



5. パルスパワー技術の応用

勝木 淳, 高木 浩一¹⁾, 浪平 隆男

熊本大学, 岩手大学¹⁾

(原稿受付: 2011年3月18日)

パルスパワーは、宇宙、慣性核融合、超高エネルギー密度物性研究などの大型科学研究とともに発展してきた。最近では、小型化や高繰り返し化などの電源技術の飛躍的發展によって、光源、環境、医療、食品、農業など、身近なところで利用されつつある。パルスパワー技術入門の最終回となる今回は、パルスパワーの利用形態を述べ、いくつかの特徴的な応用を挙げその概略を述べる。

Keywords:

pulsed power, high power particle beams, discharge excited gaseous laser, high energy density plasma, atmospheric pressure non-thermal equilibrium plasmas, underwater plasmas, underwater shock wave, radiation sources, environmental applications, biological applications

5.1 パルスパワーの特長

パルスパワーの特徴は、大電力であることと対象への作用時間がきわめて短いことである。このパルスパワーがどんなことに使えるのか、抵抗体に電流を流して加熱する例を考えてみよう。ゆっくりと電流を流す場合、与えた熱エネルギーに伴って抵抗体の温度が上昇するが、同時に放射や熱伝導によってエネルギーが散逸する。電流を大きくしても温度上昇とともに散逸エネルギーも増加するので、最終的にはエネルギー付与と散逸がバランスしたところで抵抗体の温度が決まる。このエネルギー散逸は、不安定性の成長や非熱平衡状態の緩和など、系のエントロピーを増大させるように様々な形で現れ、対象におけるエネルギー密度（この場合は温度）の上昇を妨げる。これに対してエネルギー散逸の時間に比べてはるかに短い時間に大電流を流したらどうだろう。放射損失は避けられないが熱伝導損失は大きくならないので、より高い温度まで温めることができる。このように、パルスパワーは、系のエネルギー散逸・緩和の時定数よりも短い時間でエネルギーのやりとりを行うことによって、より大きいエネルギー密度を実現するための技術であると考えることができる。

5.2 パルスパワーの利用形態

従来、パルスパワーは、加速器などのように電磁エネルギーとして直接使われる場合もあるが、むしろ荷電粒子ビームやプラズマなどに一旦別のエネルギー形態に変換して使われることの方が多かった。最近では、特にバイオ応用では、パルス高電界やパルス強磁界という直接的な形で使われる例も多くなってきた。本節ではパルスパワーの一次変換エネルギー形態について述べる。なお、極短パルスレーザーは究極のパルスパワーであるが、概して電気エネ

ルギーを回路的に圧縮したものをパルスパワーと呼ぶことが多いので、ここでも電気エネルギーのパルスパワーを中心に話を進める。

5.2.1 高エネルギー密度プラズマ

高エネルギー密度プラズマは、100万気圧に及ぶような超高圧現象であり、宇宙物理、核物理、状態方程式などの学術的興味の対象として非常に魅力的である。一方、慣性核融合、X線レーザー、中性子源、高エネルギーフォトン源など、科学技術としての利用価値も高く、古くから多くの研究者が関わってきた。本章で扱う高エネルギー密度プラズマはパルスパワーの応用としての位置づけであり、高エネルギー密度プラズマが何たるかについては他の文献[1]にゆずることとして、その典型的な特徴と生成方法を中心に述べる。

(1) ピンチ放電プラズマ

図1にパルスパワー放電を利用したプラズマ生成方式を模式的に示す[2, 3]。いずれの方式も電磁力によるプラズマのピンチ (pinch) 現象を利用したものである。その中で最も代表的なZピンチ方式(a)を例にとってその動作原理を述べる。プラズマ中を放電管の軸方向(図ではZ軸は水平方向)に流れるパルス電流とそれにより発生する方位角方向の磁界によって、プラズマを強力にピンチし、衝撃波加熱とともにジュール加熱によって高温・高密度のプラズマ柱を放電管軸上に生成する。プラズマ源となるガスの供給方式として、絶縁壁を持つ放電管に所定の圧力でガスを詰めておくガス詰め型と、真空中で高速バルブによってパルスの電極間だけにガスを供給するガスパフ型とがある。ガスパフ方式では絶縁壁は不要である。その他、電磁力でプラズマを加速して粒子の運動エネルギーを高めてからピンチさせるプラズマフォーカス放電(b)、細い絶縁物

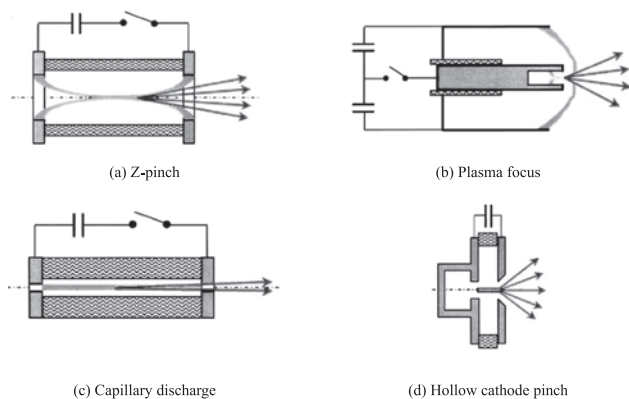


図1 放電型高エネルギー密度プラズマ生成方式[3].

の管の中で放電プラズマを生成し、壁で高エネルギープラズマを閉じ込めるキャピラリー放電(c)、陰極の表面積を増加することによって電流密度を小さくし、放電による陰極の損耗を低減したホローカソード放電(d)がある。

(2) レーザー生成プラズマ

ガラスレーザーや炭酸ガスレーザーのような大出力パルスレーザー光を直径 $100\ \mu\text{m}$ 程度以下に集光し、金属や Xe の氷等の固体表面に照射すると、入射パワー密度がきわめて大きいので、その表面に高温・高密度プラズマがスポット状に発生する。このときプラズマ中の多価に電離したイオンから軟 X 線が放射される。レーザー生成プラズマから発生する光の波長は基本的にターゲットの元素組成で決定され、元素に応じて数 nm から数十 nm の範囲で、連続的な光や輝線状の光が得られる。パルスレーザー光を線状に集光して、平板ターゲットあるいは細線に照射すると、直線状で膨張するレーザープラズマが生成される。この膨張するプラズマ内では温度の急激な低下に伴い、イオンの準位密度に反転分布が生じる。このときプラズマに沿った光の増幅利得が 1 以上となるので光増幅が可能となり、コヒーレントな軟 X 線が発生される。

(3) 荷電粒子ビーム生成プラズマ

レーザーと同様に、高エネルギーの荷電粒子ビームをターゲットに照射することによっても高エネルギー密度プラズマを作ることができる。レーザーと比較すると、粒子ビームは発生効率とターゲットでの吸収効率が高い。特にパルスパワー装置で駆動される相対論的電子ビームや軽イオンビームは比較的簡単な装置で大電力を発生できるため、主に慣性核融合のエネルギードライバーとして古くから高エネルギー密度プラズマ生成実験に用いられてきた。粒子ビームとターゲットが相互作用したときエネルギー付与は、荷電粒子の出力密度（加速電圧×電流密度）だけでなく、ターゲット内での飛程に依存する。ターゲット内での飛程は荷電粒子の質量に比例的に依存するので、軽い粒子ビームの場合は、ターゲット上でのエネルギー密度を大きくするために加速電圧を小さくしてビーム電流密度を上げる必要がある。相対論的電子ビームの場合は、発生効率が非常に高い上、簡単な装置で発生できるが、飛程が長い上に、自己磁場の影響が非常に強いので制御が難しく、エネルギー密度の高いプラズマ形成にはあまり用いられない。表

面処理[4]やフライヤー加速[5]などに用いた例もある。

その他、水中の金属細線を高速大電流で溶断することによって、比較的低温の高密度状態、いわゆる Warm Dense Matter を生成でき、物性研究に用いられている。

5.2.2 大気圧非熱平衡プラズマ

大気中に離して置いた 2 つの電極に電位差を与え徐々に大きくすると、いずれ雷放電（アーク放電）が起こる。この放電を超高速カメラで観測すると、正電極近傍に放電の種ができてからアーク放電に至るまでのサブ μs の間、徐々に発光が強くなる。この過程は放電の前駆現象と呼ばれる。電子がだれが集まってストリーマになり、その後空間が温められながら導電率が上昇するとともに不均一性が成長して局所的な放電、すなわちアーク放電に至る。パルスパワーを用いてこの前駆現象よりもはるかに短い時間のみ電界をかけることによって、電子のみが運動エネルギーを有する極端な非熱平衡状態を実現できる。図 2 は、振幅 70 kV の高速な立ち上がりをもつパルス電圧を同軸線対円筒電極に印加したときの軸方向からみた可視発光像の時間推移である[6]。電界が集中する線電極近傍で発光が始まり、約 50 ns で電極間を横断し外部電極に到達していることがわかる。50 ns までは極端な非熱平衡状態であり、ここまでの現象のみを利用すればイオンや中性粒子を温めることなく 10 eV 程度の高エネルギー電子を利用できる。このナノ秒パルスパワーは、後で述べる大気圧ガス処理において、きわめて高い効率の処理を実現できる画期的な技術として期待される。

5.2.3 液中プラズマ

水中に置いた針電極に急峻に立ち上がる 100 kV 程度の高電圧を印加すると、図 3 のような放射状に広がりをもつ筋状の放電が発生する[7]。この筋状の放電を、大気圧放電の前駆現象に見られるストリーマと同様に単にストリーマと呼ぶことが多い。ただ、気体中のそれとはメカニズムが異なると考えられている。同軸線対円筒電極を用いると放電外形は円筒型になる。水中におけるストリーマ進展の速さは、約 30 km/s であり、一旦放電の進展が開始すると、若干電圧が変動してもほぼ一定である。放電進展の速さは電圧に強く依存しないことから、放電体積を増やすためにはパルス幅の長い電圧が必要となる[8]。ストリーマ放電の

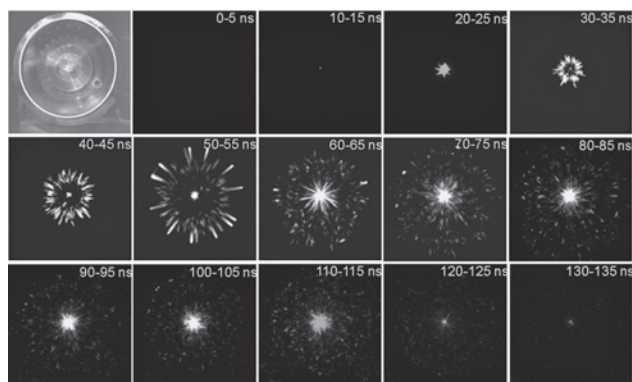


図2 大気中同軸線対円筒電極間におけるパルスパワー放電の可視光像の時間推移[6]（線電極と円筒電極の直径はそれぞれ 0.5 mm, 76 mm, 奥行きは 10 mm）。

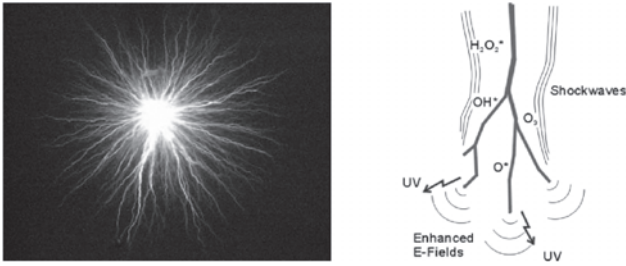


図3 水中パルスパワー放電プラズマと物理化学作用の模式図[7].

先端では、放電先端の超高電界、紫外線、衝撃波、ラジカルの発生などの様々な高エネルギー密度現象が起こっている。放電が一定の速さで水中を進展している間、上に述べた作用の及ぶ範囲が水中を移動することになり、広い範囲の水が高エネルギー状態に曝される。これらの高エネルギー現象は、水中の浮遊物に直接作用するので、例えば、微生物駆除[7]や、有機高分子の分解[9]といった水質浄化に利用できる。

最近、媒質として超臨界流体を用いた例が報告されている[10]。超臨界流体自体は、液体に近い密度でありながら気体のように拡散性が大きく、物質の抽出などに産業利用されているが、この性質とプラズマの反応性を掛けあわせた新規極限反応場の形成によって、新物質形成や難分解性物質の分解が試みられている。

5.2.4 水中衝撃波

大電流パルス放電によって衝撃波を発生させることができる。衝撃波とは空気や水のような媒質中を音よりも速く伝わる圧力波のことであり、エネルギーが非常に短時間に蓄積されて瞬間的に解放される時に発生する。媒質中で放電させて高速に立ち上がる大電流を流すと、瞬間的に放電回路が熱せられて局部的に急激な圧力上昇が起こり、媒質の高速膨張とともに衝撃波が発生する。したがって、大きな圧力の衝撃波を得るためにはエネルギーの高速注入、すなわち電流の立ち上がりが高速であることが重要である。衝撃波の伝搬速度は圧力の増加に伴って大きくなる。衝撃波のマッハ数 M 、衝撃波通過前後の密度の比 ρ_b/ρ_a および温度比 T_b/T_a は、ランキン-ユグニオ (Rankine-Hugoniot) の関係から、衝撃波前後の圧力を p_b, p_a とすると次のように表される[11]。

$$M^2 = \frac{4(\rho_b/\rho_a) + 1}{5} \quad (1)$$

$$\frac{\rho_b}{\rho_a} = \frac{4(\rho_b/\rho_a) + 1}{\rho_b/\rho_a + 4} \quad (2)$$

$$\frac{T_b}{T_a} = \frac{(\rho_b/\rho_a)[(\rho_b/\rho_a) + 4]}{4\rho_b/\rho_a} \quad (3)$$

水中放電によって形成される、衝撃波の空間プロファイルは、放電を駆動するパルスパワーの時間履歴に依存する。立ち上がりの高速なパルスパワーで駆動すると、衝撃波の波頭がシャープにかつピーク圧力が大きくなる。また、衝撃波面通過後の負圧によってキャビテーションを発生させることも可能である。

5.3 電磁波源としての応用

パルスパワーで最も産業的に成功しているのはパルス高出力レーザーであろう。媒質の反転分布形成には高速のパルスパワーが必要とされる。また、高エネルギー密度プラズマでは高密度で多価イオンを生成できるので、輝度の高い高エネルギーフォトン源となりうる。さらに、パルスパワーをプラズマや荷電粒子ビームに変換してこれらの非線形波動現象を利用して強力なパルス電磁波を発生させることもできる。以下に例を挙げる。

5.3.1 放電励起型パルス高出力レーザー

多くの気体レーザーは放電によって励起される。固体に比べ媒質密度の希薄な気体レーザーで大きい出力を得るためには気圧を高くする必要がある。高気圧下では放電の均一性が乱されやすく、安定なグロー放電が得にくい。レーザー励起に必要な放電の均一性には短パルス放電が有利である。そのため高出力気体レーザーの励起にはパルスパワーが用いられる。パルス励起を必要とする代表的な気体レーザーとしては炭酸ガスレーザー、銅蒸気レーザー、窒素レーザー、 F_2 レーザーや各種エキシマレーザーがある。ここでは、特に高速なパルスパワー電源を必要とするエキシマレーザーについて述べる。エキシマとは、基底状態で結合しない2つの分子が励起状態において安定に結合する2原子分子のことである。エキシマの励起エネルギーは比較的大きいが寿命は数 ns ときわめて短い。エキシマレーザーは、高い光子エネルギーを持つ短い発振波長域と高効率・大出力・高繰り返し動作が可能な気体レーザーである。エキシマレーザーは大気圧より高い圧力で動作させるため二体・三体衝突による脱励起が高速に起こる。効率よくエキシマレーザーを発振させるには、コロナ予備電離方式等を利用した均一なグロー放電生成ときわめて速い励起が不可欠となる。駆動回路である磁気パルス圧縮電源(MPC)はパルスの圧縮率を高めるために多段化されており、放電光のパルス幅も 50 ns 以下である。リソグラフィ用エキシマレーザーでは繰り返し 10 kHz までのものがある。エキシマレーザーのリソグラフィ以外の用途としては液晶のアニール、インクジェットプリンタのノズルヘッド加工、眼科治療(角膜除去)などに利用される。

5.3.2 高エネルギーフォトン源

波長 30 nm 以下の極端紫外線から 1 nm 付近の軟 X 線領域は、半導体リソグラフィ、生体顕微鏡、分光光源、原子分子の素過程の研究等、いろいろな応用分野がある[3]。この領域の光源としては、シンクロトロン光(SOR)や、プラズマ光源が利用されている。SOR は、発生する軟 X 線の強度や発散角の小ささから理想的な光源と言えるが、装置が大規模であり容易に利用できるとは言い難い。これに対して高温・高密度プラズマを用いたプラズマ光源は比較的安価に装置を製作し利用することができる。ここでは、半導体リソグラフィ用の極端紫外光源について紹介する[12, 13]。リソグラフィでは、レチクルによって加工する配線パターンをかたどった光を、シリコンウェハ上に塗布したレジストに照射し、レジストの光化学変化を利用してウェハ上に

回路パターンを形成する．ところが，光のフレネル回折によってウェハ上で像ぼけが生じ，これが加工パターンの解像度を決める．波長が短いほど回折が小さくなるので，集積化が進むにつれて光源の短波長化が必要である．リソグラフィ用の光源は水銀ランプ（436 nm, 365 nm）からエキシマレーザー（ArF:193 nm）へと足早に移り変わってきた．現在エキシマレーザーと特殊な光学技術によって約 30 nm の解像度でコンピュータチップが量産されている．さらに集積化が進んで 30 nm 以下になると，高エネルギー密度プラズマを用いた極端紫外(EUV)光源が必要となる．この帯域の光は大気および物質との相互作用が強いので，ミラーを用いた光のハンドリングは真空中で行われる．EUV 光をウェハ上に集光するための反射ミラーにはシリコンとモリブデンの複合多層膜が用いられており，ミラーの特性上，波長 13.5 nm の光が利用される．2000年以降，平均出力 180 W の EUV 光源をめざして日欧米で熾烈な開発競争が行われており，方式もレーザー生成プラズマ方式と放電プラズマ方式が競合している．プラズマターゲットには 13.5 nm 付近に強いスペクトルを有する錫が用いられる見込みである．

5.3.3 高出力マイクロ波・ミリ波

高出力マイクロ波・ミリ波の発生装置には，自由電子レーザー，ジャイロトロン，バーカトル，後進波発振器，相対論的マグネトロン等の方式があり，加速器，プラズマ加熱，レーダーなど，様々な用途で使われている．これらの中でも GW 級の出力が可能なバーカトル[14]について述べる．バーカトルは仮想陰極発振器とも呼ばれる．真空中に置かれた陽陰極管にパルス高電圧を印加すると，陰極表面にプラズマが発生し，陰極と陽極間の電界によってプラズマから引き出された電子は光速近くまで加速される．その後，電子は陽極を突き抜けてドリフト空間に入る．電子ビームがドリフト空間を伝搬できる限界条件（空間電荷制限電流）を超えようとするとき，電位のくぼみが発生し，このくぼみが作る電界によって後から来る高速電子が減速されて電位のくぼみはさらに深くなる．この電位のくぼみを仮想陰極(virtual cathode)と呼ぶ．仮想陰極は安定に存在することはできず，時間的・空間的に振動する．この仮想陰極の振動が電界を時間的に変化させマイクロ波を発生する．

5.4 環境応用

本節では広範囲にわたる環境問題のなかでも有害ガスと水処理，省エネルギー・省資源化に貢献できる技術としてリサイクルについて取り上げる．

5.4.1 大気圧ガス処理

(1) 有害ガスの分解

放電プラズマ処理の特長は，大気圧下で短時間に高効率な処理が行えることや，複数のガスが混在する場合でも適用できることにある．ただし，処理ガスの流量やガスの濃度や性状によって，その規模や装置の種類は異なる．

大気中の汚染物質の濃度が 100 ppm を下回る場合には，非熱平衡プラズマが用いられる．大気圧非熱平衡プラ

ズマの場合，平均電子温度は数 eV，電子密度は放電形式に依存して $10^{15} \sim 10^{21}/\text{m}^3$ 程度と推定されており，電子エネルギー分布の高エネルギー電子による電子衝突による解離・電離および生成されたイオン，ラジカルが反応を起こし，有害大気汚染物質は処理される．非熱平衡プラズマの発生方法には，(1)バリア放電，(2)沿面放電，(3)バックドベッド放電，(4)コロナ放電に加えて(5)パルスストリーマ放電がある[15]．

放電プラズマによる有害大気汚染物質の処理への取り組みとして，窒素酸化物 NO_x （主に NO と NO_2 の混合物）の処理について述べる．燃焼により発生する NO_x は処理流量が比較的大きく，反応器内の広い空間でプラズマを生成する必要がある．そのため比較的長い電極間を均一にプラズマ化する必要がある． NO_x の放電プラズマによる処理は，ガスの組成に大きく影響されるが，その主成分である窒素と酸素は，高速電子との衝突で解離や電離されて，活性酸素(O)や活性窒素(N)がプラズマ中に生成される．燃焼排ガスを処理するプラズマ中での主要な反応としては， NO_x の主成分である NO は次式のように比較的容易に酸化されて NO_2 となる．



ここで M は第 3 体で，空気中では N_2 や O_2 である．燃焼排ガスのように処理ガス中に水分が存在するとプラズマにより OH ラジカルが生じるので， NO_2 の一部はさらに



となる．添加ガスとしてアンモニア NH_3 を導入すると



硝酸アンモニウム (NH_4NO_3) となる．これは硝安と呼ばれるエアロゾル粒子であり，肥料として利用できる．また次式のように還元されて NO に戻ると NO_x の除去を阻害することになる．



(2) オゾン生成

オゾンは 3 個の O 原子で構成された独特の刺激臭を持つガスである．オゾンは容易に酸素原子を分離するため，きわめて強い酸化力を持ち，酸化・分解，殺菌，脱色，脱臭などの用途に用いられる．工業用オゾンの生成には無声放電（バリア放電）を用いた装置（オゾナイザ：ozonizer）が利用されている．酸素ガスを原料とする場合，オゾンはオゾナイザ内部で発生したバリア放電により主として次のような 2 段階の過程により生成する．



ここで M は第 3 物質で，O， O_2 または O_3 である．前出のバリア放電では，オゾナイザへの供給電力のうち，オゾン生成に利用されるのは最大でも 30% 程度であり，残りの大

部分は熱となる。熱の発生は生成したオゾンの分解にもなるため、電極の冷却が効率的な発生には必要である。またオゾン濃度が高くなると、生成したオゾンの一部はその解離電圧が 1.04 eV と低いのでプラズマ中で電子衝突により解離されて高濃度化を阻害することになる。オゾン分解を抑えるための方法として、電極間隔を 0.1 mm 程度に短ギャップ化し、電子エネルギーを制御することで 300 g/Nm³ のオゾンの発生が可能なオゾナイザが開発されている[16]。一方、5.2.2で述べたナノ秒パルスパワーを用いるとガス温度が上がらないので、非常に効率よくオゾンが生成できる[17]。図4は様々な方式のオゾナイザをオゾン濃度と収率の観点で比較したものである。ナノ秒パルス方式は、オゾン濃度で若干劣るが、収率の点では実用化されている短ギャップバリア放電のオゾナイザを凌ぐ。

5.4.2 水環境浄化

(1) 水中微生物の不活性化

湖沼において、経済活動に伴い周辺から流れ込んだリンや窒素などの栄養物質によって藍藻プランクトンが大量に発生するようになった。水道水の水源におけるプランクトンの大量発生は、景観を損ねるばかりでなく水質に影響するため、緊急の対策が望まれている。水中パルスパワー放電はアオコを形成する藍藻プランクトン（ミクロキスティス）を効果的に不活化する[8]。水面近傍に浮遊するアオコをプラズマに曝すと即座に沈降する。電子顕微鏡観察から、プラズマ処理後も細胞壁と膜構造は残り、細胞内の気胞が消滅することがわかっている。

(2) 水中化学物質の分解

機械部品や電子部品の洗浄に使用されるトリクロロエチレン、クリーニング店でドライクリーニング用の溶剤に使用されるテトラクロロエチレン、ゴルフ場で芝の保護・育成のために使用されている農薬は、重要な飲料水源である地下水を汚染する。現在の浄水過程においてはオゾン、活性炭や紫外線を用いた高度処理が行われはじめているが、これらの物質の完全な除去ができていない。より簡易に有機物を分解するために、パルスパワーによる放電処理が検討されている[7, 9]。フェノールを含む溶液の中で図3のようなプラズマを繰り返し生成すると、徐々にフェノールが分解される。さらに、フェノール溶液に対して過酸化水

素を添加すると、フェノールはより急速に分解される。放電を行わない場合には過酸化水素存在下においてもフェノールはほとんど分解されないのに対し、過酸化水素存在下では水中でのヒドロキシラジカル(OH^{*})の生成量が増加するため急速に分解が進むと考えられる。放電のみによる処理だけでなく、触媒作用を利用することでより効率のよい処理となる。

5.4.3 リサイクル

(1) 建設物廃棄コンクリート処理

建設工事に伴い年間約1億トン排出される建設廃棄物（コンクリート塊）のリサイクル率は高々50%程度に留まっている。土木工事から大量に発生するコンクリート塊のリサイクル率の向上は循環型社会の構築に必要不可欠であり、環境保全の観点から良質の骨材（砂利等）の入手が困難になりつつある現状を考慮すると、廃コンクリート塊から骨材のみを分離して再利用するという新しいリサイクルシステムの確立が望まれている。こうした中、パルスパワー放電を用いたコンクリート破砕法[18]が注目されている。破砕力が内部から生じるため反力が基本的に不要であり、機械方式に比べて装置を小型・軽量化することができる。パルスパワー方式では、コンクリートと骨材の界面における放電や、界面での音響インピーダンスの不連続性に起因する衝撃応力によって、骨材がコンクリートから分離される。分離された骨材は損傷が少なく再利用可能である。水中に設置された高電圧棒電極とメッシュ状の接地電極の間に、事前に適当な大きさに砕いたコンクリート塊を置き繰り返しパルス高電圧を加えると、コンクリート内部で放電が生じて徐々に細かく砕けていく。放電が水を介してではなくコンクリート塊の中で生じるのは岩石内に含まれた微小空気層の存在に起因すると考えられている。

(2) 廃家電分離、貴金属回収

2001年から家電リサイクル法が施行されて以来、年間約60万トンに上る廃棄家電製品のリサイクルが見直されている。家電製品は都市鉱山と言われるほど、貴金属、ガラスなどリサイクルが可能な資源を多く有しており、特に多種類の材料がはんだ付けされた電子回路基板の分別はリサイクルの最も重要とされる処理の一つである。従来の機械的破壊処理では、金属等の回収率が低くほとんどは廃棄されているのが現状である。リサイクル率を高めるために分別能力の高い新しい技術が研究されており、その一つにパルスパワーを用いる方法がある[19]。水中に配置した棒電極とメッシュ電極間に対象物を配置しパルス高電圧を印加すると、電極間に放電が生じ衝撃波が発生する。この水中衝撃波によって対象物を破碎、分離する。対象物として音響インピーダンスの異なる材料が密着して存在する場合、界面で剪断応力が発生し材料ごとに分離される。貴金属を限定的に狙って回収する場合は、パルスアーク放電を用いてターゲット部分を基板等から溶融、剥離させる[20]。

5.5 バイオ応用

パルスパワーのバイオ応用として、パルス電界を用いた液体の低温殺菌が古くから研究されてきた。絶縁膜とみな

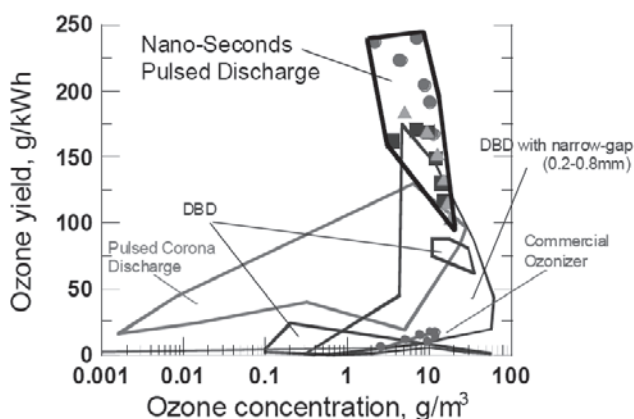


図4 各方式オゾナイザのオゾン濃度-収率特性[17].

せる細胞膜に電界が集中して膜が壊れることを利用したものである。細胞に代表される生体は複雑系であり、これを構成する多様な物質はそれぞれに機械的、電気的および化学的に固有の性質を有する。このため、パルスパワーで形成される高電界、強磁場、衝撃波、プラズマなどの極限環境はそれぞれに特異的な生体ストレスとなり、これがきっかけとなって様々な生体応答が誘導される。ここでは、バイオエレクトリクスと称して拡大しつつあるパルスパワーのバイオ応用分野の中から、最近の例を紹介する。

5.5.1 パルス高電界を用いた生体物理刺激

生体細胞は、細胞膜、核、ミトコンドリアなどのオルガネラ、核酸やタンパク質などの巨大生体分子、アミノ酸などの比較的小さい分子、水分子やイオンなどから成り、水素結合を主体する弱い結合が生体反応の重要な役割を担っている。これらが100 kV/mを超える強い電界にさらされると、誘電的なストレスによって、条件によっては部分的に壊れる。生体はこのストレスに対処すべく二次的生体活動を開始する。前出の細胞構成物は大きさ・形状、帯電状態、分子構造、移動度などが異なるため、外部からステップ電界を印加したときの過渡的反応はそれぞれ固有の時定数で緩和する。この誘電緩和のメカニズムは3つに大別される。第1は分子レベルの配向分極で、DNAやタンパク質などの巨大分子と小分子では緩和時間が異なる。特に巨大分子では分子全体のマクロな分極と分子内のミクロな分極があり複雑である。2番目は細胞膜が薄い誘電膜としてはたらくことに起因するもので、緩和時間は膜の充電時間に相当する。3番目は、配向分極で生じる電位変化を媒質中のイオンが覆い隠す、いわゆるデバイ遮蔽であり、媒質中での移動度が小さいため比較的ゆっくりとした現象である。外部電界を緩和時間程度で正負に振動させると、上述の現象はダイナミックに振る舞うと予想される。現行の研究は、膜充電に関わる現象を利用して細胞膜のストレスを利用するものが多い。DNAやタンパク質固有の誘電性を利用して選択的に刺激やストレスを与えることも原理的には可能であるが、これまでのところその効果が明示的に示された報告は見あたらない[21]。

5.5.2 医療応用

(1) パルス高電界を用いた癌治療

パルス高電界を用いて間接的に癌を治療する技術を紹介する。癌などの局所的な疾患に制癌剤を投与する場合、患部での吸収が遅いため薬剤は全身に回り、様々な副作用を引き起こす。薬剤を患部のみに作用させることができれば、薬剤投与量を減らすことができ副作用を軽減できる。薬剤を必要な箇所に限定して作用させる技術をドラッグデリバリーという。皮膚に近い部位に疾患がある場合はエレクトロポレーションをドラッグデリバリーとして利用できる。患部に電界をかけてエレクトロポレーションを施し同時に薬剤を注射すると、薬剤は即座に患部の細胞で吸収されて効果を発揮する。この治療法をエレクトロケモセラピー[22]といい、動物実験や臨床例が報告されている。さらに、ナノ秒パルス高電界を用いると組織深部の細胞も穿孔されることが三次元電界計算によって予測されており、

エレクトロケモセラピーの効果を増大すると考えられている。これは、スーパーエレクトロポレーションと呼ばれる[23]。

一方、ナノ秒パルス高電界で直接的にガンを不活化することも可能である。培養したガン細胞に適当な条件のパルス電界を印加するとアポトーシス（細胞のプログラム死）が誘導される。また、マウスの皮膚に移植したメラノーマ（黒色悪性種）が日数の経過とともに縮小し、数週間後に消滅したことが報告されている[24]。このように、パルス高電界は一部のガンに対して不活化効果を有することが確認されており、新しい癌治療装置として期待される。体の深部のガンに対して本方法を切開なしに使えるようにするためには、パルス電界を体内の患部に限定的に印加する装置技術の開発も必要である。

(2) 創傷治療

ナノ秒パルス高電界は出血を伴う外傷の治療にも効果がある。外傷の治療とは、すなわち血小板を活性化させ、生体本来の機能によって傷口をふさぐことである。血小板は、通常の血液中では滑らかな表面であるが、出血時には刺激物質により多数の長い突起を出し、金平糖のような形になる。同時に新たに細胞膜上に細胞接着因子が発現し凝集する。血小板は血管内皮に接着・凝集して傷口を塞ぎ、一次止血栓を形成する。その後、血小板から各種凝固因子が放出されて、血液中にあるフィブリンが凝固し、二次止血栓が形成され、止血が完了する。ナノ秒パルス高電界の印加はこの血小板を活性化させる作用があることがわかってきた。小胞体に蓄えられているカルシウムは血小板の活性に関わる作用物質であると考えられており、ナノ秒パルス高電界はこのカルシウムを放出させる作用がある[25]。

5.5.3 農業・食品応用

農業、食品分野の応用は文献[26]に詳しくまとめられている。ここでは一部を紹介しよう。この分野では、様々な場面で電磁エネルギー、特に電界が利用されてきた。品種改良では、電界を用いた細胞の融合、エレクトロポレーション（電気穿孔法）による物質導入などの技術が活用されている。発芽や育成では、担子菌（きのこ類）[26, 27]やシロイヌナズナ[28]での発芽や生育速度改善、またトマトやインゲン、レタスなどを用いた実験の報告もなされている。また、食品分野においては、パルスパワーが果物等の圧搾過程で利用されており、搾汁の増量[29]のみならずポリフェノールなどの有用成分抽出法[30]としても期待される。

(1) 担子菌（きのこ類）の収穫改善

原木（ホダ木）を菌床として用い、そこに腐生性きのこの原種菌を植菌（接菌）して、菌糸を菌床に成長させる栽培法を原木栽培と呼ぶ。原木栽培におけるパルス電圧刺激による収量増加の可能性について食用の腐生菌（シイタケ、ナメコ、クリタケ）を対象として詳しく調べられている[26, 27]。長さおよび直径がそれぞれ約1 m、約10 cmのホダ木に約100 kVの電圧を印加しその後の子実体の形成を調べると、明らかに電気刺激を施したホダ木から多く収穫される。また、電気刺激の強さには最適値が存在する

ことが示されている。図5の上方はパルス非印加、下方はパルスを印加したほだ木である。電気刺激に対するきのこの増産のメカニズムとして、1)イオンや電界による栄養菌糸への子実体形成刺激、2)菌糸の断裂に伴う多突起状菌糸の形成、3)ホダ木の繊維裁断や空孔の形成、4)雑菌の不活性化など子実体抑制要因の排除などが考えられている。パルス印加後のホダ木中の菌糸の電子顕微鏡画観察によるとパルスによって、菌糸が部分的に切断され、その部分から新たに多突起状菌糸が発生し子実体を形成している様子が示唆されている[31]。

(2) 植物からの有用成分抽出

果汁抽出効率の改善や、抽出時の成分の制御にもパルス電圧は利用可能である[29]。一例として、ぶどうワイン醸造過程におけるパルス電界をかけた場合のポリフェノール量の変化が調べられている[30]。ポリフェノール総量の測定にはFolin-Ciocalteu法を用い、760 nmにおける吸光度より、没食子酸相当量として算出している。パルス電圧発生には、6段のブルームラインが用いられ、パルス幅は約140 ns、約50 kV/cmのパルス電界が20 Hzで繰り返し印加されている。電界印加によってポリフェノールの抽出量が約20%増加した。図6に、電界60 kV時のコントロール区と実験区のブドウの皮の細胞内写真を示す。Control区に対し、実験区の細胞内は色素が外へ流出しているのが確認できる。メカニズムとしてはエレクトロポレーションが主である。

5.6 まとめ

パルスパワーの生物への応用が急速に広がっている。2000年以前のパルスパワー利用は、多くの人が想像するように、殺菌などのように微生物を殺すことに限られていた。2000年以降、物理刺激としての価値が見直されており、“おしりを叩く”ことによって生物を活性化できることが実験的に示されている。この世は生物であふれており、今後益々生物応用展開が面白くなりそうである。

参考文献

- [1] 三間関興編：高エネルギー密度プラズマ研究とその応用 プラズマ・核融合学会誌 75, Sup.II (1999).
- [2] M.A. Liberman, J.S. De Groot, A. Toor and R.B. Spielman, *Physics of High-Density Z-Pinch Plasmas* (Springer-Verlag, 1998).
- [3] D. Attwood, *Soft X-rays and Extreme Ultraviolet Radiation -Principles and Applications* (Cambridge University Press, 1999).
- [4] H. Suematsu, T. Kishi, J. Inoue, M. Hirai, T. Suzuki, T. Yunogami, W. Jiang and K. Yatsui, *Materials Let.* 61, 3635 (2007).
- [5] C. Buttapeng, W. Jiang, *39th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference*, 2008-3886 (2008).
- [6] D. Wang, S. Okada, T. Matsumoto, T. Namihira and H. Akiyama, *IEEE Plasma Sci.* 38, 2746 (2010).
- [7] H. Akiyama, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 28, 434 (2000).
- [8] S. Katsuki, H. Akiyama, A. Abou-Ghazala and K.H. Schoenbach, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insulat.* 9, 498



図5 電気刺激の有無によるシタケ生育の比較[*] (左：パルス非印加，右：60 kV印加)。

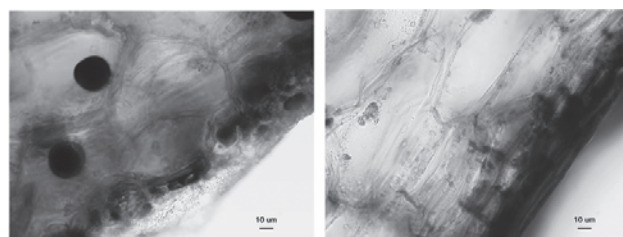


図6 パルス電界の印加の有無によるブドウの皮の細胞の光学顕微鏡画の比較 (左：パルス非印加，右：60 kV印加) [*]。

(2002).

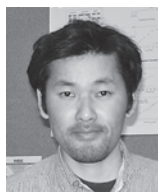
- [9] M. Sato, T. Tokutake, T. Ohshima and A.T. Sugiarto, *IEEE Trans. Industry Applications* 44, 1397 (2008).
- [10] 寺島和夫編：小特集「超臨界流体中プラズマの基礎と応用」プラズマ・核融合学会誌 86, 303 (2010).
- [11] 例えば、高山和喜編：撃波ハンドブック (Springer Tokyo, 1995).
- [12] 堀田栄喜：プラズマ・核融合学会誌 79, 245 (2002).
- [13] 勝木 淳，秋山秀典：応用物理 77, 375 (2008).
- [14] W. Jiang, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 38, 1325 (2010).
- [15] A. Mizuno, *Plasma Phys. Control. Fusion* 49, A1 (2007).
- [16] 葛本昌樹，田畑要一郎，吉沢憲治，八木重典：電気学会論文誌 A116, 121 (1996).
- [17] D. Wang, T. Matsumoto, T. Namihira and H. Akiyama, *J. Adv. Oxid. Technol.* 13, 71 (2010).
- [18] 浪平隆男，重石光弘，中島一行，村上 彰，黒木香里，喜屋武毅，友田祐一，佐久川貴志，勝木 淳，秋山秀典，大津政康：電気学会論文誌 A126, 197 (2006).
- [19] 中司 宏，廣岡達也，勝木 淳，秋山秀典：電気学会論文誌 A123, 531 (2003).
- [20] H. Akiyama, T. Nagashima, T. Namihira, Y. Kato, N. Shimomura, S. Katsuki and T. Hisazumi, *IEEE Trans. Fundamentals and Materials* 125, 1006 (2005).
- [21] 勝木 淳，矢野正彦，佐久川貴志，浪平隆男，S.H.R. Hosseini，矢野憲一，秋山秀典：静電気学会誌 33, 142 (2009).
- [22] M. Zemazar, *Electrochemotherapy, Electro-genetherapy and Transdermal Drug delivery* (Humana Press, 2000).
- [23] J.C. Weaver, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 28, 24 (2000).
- [24] R. Nuccitelli, U. Pliquet, N. Chen, W. Ford, R.J. Swanson, S.J. Beebe, J.F. Kolb and K.H. Schoenbach, *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 343, 351 (2006).
- [25] J. Zhang, P.F. Blackmore, B.Y. Hargrave, S. Xiao, S.J. Beebe and K.H. Schoenbach, *Archives of Biochemistry*

and Biophysics 471, 240 (2008).

- [26] 高木浩一：電気学会論文誌 A130, 963 (2010).
- [27] 塚本俊介, 前田貴昭, 池田元吉, 秋山秀典：プラズマ・核融合学会誌 79, 39 (2003).
- [28] C.J. Eingl, S. Bonnet, M. Pacher, H. Puchta and W. Frey, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insulat. 16, 1322 (2009).
- [29] M. Sack, C. Eing, R. Stangle, A. Wolf, G. Muler, J. Sigler

and L. Stukenbrock, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 16, 1329 (2009).

- [30] 畑山 仁, 小出章二, 小石 学, 伊藤 萌, 高木浩一：農業環境工学関連学会合同大会, 東京大学, J83 (2009).
- [31] 平川慎太郎, 塚本俊介, 秋山秀典：電気学会パルスパワー研究会資料, PPT-08-62, 27 (2008).



かつ き すなお
勝 木 淳

1991年熊本大学大学院修士課程修了。同大学工学部助手, 助教授を経て, 2007年から同大学バイオエレクトロニクス研究センター教授。博士(工学)。2000年に米国 Old Dominion 大学客員研究員。最近は, 水中高速放電現象, Z ピンチ放電プラズマの光源応用, バイオエレクトロニクス(パルスパワーによる動物細胞制御)に従事。プライベートでは壮年ソフトボールにハマっており, 全国制覇をめざしている(昨年5位)。



なみ ひら たか お
浪 平 隆 男

熊本大学バイオエレクトロニクス研究センター准教授。「ナノ秒パルス放電プラズマによる大気・水・土の浄化」および「その産業実用化」に関する研究に従事している。現在, 愛妻および2歳と5歳の愛娘に嫌われないよう, 肉体改良に奮闘中!



たか き こう いち
高 木 浩 一

1988年熊本大学大学院修士課程修了。大分工業高等専門学校助手および講師などを経て, 現在, 岩手大学工学部電気電子・情報システム工学科准教授。2000年10月~2001年9月マクマスター大学客員研究員。博士(工学)。高電圧, 放電, パルスパワー工学に関する研究(農業応用, 環境浄化, 加速器用スイッチング電源, 材料表面処理など)に従事。趣味は登山。