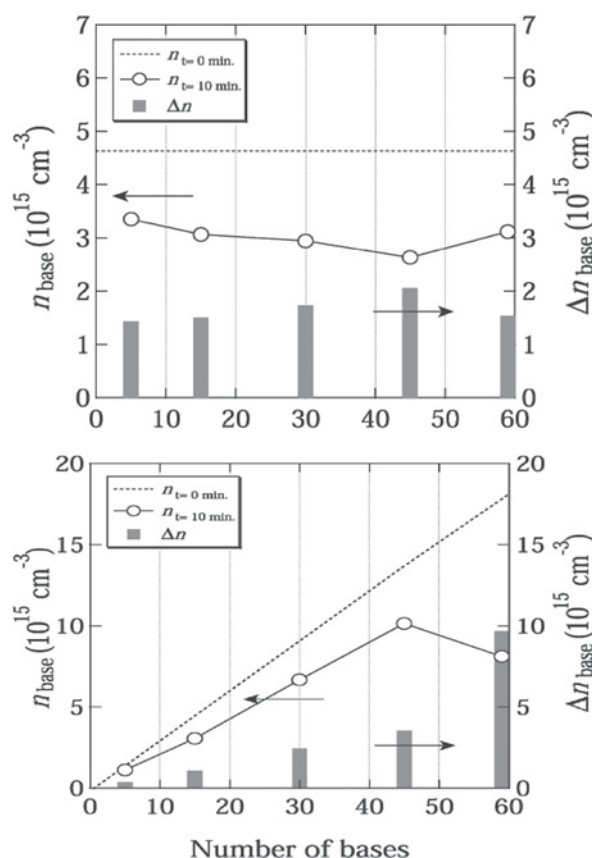


図18 DNA塩基照射量の鎖長依存性(上)初期塩基数密度一定, (下)初期DNA数密度一定 ($V_{\text{DC}} = 10 \text{ V}$).

いえる。これは、塩基数が負電荷量に対応するため、溶液中の総負電荷量に比例してDNA塩基の照射量が決まることを意味している。以上のことから、電解質プラズマを用いることによって、基板電極へのDNA負イオン照射量の制御が可能であることが明らかになった。この結果をもとに、本研究では正イオン分子と負イオン分子のみから構成される特殊な電解質である「イオン液体」[25]を利用した実験も行っており、イオン液体に直流電場を印加することで、カソード、アノードへそれぞれ正、負イオン照射を行うことができ、新機能的炭素物質の電気特性制御等への利用が期待されている。

これまで述べてきた電解質プラズマを従来の気相プラズマと接触させた場合、その境界面ではいわゆるシース電場の形成等により、イオン、電子がアクティブに反応し、多彩な反応場が形成され得る。その気相-液相界面でのイオン等の挙動をより詳細に調べるため、気相-液相界面を有した直流放電プラズマ生成し、その特性評価を行った。本実験で用いたイオン液体は蒸気圧が極めて低く、熱的に安定であるため、これを放電用電極とすることで、減圧下での気相-液相界面放電プラズマ生成が実現できる[26]。すなわち、低気圧プラズマプロセスのような従来の微細加工技術の概念を液体プラズマプロセスへ導入することを可能にし、ウェット-ドライプロセス融合の新領域プロセッシングを提供できる。図19に気相-液相界面放電プラズマ実験装置図を示す。直流放電Arプラズマが、イオン液体(イミダゾリウム系: $[\text{C}_8\text{H}_{15}\text{N}_2]^+ [\text{BF}_4]^-$)が導入される容器底

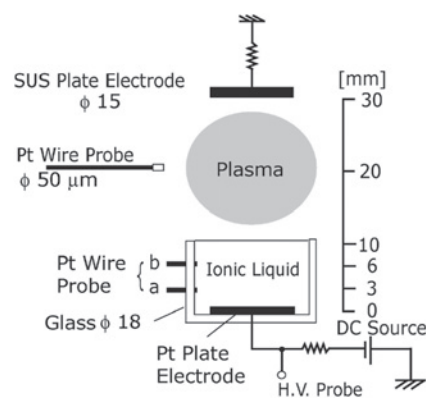


図19 気相-液相界面プラズマ実験装置。

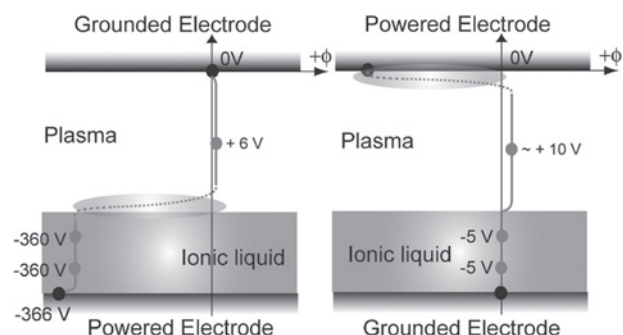


図20 放電電極間のプラズマ電位分布(左)A-mode, (右)B-mode.

部の白金平板電極、そこから30 mm離れたステンレス電極間で放電電流一定 (1 mA) の下で生成される (Ar 圧力: 40 Pa, 放電電圧: -300 ~ -500 V)。容器側面から電解質プラズマ中に導入された2本の白金ワイヤープローブと気相プラズマ中に挿入された静電プローブを用いて液中電位およびプラズマ空間電位を測定し、電位構造を巨視的に観測した。その結果を図20に示す。イオン液体中の電極に直流電位を印加した場合を A-mode, 対向の気相中の電極に印加した場合を B-mode とすると、イオン液体中の電位は両モード共にイオン液体中の電極電位とほぼ同程度の値を示し、A-mode の場合には気相-液相界面に大きなシース電場が形成されていることがわかった。

ここで、A-mode, B-mode におけるイオン液体色の変化を UV-vis スペクトルにより、プラズマ生成時間を変化させて調べた。その結果、図21に示すように、A-mode の場合に明瞭な吸光度変化が観測された。気相-液相界面のシース電場で加速された数 100 eV の高エネルギーイオンがイオン液体構造の変化を引き起こしたためと考えられ、気相プラズマ中から電解質プラズマへ向けてプラズマイオン照射が行われていることを実証した。気相プラズマ中での Ar I スペクトル (751 nm) 強度により規格化した CH スペクトル強度 (389 nm) の時間発展を図22に示す。B-mode の場合と比較すると、A-mode の場合に CH スペクトルが強く観測され、放電時間とともに発光強度が強くなることが明らかとなった。この CH スペクトルは、プラズマイオン照射によるイオン液体正イオン分子の構造体変化に由来していると考えられる。

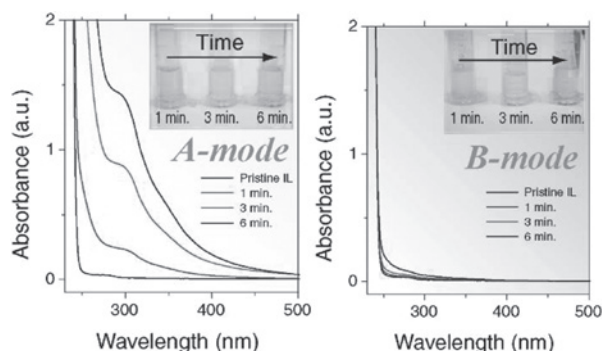


図21 プラズマ生成後のイオン液体のUV 吸収スペクトル時間発展(左)A-mode, (右)B-mode, (挿入図)イオン液体色の写真.

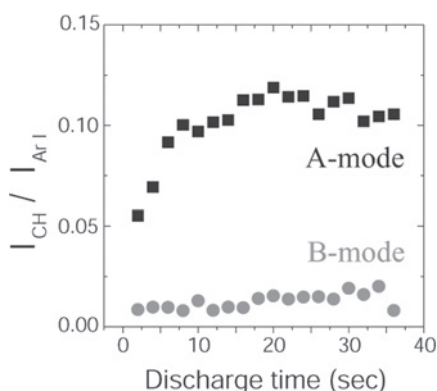


図22 各 mode における気相プラズマ中の CH スペクトル強度の時間発展.

以上の結果から、気相-液相界面では、エネルギー制御されたプラズマイオンの照射により、物理的・化学的に活性な反応場を提供できることが実証され、現在、電解質プラズマ中でのナノ粒子形成、粒径分布制御、生体高分子会合新規ナノ炭素物質創製などの研究を推進している。

金子俊郎, 畠山力三 (東北大学)

参考文献

- [1] T. Miichi, N. Hayashi, S. Ihara, S. Satoh and C. Yamabe, *Ozone-Sci. Eng.* **24**, 471 (2002).
- [2] B. R. Locke, M. Sato, P. Sunka, M.R. Hoffmann and J.-S. Chang, *Ind. Eng. Chem. Res.* **45**, 882 (2006).
- [3] A. Yamatake, H. Katayama, K. Yasuoka and S. Ishii, *Int. J. Plasma Environ. Sci. Technol.* **1**, 91 (2007).
- [4] 佐藤圭輔, 安岡康一, 石井彰三: 電学論 A **128**, 401 (2008).
- [5] T. Maehara, H. Toyota, M. Kuramoto *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 8864 (2006).
- [6] J. Luque and D.R. Crosley, "LIFBASE" Database and Spectral Simulation Program (Version 1.9), SRI International Report Mp 99-009 (1999).
- [7] C. Stehlé and R. Hutcheon, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **140**, 93 (1999).
- [8] O. Laux, T.G. Spence, C.H. Kruger and R.N. Zare, *Plasma Source Sci. Technol.* **12**, 125 (2003).
- [9] J.S. Clements, M. Sato and R.H. Davis, *IEEE Trans. Ind. Appl.* **23**, 224 (1987).
- [10] M. Sato, T. Ohgiyama and J.S. Clements, *IEEE Trans. Ind. Appl.* **32**, 106 (1996).
- [11] S. Katsuki, K. Tanaka, T. Fudamoto, T. Namihira, H. Akiyama and H. Bluhm, *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 239 (2006).
- [12] W. An, K. Baumung and H. Bluhm, *J. Appl. Phys.* **101**, 053302 (2007).
- [13] M. Sato, B. Sun, T. Ohshima and Y. Sagi, *J. Adv. Oxid. Technol.* **4**, 339 (1999).
- [14] H. Akiyama, *IEEE Trans. Diel. Elec. Insul.* **7**, 646 (2000).
- [15] A. Abou-Ghazala, S. Katsuki, K.H. Schoenbach, F.C. Dobbs and K.R. Moreira, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30**, 1449 (2002).
- [16] 札元泰輔, 浪平隆男, 勝木 淳, 秋山秀典, 今久保知史, 真島隆司: 電気学会論文誌 A **126**, 669 (2006).
- [17] S. Katsuki, H. Akiyama, A. Abou-Ghazala, K.H. Schoenbach, *IEEE Trans. Diel. Elec. Insul.* **9**, 498 (2002).
- [18] 中司 宏, 廣岡達也, 勝木 淳, 秋山秀典: 電気学会論文誌 A **123**, 618 (2003).
- [19] I.V. Lisitsyn, H. Nomiyama, S. Katsuki and H. Akiyama, *IEEE Trans. Diel. Elec. Insul.* **6**, 351 (1999).
- [20] T. Namihira, S. Sakai, T. Yamaguchi, K. Yamamoto, C. Yamada, T. Kyan, T. Sakugawa, S. Katsuki and H. Akiyama, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **35**, 614 (2007).
- [21] P. Debye and E. Huckel, *Physikalische Zeitschrift* **24**, 185 (1923).
- [22] T. Kaneko, T. Okada and R. Hatakeyama, *Contrib. Plasma Phys.* **47**, 57 (2007).
- [23] R. Hatakeyama, T. Hirata and G.-H. Jeong, *Plasma Source Sci. Technol.* **13**, 108 (2004).
- [24] M. Washizu and O. Kurosawa, *IEEE Trans. Ind. Appl.* **26**, 1165 (1990).
- [25] R. Seddon, *Nature Mater.* **2**, 363 (2003).
- [26] K. Baba, T. Kaneko and R. Hatakeyama, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 201501 (2007).