

講座

パルスパワー技術入門

Introduction of Pulsed Power Technology

1. はじめに

江 偉 華

長岡技術科学大学極限エネルギー密度工学研究センター

(原稿受付：2010年11月16日)

パルスパワー技術は、比較的新しい電気工学分野として、これまでに核融合関連研究で育ち、高出力レーザーや高エネルギー粒子ビームの発生に貢献し、最近材料と環境などの分野で応用を展開している。

パルスパワー技術は、基本的に電磁エネルギーの操作に関する学問である。この操作によって、限られたエネルギーを用いて、独特な状態や現象を創り出すことができ、ほかの技術で得られない臨界条件に達することができる。このため、パルスパワー技術は、先端科学技術研究の手段として重要な地位を占め、今後エネルギー利用の高度化とともに一般産業にも普及していくと考えられる。

本講座は、パルスパワーの発生と応用に関する基礎的知識についてわかりやすく解説することを目的としている。対象読者を初めてパルスパワーのことについて学ぶ学生や関連分野の初心者と想定しているため、最も基本的な内容からスタートし、ステップバイステップで進んでいく。さらに誰でも実践できるような簡単なパルス発生回路例を用いてその作り方について説明し、理解を深める。最後にパルスパワー技術の応用について最新の開発現状について紹介する。

本講座の構成は次のとおりである。

1. はじめに (江 偉華 (長岡技科大))

2. パルスパワー技術の歴史とその仕組み
(江 偉華 (長岡技科大))

パルスパワー技術の発展歴史と基本動作原理について解説する。電磁エネルギーの蓄積およびその時間幅の圧縮と成形について詳しく述べるとともに代表的なスイッチングデバイスについて紹介する。

3. パワー半導体デバイスの役割
(江 偉華 (長岡技科大), 高木浩一 (岩手大))

パルスパワーの発生におけるパワー半導体デバイスの重要性とその使い方について説明する。近年急速に発展してきたパワー半導体デバイスの中から代表的なもの (IGBT, MOSFET, Thyristor 等) について解説し、それぞれの駆動方法と多直並列使用の場合の回路方式について説明する。

4. パルスパワー発生回路の設計と実践
(高木浩一 (岩手大), 佐久川貴志 (熊本大), 上野崇寿 (大分高専), 秋山雅裕 (熊本大))

“一家に一台パルスパワー装置を!” を目標に、パルスパワー発生回路の設計原理を説明し、簡単な回路の設計、組立、動作評価過程について説明する。パルス化、昇圧・圧縮、制御に分け、実物写真や実測波形も用いてステップバイステップで解説する。

5. パルスパワー技術の応用
(勝木 淳 (熊本大), 浪平隆男 (熊本大), 高木浩一 (岩手大))

さまざまな分野におけるパルスパワー技術の応用例を紹介する。最近特に注目される環境分野 (排ガス処理, 廃液処理とオゾン生成), 医療分野 (細胞操作, がん治療と滅菌), および生物分野 (植物刺激による成長過程の促進や抑制) について、技術概要と開発現状をまとめて説明する。

6. おわりに (勝木 淳 (熊本大))

様々な応用をめざして開発されたパルスパワー発生装置は広いパラメーター空間をカバーしているが、すべて同じ基本原理に基づいている。最近、主要素子と関連部品の進化によって、小型パルスパワー発生器は比較的作りやすくなってきた。本講座はこの点に留意して説明している。本講座を通じて、自分でも小型パルスパワー発生器を作っ

みたいと考えてほしい。そしてこの作る過程を通じてパルスパワーの考え方についてさらに理解し、動作原理をマスターすることを期待している。

一方、広いパラメーター空間に対応するパルスパワーコンポーネントは大きく変化する。例えば、スイッチングデバイスとして、高電圧・大電流に対応できるものには気体ギャップスイッチがあり、高繰り返し動作に対応できるも

のには半導体スイッチがある。パルスパワー発生器の設計は、コンポーネントの許容限界に強く依存し、コンポーネントの特徴を最大限に発揮することを常に目標としている。したがって、今後コンポーネント関連技術の発展によってパルスパワー発生器の設計手法と出力特性はさらに進化し、より広範囲な応用が可能となることを期待している。



2. パルスパワー技術の歴史とその仕組み

江 偉 華

長岡技術科学大学極限エネルギー密度工学研究センター

(原稿受付：2010年11月16日)

パルスパワーの発生は、エネルギーの蓄積と圧縮によって実現される。本章では、パルスパワー技術の進化歴史について簡単に触れた後に、その基本的な動作原理を解説する。電磁エネルギーの観点から、容量性と誘導性エネルギーの蓄積方法およびパルス圧縮と成形プロセスについて説明し、制御素子としてのスイッチについて述べる。

Keywords:

pulsed power, electromagnetic energy, high voltage, plasma, discharge, particle beam

2.1 パルスパワーとは

一定のエネルギーを短時間に使うことによって、比較的大きな瞬間出力を得ることができる。これは昔から機械的エネルギーとして、ハンマーや弓矢などの形で利用されてきた。

同じ原理に基づき、電磁エネルギーの時間幅を圧縮して得られたものをパルスパワーと言う。電磁エネルギーは、ほかのエネルギー形態（機械エネルギーや化学エネルギーなど）に比べて、比較的操作しやすい特徴を持っている。電磁エネルギーを蓄積し、更にこれを一定の時間幅に圧縮することによって必要な出力パワーレベルに達して放出させる技術をパルスパワー技術（あるいはパルス電磁エネルギー技術）という。

エネルギーは、パワーと時間の積である。同じエネルギーでも、時間幅が変われば、パワーも変化する（図1）。したがって、時間幅を十分短縮できれば、応用対象に要求されるパワーに達することができる。一方、エネルギーを入手するときにパワーの制限があるため、一定の時間をかけて必要なエネルギーを蓄積しなければならない。例えば、カメラのフラッシュランプを光らせるエネルギー源は小さいバッテリーである。バッテリーから取り出したエネルギーを一瞬の間使うことによって、バッテリーの出力を何桁も上回る光パワーを得ることができる。

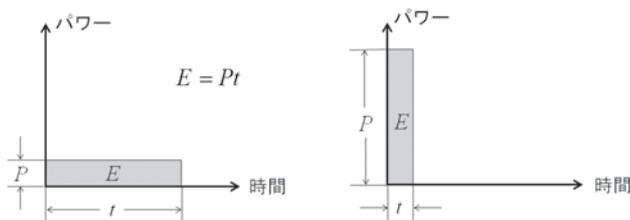


図1 パルスパワーの基本的考え方。

パルスパワー技術は、20世紀後半から急速に発展してきた。今日までに電気工学における重要な分野に成長し、一般製品から特殊研究装置まで幅広く応用されるようになってきている。今後、エネルギーの高度利用とともに、パルスパワーの世界はさらに広がると予想される。

2.2 パルスパワー技術の進化

20世紀前半から、X線の発生や気体放電のためにコンデンサーの高速放電によるパルスパワーの発生は研究・応用されていた。しかし、本当の意味のパルスパワー技術発展は、第2次世界大戦以後のことである。これまでの主な技術的進展を以下のように大きく分けることができる。

■コンデンサー放電

いまでも広く採用されている最も簡単、安価な方法として、充電されたコンデンサーから放電スイッチを経て負荷へ出力する。複数のコンデンサーからの同時放電で大きな出力電流を得ることができる。初期の大電流Zピンチ研究は、このように多数のコンデンサーからの並列放電を用いていた[1]。

一方、動作電圧が非常に高くなると、コンデンサーに対する単純な直流充電は非現実となる。この場合、並列充電されたコンデンサーを直列で放電する Marx 回路方式が広く用いられた。

■パルス成形線路の普及

コンデンサーからの直接放電より、一定のインピーダンスを持つパルス成形線路からの放電のほうが比較的安定な出力を持ち、非常に短いパルス幅を得ることが認識された。このため、蓄積コンデンサーと負荷の間に、中間蓄積素子としてパルス成形線路を用い、さらにその媒質として純水を採用することでエネルギー密度とインピーダンス特性を向上した[2]。

パルス成形線路の導入により、出力パルス幅が短縮さ

れ、ピークパワーを桁的に向上することができた。その後、"Marx 発生器+パルス成形線路"という技術路線は広く採用され、世界各地で種々のパルスパワーマシンが作られた。これらの装置は、電子ビームとイオンビームの加速、ZピンチやXピンチ、大電力マイクロ波またはX線発生など様々の研究の最前線で長年活躍してきた[3]。

■誘導電圧重畳および多モジュール化

構造設計および絶縁防止上の制限により、パルスパワー発生装置の単機出力限界値は数TW程度とされている。一方、核融合関連および高エネルギー密度物理関連の研究は更に大きな出力パワーを求めていた。このため、複数装置の出力に対する電圧重畳またはパワー合成が行われた。

誘導法を用いた電圧重畳では、複数のパルスパワー発生装置の出力を磁性体コアを用いて誘導的に合成する。この場合、各装置の出力電圧を伝搬電磁波の形で重畳し、比較的高い出力電圧パルスを得ることができる[4]。また、このような電圧重畳を荷電粒子ビームを加速する形で実現することもできる[5]。

パワー合成では、複数装置の出力端を直並列接続することによって共通の負荷へ出力する。この方法を用いて、100TWを超えるパルスパワー発生装置が建設された[6]。

電圧重畳とパワー合成の共通特徴は、パルスパワー発生装置のモジュール化である。これによって、パルスパワー発生装置の技術的バリアと製造コストを大幅に下げることができた。

■小型化と高繰り返し化

1980年代後半から、パルスパワー技術の新しい技術動向が注目され始めた。これは、半導体スイッチングおよび磁気パルス圧縮技術で支えられた全固体、高繰り返しパルスパワー発生器の開発である。従来の大型パルスパワー発生装置と技術路線が異なり、安定性、信頼性および寿命が重要視された[7]。

代表的な応用はエキシマレーザー励起用パルス電源である[8]。パルス発生技術の革新は、kHz級エキシマレーザーの出現とその製品化に対して大きく貢献した。これによって定着された高繰り返しパルスパワー技術の応用は、その後も材料、環境、医療などの分野へ急速に展開されている[9]。

これと同時に、半導体パワーデバイスのスイッチング限界に挑む技術開発は、加速器用パルス電源の実用化によって推進された[10]。

小型化、高繰り返しパルスパワー技術は、今後も研究開発が進められ、産業応用に広く役立つように期待されている。

2.3 パルスパワーの発生原理

パルスパワーの発生は、エネルギーの蓄積から始まる。必要なエネルギーをコンデンサーやインダクターに蓄積し、その後適切なスイッチング制御によって必要な時間幅圧縮およびパルス成形を行うことはパルスパワー発生器の基本的仕組みである。

2.3.1 エネルギーの蓄積

典型的な電磁エネルギー蓄積素子は、コンデンサーとイ

ンダクターである。

コンデンサーに電圧をかけて電荷を持たせると、エネルギーを与えることになる。コンデンサーの蓄積エネルギーは

$$W_C = \frac{1}{2}CV^2 \quad (1)$$

で表され、ここで C と V はそれぞれコンデンサーの静電容量と充電電圧である。実際は、コンデンサー内部において絶縁された電極間に電界が形成し、この電界がエネルギー保持の担手である。電界のエネルギー密度は

$$w_E = \frac{1}{2}\epsilon E^2 \quad (2)$$

で与えられ、ここで ϵ と E はそれぞれ媒質の誘電率と電界強度である。これは容量性エネルギーと呼ばれ、エネルギー密度は電界強度と誘電率に依存する。

コンデンサーの蓄積エネルギーは、主に強電界による絶縁破壊によって制限される。したがって、絶縁耐圧が高く、漏れ電流が低いことはエネルギー蓄積に有利である。

一方、インダクターに電流を流して磁束を持たせると、エネルギーを与えることになる。インダクターの蓄積エネルギーは

$$W_L = \frac{1}{2}LI^2 \quad (3)$$

で表され、ここで L と I はそれぞれインダクタンスと電流である。実際は、インダクター内部において導体の周囲に磁界が形成し、この磁界がエネルギー保持の担手である。磁界のエネルギー密度は

$$w_H = \frac{1}{2}\mu H^2 \quad (4)$$

で与えられ、ここで μ と H はそれぞれ媒質の透磁率と磁界強度である。これは誘導性エネルギーと呼ばれ、エネルギー密度は磁界強度と透磁率に依存する。

インダクターの蓄積エネルギーは、主に強磁界による応力破壊によって制限される。したがって、応力強度が高く、抵抗率が低いことはエネルギー蓄積に有利である。

誘導性エネルギー蓄積は、エネルギー密度限界値が容量性エネルギーに比べて2桁程度高いと言われているが、導体のオーム損失によって短時間のエネルギー保持に限定される。また、蓄積エネルギーの放出に開放スイッチが必要であるため、実際の応用は比較的少ない。

2.3.2 パルスの圧縮と成形

コンデンサーに蓄積された容量性エネルギーは、図2(a)に示すように、スイッチ S を閉じることによって負荷 R に放出することができる。コンデンサーの初期($t=0$)充電電圧が V_0 の場合、 R への出力パワーは

$$P_R = \frac{V_0^2}{R} \exp\left(-\frac{2t}{RC}\right) \quad (5)$$

で与えられ、 RC に比例する時間定数で減衰する特性を持

つ。したがって、 C が一定の場合、 R の値が小さいほうが出力ピークパワーが高く、時間幅が短い。

また、インダクターに蓄積された誘導性エネルギーは、**図 2 (b)**に示すように、スイッチ S を開くことによって負荷 R に放出することができる。インダクターの初期電流が I_0 の場合、 R への出力パワーは

$$P_R = I_0^2 R \exp\left(-\frac{2Rt}{L}\right) \quad (6)$$

で与えられ、 L/R に比例する時間定数で減衰する特性を持つ。したがって、 L が一定の場合、 R の値が大きいほうが出力ピークパワーが高く、時間幅が短い。

一方、分布定数として、静電容量とインダクタンスを両方もつ回路素子がある。**図 3**に示すものはその例である。これらはパルスパワーの生成に使用される場合、パルス成形線路と呼ばれる。

パルス成形線路の単位長さあたりの静電容量とインダクタンスをそれぞれ C と L とすると、

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (7)$$

で与えられたものはそれぞれ特性インピーダンスと転送速度と呼ばれる。

図 4 (a)のように、長さ l のパルス成形線路の導体間に電圧 V を印加すれば、容量性エネルギーが蓄積される。スイッチ S を急に閉じると、負荷 R への出力が始まる。エネルギーが線路に沿って運ばれる情報は転送速度 v で上流へ伝わり (**図 4 (b)**)、終端において反射する。ここで、 $Z=R$ の場合、反射する瞬間までの出力エネルギーはちょうど初期蓄積エネルギーの半分である。即ち、 $2l/v$ の時間ですべてのエネルギーは出力される。理論的に出力電圧は $V_0/2$ と一定である。

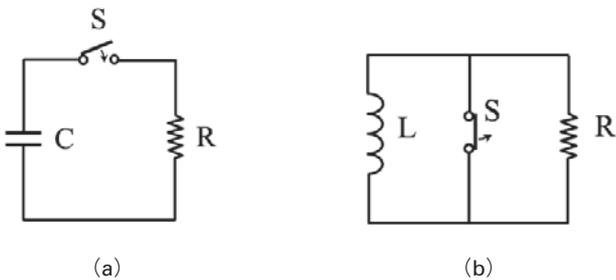


図 2 (a)容量性エネルギーと(b)誘導性エネルギーを抵抗負荷へ出力する理想的な回路。

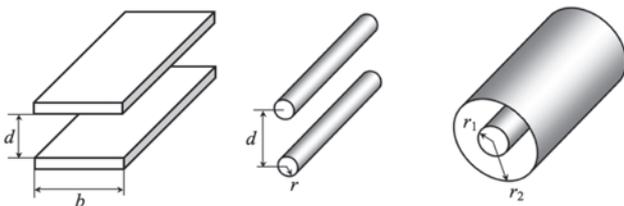


図 3 典型的なパルス成形線路。

パルス成形線路は誘導性エネルギー蓄積素子として使用することもできる。**図 5 (a)**のように、長さ l のパルス成形線路の導体に電流を流せば、誘導性エネルギーが蓄積される。スイッチ S を急に開くと、負荷 R への出力が始まる。エネルギーが線路に沿って運ばれる情報は転送速度 v で上流へ伝わり (**図 5 (b)**)、終端において反射する。ここで、 $Z=R$ の場合、反射する瞬間までの出力エネルギーはちょうど初期蓄積エネルギーの半分である。即ち、 $2l/v$ の時間ですべてのエネルギーは出力される。理論的に出力電流は

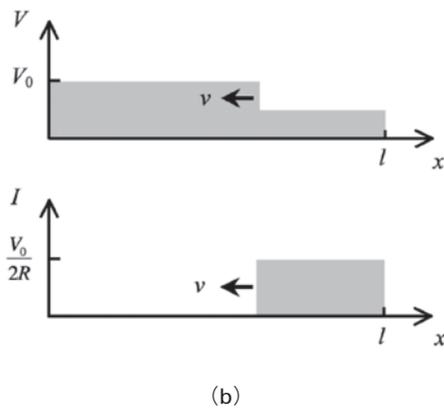
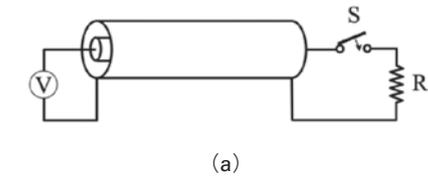


図 4 (a)パルス成形線路の容量性エネルギーを抵抗負荷へ出力する回路、および(b)出力過程を示す概念図。

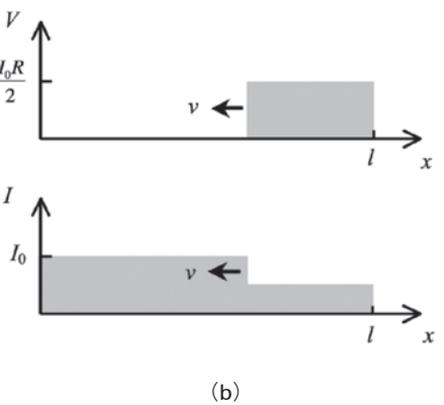
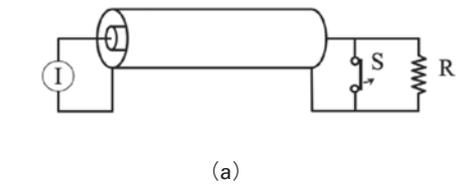


図 5 (a)パルス成形線路の誘導性エネルギーを抵抗負荷へ出力する回路、および(b)出力過程を示す概念図。

$I_0/2$ と一定である。

パルス成形線路の特徴は出力の時間幅が短く、出力パワーが比較的安定（式(5)と(6)のような指数減衰ではないこと）である。一方、これらの特性を得るために、インピーダンス整合（即ち $Z=R$ ）の条件を満たす必要がある。この観点で見れば、単純なコンデンサーと単純なインダクターをそれぞれ $Z \ll R$ と $Z \gg R$ のパルス成形線路と考えることができる。

2.3.3 典型的なスイッチング素子

ここまでの話では、スイッチを理想的なものと考えていた。即ち、任意の指定時刻において完全な導通状態と完全な絶縁状態間の瞬時切り替えができ、ほかの要素（ C 、 L 、 R など）を一切持たないものである。

実際のものとは当然違う。どのスイッチでも、オフ状態では漏れ電流があり、オン状態では導通抵抗がある。また、浮遊容量とインダクタンスは必ず存在する。これらの値は通常非常に小さいが、高電圧と大電流の場合無視できないときがある。

(a) ギャップスイッチ

昔から広く使用されてきたものは、ギャップスイッチである。気体（あるいは液体）における急速な絶縁破壊を利用して、絶縁状態から導通状態へのスイッチングを行う。図6(a)に示すように、電極間に気体を充填し、一定の電圧まで絶縁状態を保つことができる。一方、絶縁破壊電圧を超えると、気体中に放電チャンネルが形成して電極間を短絡する。このような放電チャンネルの電気抵抗は低く、電流容量が大きいので、スイッチのオン状態として利用される。例えば、図2(a)の回路において、ギャップスイッチを使用した場合、絶縁破壊電圧を C の予定充電電圧に一致するように（ギャップ長や気圧を変えて）設定すればよい。また、制御性を上げるために、図6(b)のような外部トリガー方式を採用することも多い。この場合、絶縁破壊電圧を動作電圧より適切に高く設定して、トリガー電極付近の火花を用いて主電極間の放電を積極的に誘起する。

ギャップスイッチの主な特徴は高電圧、大電流、および安価性である。一方、寿命とメンテナンスの面では比較的劣っている。さらにターンオフできないことと絶縁回復が比較的遅いことなどによって、最近の産業用パルスパワー発生器ではあまり採用されていない。

(b) 磁気スイッチ

磁気スイッチは磁性体の磁束飽和過程における透磁率の変化を利用している。したがって、磁気スイッチのオンオフ切り替えは、インダクタンスの変化であり、従来のスイッチのような抵抗値変化ではない。このため、磁気スイッチはパルス充電の場合のみ使用可能である。

図7(a)に示す磁気特性を持つ磁性体コアに対して、図7(b)のような巻線を巻き、両端に電圧を印加することを考える。図7(a)の a 点からスタートすると、正の方向に電流が流れようとするが、大きなインダクタンスが現れているため、短時間に電流はほとんど上昇しなく、印加電圧によってコア内の磁束が増えるだけとなる（オフ状態）。一方、磁束が飽和点 b に達すると、コアのインダクタン

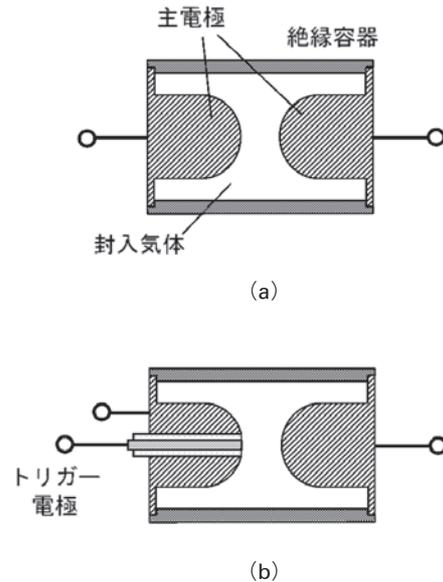


図6 (a)自爆型と(b)外部トリガー型ギャップスイッチの例。

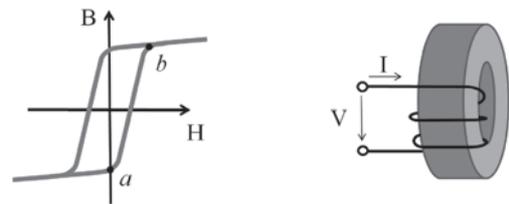


図7 (a)磁性体の磁気特性および(b)磁気スイッチの模式図。

スが急激に低下し、端子間電圧の低下とともに電流が急速に上昇する（オン状態）。即ち、磁気スイッチは、外部の印加電圧 V に対して一定の時間 (Δt) 内において電流を阻止することができる。その後急に導通状態に変身する。ここで、 V と Δt の積はコアの形状および磁性体の磁気特性によって与えられる。

$$V\Delta t = nS\Delta B \quad (8)$$

ここで、 n は巻き数、 S はコアの断面積、 ΔB は飽和までの磁束密度変化である。例えば、図2(a)のスイッチとして磁気スイッチを使用する場合、充電中に非飽和状態、充電完了時に飽和するようにコアの断面積と巻き数を決めればよい。勿論この場合、 C の充電は直流充電ではないことを前提とする。

なお、磁気スイッチは1回の動作が終わった後に、元の状態（図7(a)の a 点）に戻さなければ次の動作ができない。これはリセットと呼ばれ、通常別の回路を用いて逆の磁場を印加して行われる。

(c) 半導体スイッチ

近年、パワー半導体の進歩とともに、パルスパワー発生器における半導体スイッチの普及は急速に進んでいる。半導体スイッチは、固体内の導電キャリアの密度を制御することによって電気伝導性をコントロールするものであり、理想的なパワー制御素子である。しかし、現在市販されて

いる半導体スイッチング素子の許容動作電圧と動作電流は比較的lowく、大型パルスパワー装置だけでなく、小さいパルスパワー発生器にも単体ではほとんど対応できない現状である。実際に複数スイッチング素子の組み合わせを使用する機会が多い。この時、電圧・電流分担およびタイミング同期などを保障する回路上の工夫が必要である。

半導体スイッチを用いたパルスパワー発生について、次章で詳細に解説する。

2.4 将来への展望

これからのパルスパワー技術は、大型化と実用化に向かって、それぞれの方向へ更に分かれていく。二つの技術路線は共に同じ電磁気的原理に基づくが、システム設計思想および主要コンポーネントが顕著に異なり、めざす目標もまったく違うものである。

パルスパワー発生装置の高出力化は、先進国を中心に、エネルギー、宇宙、基礎物理学、軍事研究等の要求に応える形でさらに推進される。モジュール化の傾向は一層定着し、電圧重畳およびパワー合成における問題解決は技術開発の重点となる。コストと寿命の観点でモジュール単位は若干縮小されるが、膨大なモジュール数で高出力をめざしていく。

一方、パルスパワー発生器の実用化研究では、より機能性と生産性を追求する。素子固体化の努力はさらに徹底され、高繰り返しと短パルスは重要な指標となる。さらに、安定性、コンパクトさ、寿命、メンテナンス性、効率等の性能が改善され、これまで以上に産業界と一般生活に実用が浸透していく。

参考文献

- [1] D.C. Hagerman and J.W. Mather, *Nature* **181**, 226 (1958).
- [2] J.C. Martin, *Proc. IEEE* **80**, 934 (1992).
- [3] T.H. Martin, *Proc. 2nd IEEE International Pulsed Power Conference*, Lubbock, TX, USA, (1979) p. 3.
- [4] J.J. Ramirez, K.R. Prestwich, J.A. Alexander, J.P. Corley, G.J. Denison, C.W. Huddle, D.L. Johnson, R.C. Pate, G.J. Weber, E.L. Burgess, R.A. Hamil, J.W. Poukey, T.W. L. Sanford, L. O'Seamons, G.A. Zawadzka, I.D. Smith, P.W. Spence and L.G. Schlitt, *Proc. 7th International Conference on High-Power Particle Beams*, Karlsruhe, Germany, (1988) p. 148.
- [5] C. Ekdahl, *IEEE Transactions on Plasma Science* **30**, 254 (2002).
- [6] B.N. Turman, T.H. Martin, E.L. Neau, D.R. Humphreys, D.D. Bloomquist, D.L. Cook, S.A. Goldstein, L.X. Schneider, D.H. McDaniel, J.M. Wilson, R.A. Hamil, G.W. Barr and J.P. VanDevender, *Proc. 5th IEEE International Pulsed Power Conference*, Arlington, VA, USA, (1985) p. 155.
- [7] W. Jiang, K. Yatsui, K. Takayama, M. Akemoto, E. Nakamura, N. Shimizu, A. Tokuchi, S. Rukin, V. Tarasenko and A. Panchenko, *Proc. IEEE* **92**, 1180 (2004).
- [8] K. Ogawa, M. Sasago, M. Endo and T. Ishihara, *J. J. Appl. Phys.* **27**, 1521 (1988).
- [9] H. Akiyama, T. Sakugawa, T. Namihira, K. Takaki, Y. Minamitani and N. Shimomura, *IEEE Trans. Dielectrics Electrical Insulation* **14**, 1051 (2007).
- [10] K. Takayama, Y. Arakida, T. Dixit, T. Iwashita, T. Kono, E. Nakamura, K. Otsuka, Y. Shimosaki, K. Torikai and M. Wake, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 054801 (2007).



3. パワー半導体デバイスの役割

江 偉華, 高木浩一¹⁾

長岡技術科学大学 極限エネルギー密度工学研究センター, ¹⁾岩手大学 工学部電気電子・情報システム工学科

(原稿受付: 2010年12月27日)

パワー半導体デバイスは、パルスパワー発生器のスイッチング素子として用いられている。本章では、広く使用されている半導体スイッチについて、基本構造から使用方法まで解説するとともに、パルスパワー応用における特徴と問題点について述べる。また、具体例を用いて半導体スイッチング回路の構成と動作特性について説明する。

Keywords:

pulsed power, power semiconductor device, thyristor, IGBT, MOSFET

3.1 典型的なパルスパワー発生用パワー半導体デバイス

パワー半導体デバイスは、比較的大電力のスイッチング素子として、電力変換やモーター制御などの目的で広く使われてきた。近年、これらのデバイスはパルスパワーの発生にも使用されるようになった。その背景には主に二つの要素がある。一つはパワー半導体デバイスの大電力化、もう一つはパルスパワー発生器の産業応用に伴う小型化と高繰り返し化である[1]。

パワー半導体デバイスは様々な種類があるが、パルスパワー発生用の目的で最も広く使用されたものはサイリスタ、IGBT、および MOSFET である。図1はこれらのデバイスの相対的特性比較を示す。各種デバイスは異なる特徴を持ち、それぞれの限界もある。例えばサイリスタは比較的大電力のスイッチング能力を有するが、動作可能な繰り返し周波数が比較的低い。また、MOSFETは高速素子として有名であるが、スイッチング可能なパワー制限が比較的厳しい。したがって、パルスパワー発生器に搭載するデバイス

の種類は動作パラメーターに大きく依存する。

スイッチング素子として使用されるパワー半導体デバイスの共通の動作原理は導電性キャリアの制御である。即ち、導通状態を形成するためには大量なキャリアを注入し、絶縁状態を得るためにはキャリアを引き出して空乏層を作ることである。以下では、このような基本的な観点に基づいて、典型的なパワー半導体デバイスについて簡単に解説する。

3.1.1 サイリスタ

サイリスタは、図2に示すような pnpn 半導体構造を持っている。この場合、どの方向に電圧を印加しても、電流経路上に逆方向の pn ジャンクションが存在するため電流が流れない。例えば、アノード (+) とカソード (-) に電圧を印加すると、ジャンクション J_2 が逆バイアスされ、その付近における空乏層の形成によって電流が阻止される。一方、この時ゲート電極に正の電圧を印加すると、順バイアスされたジャンクション J_3 を通ってカソード側の n 型層から大量の電子が注入され、その結果 J_2 の空乏領域

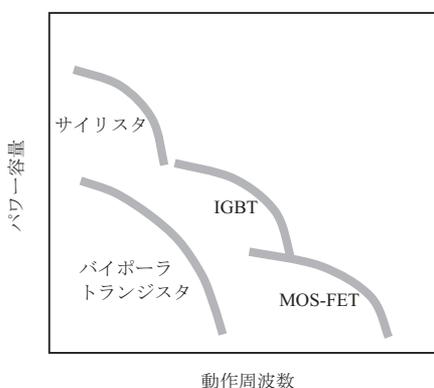


図1 半導体デバイス動作特性の相対的比較。

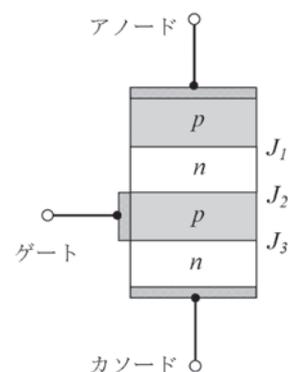


図2 サイリスタの構造を表す概念図。

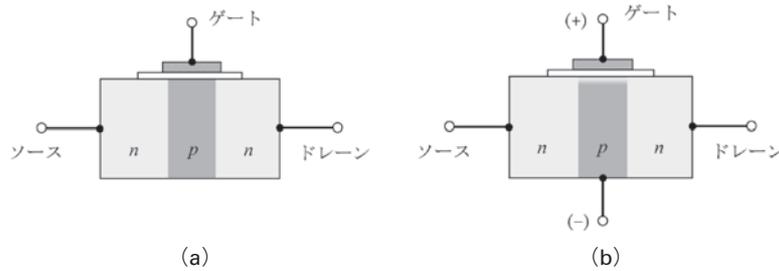


図3 MOSFETの動作原理を示す模式図。(a)オフ状態、(b)オン状態。

が消滅することによってデバイスが導通状態になる。

サイリスタは比較的大きな電流を伝導できる特徴を持つが、伝導中の電流に対するゲート操作だけの遮断は比較的困難である。また、構造上の制限により、電流の立ち上がり時間は比較的長い。

3.1.2 MOSFET

MOSFETはMetal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistorの略であり、電界効果トランジスタの一種である。例えば図3のようなnpn構造について考えた場合、ドレインとソースの電極間に逆方向のpnジャンクションが存在するため非導通状態となる。しかし、ゲート電極に正の電圧を印加すると、電界の作用によりp型層において少数キャリアの電子を電極に近い領域に引き寄せ、局所的に電子の多数キャリア領域（等価n型域）を作ることができる。この状態では、ドレイン—ソース間にn型半導体によってつなげられ、電子による導電性を得ることができる。したがって、MOSFETはユニポーラ（1種類のキャリアを用いる）デバイスである。

実際のパワーMOSFETデバイスは図4(a)に近い構造を持つ。絶縁状態のデバイス耐圧および導通状態の抵抗値について工夫されているが、ユニポーラの本質的な特性により、これらの両方を同時に改善することが困難である。一方、MOSFETの最大な特徴は高速スイッチングにある。

3.1.3 IGBT

IGBTはInsulated Gate Bipolar Transistor（絶縁ゲートバイポーラトランジスタ）の略である。図4(b)に示すように、パワーMOSFETに比べて、基板側にp型層が増えている。その結果、コレクタから隣接のn型層にホールが注入され、導通抵抗が低減する。したがって、IGBTはバイポーラ（2種類のキャリアを用いる）デバイスであり、これによってMOSFETに比べて比較的大きな伝導電流と低い導通抵抗を得ることができる。一方、同じ理由によりスイッチング（特にターンオフ）速度が低下する。

3.1.4 半導体開放スイッチ (SOS)

半導体開放スイッチ (Semiconductor Opening Switch, SOS) は、上述3種類のデバイスと違って、パルスパワー発生用に開発されたデバイスである[2]。SOSは特殊なダイオードであり、通常のダイオードとの違いは逆電圧に対する応答特性にある。

ダイオードに対して順方向電流が流れた直後に逆電圧を印加すると、残留キャリアの影響によりわずかな逆電流が流れてしまう。通常のダイオード製品は、メーカーによる様々な工夫によって逆電流を最小限に押さえられている。一方SOSは、逆電流を意図的に許すように設計されている。

図5に示すように、SOSに順方向電流が流れた直後に半導体にキャリアが多数残る。この時に逆電圧を印加すると、残留キャリアによる伝導電流が発生する。しかし、新たなキャリア注入がないため、残留キャリアが引き出しと再結合によって消滅した後に空乏層が形成してデバイスは絶縁状態に変わる。SOSは、この導通状態から絶縁状態への切替が非常に短い時間（数ナノ秒から数十ナノ秒程度）に実現できるため、開放スイッチとして利用される。

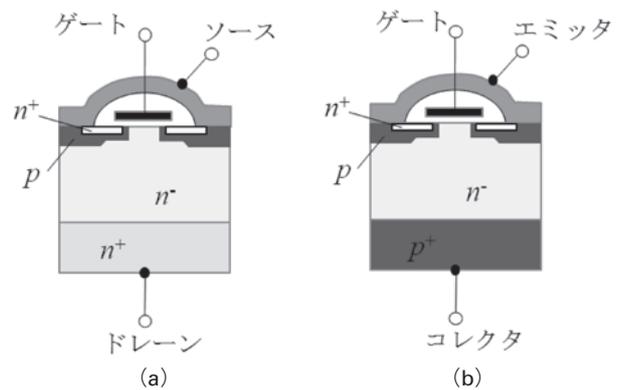


図4 (a)MOSFETと(b)IGBTの構造比較。

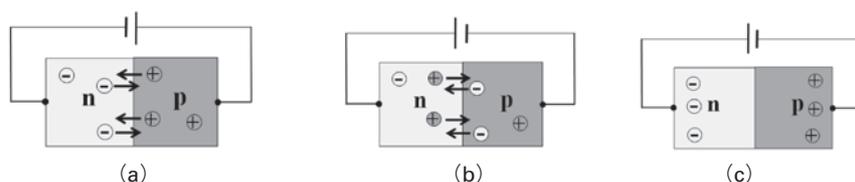


図5 SOSダイオードの動的モデル。(a)順方向伝導状態、(b)残留キャリアによる短時間の逆方向伝導状態、(c)逆方向阻止状態。

3.2 半導体スイッチの特徴と限界

従来のパルスパワー発生用スイッチング素子（放電型ギャップスイッチ）に比べて、パワー半導体デバイスは非常に魅力的である。以下はこの比較の観点から半導体スイッチングデバイスの特徴について述べる。

1) 安定性と信頼性：気体放電を利用するギャップスイッチでは、放電現象自身の統計的特性によりスイッチング動作の再現性に限界が生じる。また、放電によって発生する電極表面における物理的変化も再現性と寿命に影響する。一方、固体素子としての半導体スイッチは、動作の再現性と安定性が非常に良い。また、基本的にメンテナンスの必要がなく、定格範囲内の動作寿命は非常に長い。これらの特性は、波形に対して精度を要求し、長時間の高繰り返し運転を必要とする応用に対しては非常に重要である。

2) 制御性：放電型スイッチをトリガーするには通常局所放電を用いる。このために数kVから数十kV程度の電圧パルスを必要とする。これに比べて、半導体スイッチのゲート電圧は通常数Vから数十V程度である。このため、制御方法と制御回路の多様性をもたらすことができ、実際は光通信あるいはマイコン制御などが広く用いられている。

3) 高繰り返し性：スイッチの回復時間（次の動作の準備を完了するまでの時間）は最高繰り返し率に影響する。例えば、ギャップスイッチの場合、気体の絶縁能力が完全回復するまで待つ必要がある。これは通常ミリ秒程度の時間であるため、ギャップスイッチのkHz以上の繰り返し動作は非常に難しくなる。一方、半導体スイッチの場合では、このような制限がなく、原理的に直後から次のスイッチング動作が可能である。現実にはMHzの繰り返し率で連続動作するパルスパワー発生器は実用されている[3]。

4) ターンオフ：放電スイッチは気体の絶縁破壊を利用して急速ターンオンしている。しかし、その後放電を止めることができないため、回路からの放電が完了するまで電流が流れ続ける。一方、半導体スイッチではゲート制御によってターンオフできるものもある。この特性を用いれば、パルス幅および波形に対する制御の自由度が大幅に増える。

ここまではパワー半導体デバイスの長所だけに注目して述べた。当然のことであるが、半導体スイッチは以下の問題点を含むいくつかの短所もある。

1) パワー容量：オフの時の耐電圧とオンの時の伝導電流について、ギャップスイッチのほうが半導体スイッチをはるかに上回る（実際、ギャップスイッチの低電圧と低電流動作は比較的苦手である）。これまでに大電力をめざしてパワー半導体デバイスの大型化はある程度進んできたが、このスケールアップには明らかに限界がある。チップの大きさは製造工程やハンドリングによって制限され、耐圧能力はスイッチング速度とオン抵抗等の特性との複雑な兼ね合いで決められている。このため、デバイス単体のスイッチング能力に対して桁的な向上は期待できない。この弱点は多素子を用いた回路技術で補うしかない。

2) ノイズ対策：パワー半導体デバイスの長所として比較的制御電圧が低いことについて述べたが、実際これはデ

バイスの動作がノイズの影響を受けやすいという短所が存在することも意味する。高電圧と大電流を伴うパルスパワー発生器の周りでは、常に一定の電磁ノイズを発生する。これが数Vで動作するゲート回路に対して影響を与えないことは、回路の正常動作にとって不可欠である。逆に言えば、このノイズ対策ができなければパワー半導体デバイスをスイッチとして用いることができない。パルスパワー制御回路における光ファイバやフォトカプラの使用は、高圧絶縁の目的だけでなく、ノイズ対策の配慮によるものもある。

3) 温度制御：スイッチング損失と導通時のオン抵抗はデバイスの温度上昇をもたらす。高繰り返しをめぐすパワー半導体デバイスの連続動作繰り返し率はこの温度上昇によって制限される。デバイス外部からの強制冷却は非常に効果的であるが、最終的にパッケージの伝熱速度と半導体の許容温度によって素子の単位時間あたり発熱量の限界が決まる。このため、特別設計のパッケージあるいは高い許容温度を持つ半導体はより過酷な動作環境に適用できる。

3.3 半導体スイッチの使い方

パワー半導体デバイスの制御方法はデバイスの種類によって多少異なるが、以下では主にMOSFETについて詳細に述べる。

3.3.1 単体スイッチング動作

簡単な回路を用いてMOSFETのスイッチング動作を確認することができる。例えば、表1にある部品を用いて図6に示す回路を作成する。予め充電された $C=0.1\mu\text{F}$ のコンデンサから $R=50\Omega$ の抵抗負荷へのパルス放電を行うために、MOSFETのオン/オフ制御を行う。MOSFETの駆動にはドライバICを使用し、ドライバICの入力信号転送には光ファイバを使用する。また、受信用光モジュールとドライバICの駆動電力の供給には絶縁型DC-DCコンバーターを用いている。このようにして、MOSFETのゲート回路を完全に周り絶縁し、その結果ノイズを受けにくくなり、必要な場合（例えば多直列の場合）高浮遊電位でも動作可能となる。図6の点線で囲まれる回路の実物を図7に示す。

図8に典型的な試験動作波形を示す。制御用パルス発生器から、波高値約5V、パルス幅約200nsの方形波パルスを発生する。これを光モジュールで光信号に変換してファイバに入力する。ファイバの出力端において再び光モジュールを用いて電気信号に戻してからドライバICに入力する。ドライバICの出力信号に従ってMOSFETが導通

表1

素子	メーカー	型番
MOSFET	Toshiba	2SK2611
ドライバIC	Maxim	MAX4429
送信用光モジュール	Avago Technologies	HFBR-2412TZ
受信用光モジュール	Avago Technologies	HFBR-1414TZ
DC-DCコンバーター(12V/5V)	Mornsun	B1205S
DC-DCコンバーター(12V/12V)	Mornsun	H1212S

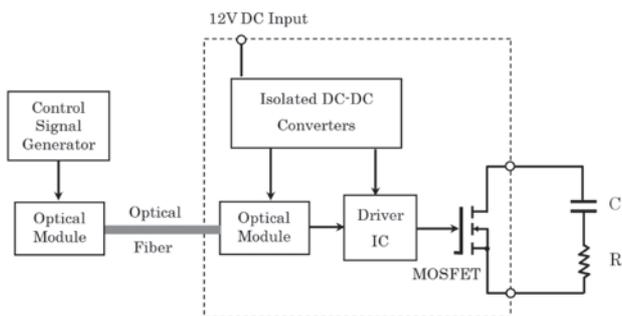


図6 MOSFET 単体動作試験回路.

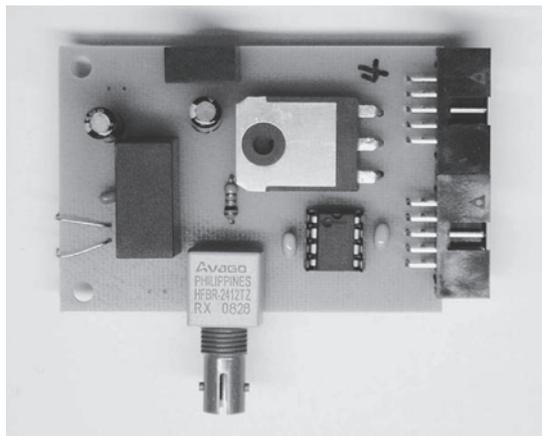


図7 図6の点線で囲まれる回路基板の写真.

して、負荷抵抗の両端に電圧が発生する。この場合、MOSFET 電流は約 10 A で、立ち上りと立ち下り時間はそれぞれ約 25 ns と約 40 ns である。

3.3.2 多素子スイッチング回路

図8の負荷電圧波形は比較的きれいに見えるが、この時の出力パワーはわずか 5 kW 程度である。通常のパルスパワー応用はこれを数桁上回る値を必要とする。このため、半導体デバイスをスイッチとして使用する場合、多数のデバイスを同時に用いる必要がある。以下はその一例について紹介する。

ギャップスイッチを用いた従来型パルスパワー発生器回路には Marx 方式がある。これは、出力電圧を上げるために、予め並列充電された多数のコンデンサを直列して放電する考えに基づいている。この方法を MOSFET を用いたパルスパワー発生器にも適用することができる[4]。

図9はMOSFETを用いたMarx発生器回路を示す。電圧 V_0 で並列充電された n 個 (図9では $n = 4$) のコンデンサに対して、 n 個のMOSFETを同時にターンオンすることによって、負荷に対して直列放電回路を形成する。この場合、負荷への印加電圧は理論上 nV_0 となる。

図7に示すスイッチングユニットを16個使って図9の回路を構成した。回路全体の実物写真を図10に示す。充電電圧 900 V の場合、16個のMOSFETを同時にスイッチングしたときに得られた負荷 (1 kΩ) 電圧波形を図11に示す。多数のスイッチの同時使用による出力電圧の増倍が得られている。

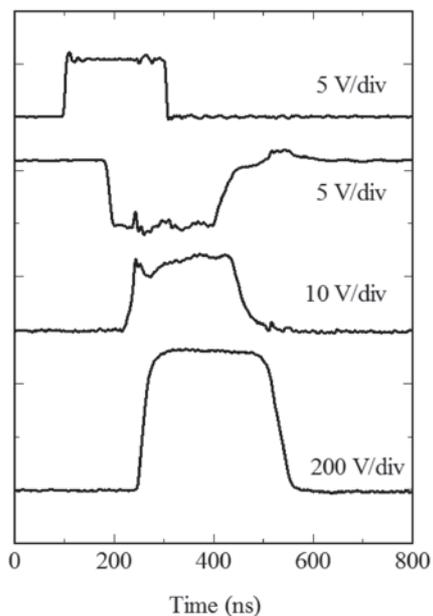


図8 典型的な動作波形。上から：光変換前の制御信号，ドライバ IC の入力波形，MOSFET ゲート電圧および負荷電圧波形。

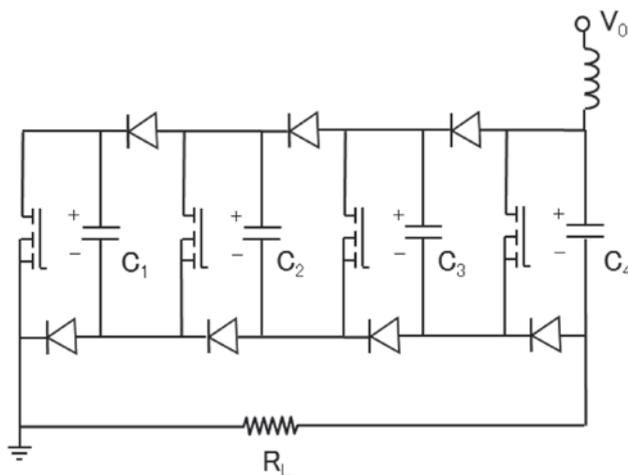


図9 Marx 発生器回路原理図.

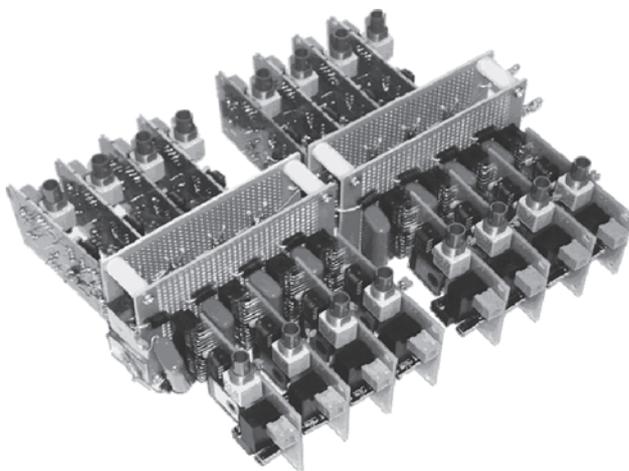


図10 MOSFET を用いた16段 Marx 発生器.

3.3.3 半導体開放スイッチ駆動回路

SOSは比較的特殊な動作原理に基づくパワー半導体デバイスであるため、上述の方法と全く異なる制御方式で駆動しなければならない。3.1.4で述べたように、SOSの急速電流遮断は逆電流に対して起こる現象である。また、このために素子の内部に予め事前キャリアを注入しておく必要がある。即ち、SOSに対して、まず適切な順方向電流を流し、その直後に逆電流を流せば急速な遮断が期待できる。

このような観点に基づいて、SOSの駆動回路は設計されている。図12に示す回路はその一例である[5]。ここで、可飽和トランスを利用して、順方向と逆方向の電流制御を行っている。スイッチSを閉じた後、 C_1 の放電電流はトランスを経て二次側コンデンサ C_2 を充電すると同時にSOSに順方向電流を流す。このエネルギー移行がほぼ完了した時点で、トランスの磁性体が飽和し、 C_2 の二次側回路における放電が開始する。即ち、トランスの飽和によって、エネルギーは一次側に戻らない。一方、 C_2 の放電はSOSダイオードに逆方向電流を流し、これが短時間に流れた後にSOSによって急速に遮断される。その結果、二次側回路インダクタンスに蓄積された誘導性エネルギー（前回講義参照）が高電圧パルスとして負荷に出力される。

図13はSOSで得られた電流波形を示す。 $t=0$ より前の順方向電流はキャリアを注入するためのものであり、この直後の逆方向電流はキャリアを引き出すと同時に二次側回路に誘導性エネルギーを蓄積する。その結果、逆方向電流がSOSによって急速に遮断される時に、並列接続されている $R=500\Omega$ の負荷抵抗に対してパルス電圧を出力する（図14）。 C_1 充電電圧1.6 kVの場合、SOSの逆方向電流は約160 Aに達し、出力電圧のパルス幅約30 ns、ピーク値約

27 kVである。

3.4 まとめと展望

パワー半導体デバイスは、様々なパルスパワー発生回路のスイッチング素子として活躍している。本章ではMOSFETとSOSを中心に典型的な使い方について述べたが、ほかにIGBTとサイリスタなどのデバイスも実際のレーザー電源や排気・廃液処理用パルス電源等で広く実用されている[6]。

パワー半導体デバイスをスイッチとして使用する場合、安定性と繰り返し性の面で優れているが、電圧・電流容量制限が大きな妨げとなる。このため、半導体スイッチを活用するための回路技術は常に重要な意味を持つ。デバイスの性能を最大限に取り出しながらノイズで誤動作しないような制御回路、および複数のデバイスを同時に用いながら同期と保護を充分工夫されているスイッチング回路の設計と実装は今後も研究開発が続けられる。

一方、パワー半導体デバイスそのものも進化している。最近特に注目されるものは炭化ケイ素（SiC）半導体に基づくデバイスである[7]。従来のシリコンデバイスに比べて、耐圧、速度、伝熱性などの特性が優れ、次世代パワー

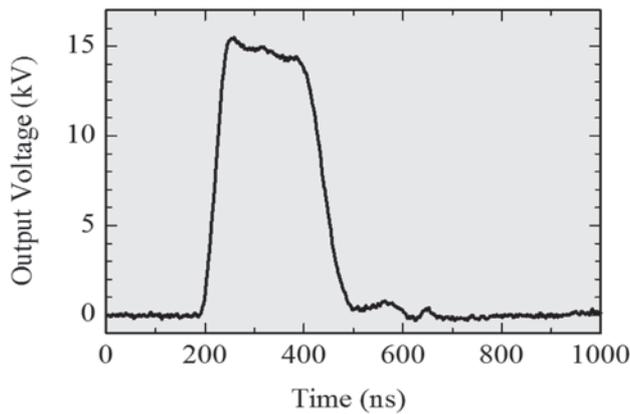


図11 図10の回路を用いて、充電電圧900 Vの場合に得られた出力電圧波形。

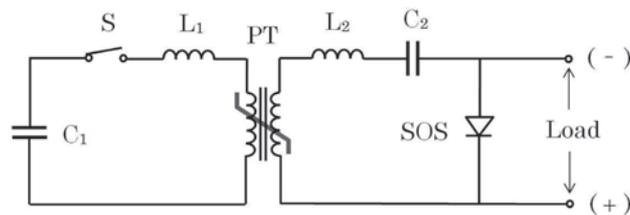


図12 SOSを用いたパルス高電圧発生回路の一例。

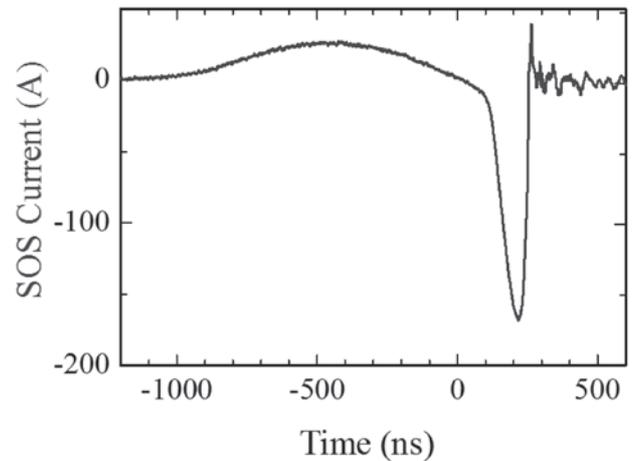


図13 図12の回路を用いて得られたSOS電流波形。

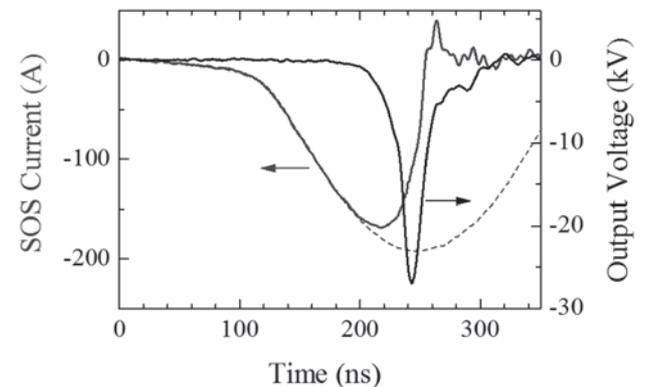


図14 SOS電流波形と負荷抵抗500Ωの両端で得られた出力電圧。図中の点線はSOSをショートしたときの回路電流を示す。

デバイスとして期待されている。近年 SiC スイッチングデバイスを市場から購入できるようになり、コスト的にはまだ割高であるが、今後の普及とともにより手に入りやすくなることは確実である。

半導体デバイスのスイッチングは、内部キャリアの制御によって行う。本章では、これを電氣的に実現する方法について説明した。一方、半導体内部のキャリア密度を光学的に制御する方法もある。適切な波長を持つ光で半導体を照射すればキャリアが生成し、この光を止めれば再結合等によってキャリアが消滅する。この原理に基づく光伝導スイッチは、今後のパルスパワー発生における応用が期待されている[8]。最近の研究では光源としてレーザーを使用しているが、実用化の段階でフォトダイオードを使用できるようになれば汎用性が大幅に向上する。

参考文献

- [1] W. Jiang, K. Yatsui, K. Takayama, M. Akemoto, E. Nakamura, N. Shimizu, A. Tokuchi, S. Rukin, V. Tarasenko and A. Panchenko, *Proceedings of the IEEE* **92**, 1180 (2004).
- [2] S.N. Rukin, *Instrum. Exp. Tech.* **42**, 439 (1999).
- [3] K. Takayama, Y. Arakida, T. Dixit, T. Iwashita, T. Kono, E. Nakamura, K. Otsuka, Y. Shimosaki, K. Torikai and M. Wake, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 054801 (2007).
- [4] W. Jiang, W. Diao and X. Wang, *Proc. 17th Int'l Pulsed Power Conf.*, 2009, Washington DC, 408 (2009).
- [5] 江 偉華：電気学会論文誌 **A130**, 538 (2010).
- [6] H. Akiyama, T. Sakugawa, T. Namihira, K. Takaki, Y. Minamitani and N. Shimomura, *IEEE Trans. Dielectrics Elec. Insulation* **14**, 1051 (2007).
- [7] 江 偉華, 成田一真：月刊マテリアルインテグレーション **23**, 16 (2010).
- [8] G.M. Loubriel, F.J. Zutavern, A.G. Baca, H.P. Hjalmarson, T.A. Plut, W.D. Helgeson, M.W. O'Malley, M.H. Ruebush and D.J. Brown, *IEEE Trans. Plasma Sci.* **25**, 124 (1997).



4. パルスパワー発生回路の設計と実践

高木浩一, 高橋克幸¹⁾, 上野崇寿²⁾, 秋山雅裕³⁾, 佐久川貴志³⁾
 岩手大学, ¹⁾シシド静電気株, ²⁾大分工業高等専門学校, ³⁾熊本大学

(原稿受付: 2011年1月27日)

パルスパワーは、軍事や慣性核融合を目的に、世界中の発電電力規模の、大型な装置技術として発達してきた[1-4]。このため、世に広く普及とまではいかず、限られた施設や研究グループのみで扱われてきた。しかし“ちょっとした”パルスパワー（ちょいパル？）が使えると便利なことも多い。水処理、殺菌、ナノパウダー、オゾン生成、きのこ増産、イオンドープ、食品保存、バイオ応用、医療応用など多くの場面で活用できる[1-8]。また園児・児童・生徒を相手にしたサイエンス教室でも、100円かみなり、脱色やプラズマのデモなどに使用できる[8-12]。ここでは、学術を少し離れ、簡単に、安価なパルスパワー発生回路を作ることに比重をおく。想定は、4.1, 4.4節は理系コースの高校生（物理履修）が、4.2, 4.3節は電気系大学生が作ることになる。ここで取り扱う回路は、電圧が数kV～数十kV（数万ボルト）で、製造コストはお菓子の買える価格帯（100円程度）から高級家電（数十万）になる。

Keywords:

pulsed power, high-voltage, power device, plasma, magnetic compression, semiconductor switch, FPGA

4.1 直流高電圧の発生とパルス化

家庭のコンセントにきている電気は、交流100ボルト（AC100V）である。周波数は、西日本で60ヘルツ（Hz）、東日本で50Hzである。これから数万ボルトのパルス電圧を作り出す場合、1)電圧の大きさを増やす（昇圧）、2)電圧の形をパルスに変える（パルス化）が基本になる[2,4]。ここでは、変圧器（トランス）、整流素子（ダイオード）、蓄電素子（コンデンサ）、半導体やギャップなどのスイッチを用いた、直流高電圧の発生と、パルス電圧の発生について述べる。

4.1.1 家庭用コンセントから直流高電圧の発生

家庭コンセントの電気はAC100Vである。したがって、例えば10kV（1万ボルト）を作る場合、100倍に増幅することが必要になる。このように電圧を増幅する（昇圧）する際に用いられる手法に、1)トランスを用いる、2)ダイオードとコンデンサを多段に接続する方法（コッククロフト・ウォルトン回路）がある[2]。ここでは、それらの具体例とその動作について述べる。

(1) ネオントランスを用いた直流高電圧の発生

図1に、トランスを用いてAC100Vから直流電圧を得る、基本的な回路構成と動作を示す。入力となるAC100Vは、図に示すように、三角関数の正弦波の形式（ $100\sqrt{2}\sin(2\pi ft + \theta)$; f は周波数[Hz], t は時間[秒], θ は初期位相）となっており、最大（ピーク）値は141.4（ $=100\sqrt{2}$ ）[V]、東日本の周波数50Hzを用いると、周期は20ms(0.02秒)である[13]。トランスは、図2に示すよう

に、鉄心と呼ばれる口の形をした鉄板（けい素鋼板）を重ねたものに複数のコイルを巻きつけた結合インダクタで、磁束をつくる電流が小さく、また漏れる磁束がほとんどなく、電圧や電流の大きさを変える際によく用いられる。2つのコイルをもつ変圧器の場合、1次側と2次側の巻数を n_1, n_2 とし、1次側と2次側の交流電圧 V_1, V_2 、交流電流 I_1, I_2 とすると、上記した特徴は次のような簡単な関係式で表すことができる[14]。

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{I_1}{I_2} \quad (1)$$

したがって、一次側の入力を100Vとすると、巻き数比（ $=n_2/n_1$ ）を10とすると1kVが、100とすると10kVが、計算上は得られる。現実には、二次側の電流による影響や絶縁設計上の制限などがあり、通常のトランスで巻き数比を大きくしようとすると、電源が体積・重量ともに大型となる。このため、ネオントランス（磁気漏れ変圧器）などがよく用いられる。これは、磁束の漏れ部の回路を設けることで、二次側の出力の負荷変動を回避するもので、入手が容易なものは、入力100Vに対して出力が15kVのものがある。

交流から直流への変換は、電圧の正負の一方向のみ取り出す整流回路と、脈動を抑えて直流に近づける平滑回路で構成される。整流回路は、大きくは、図1に示す一方向の電圧を取り出し、逆方向をカットする半波整流回路と、逆方向の電圧も、電圧の向きを変えて出力する全波整流回路

4. Design and Practice of Pulsed Power Circuit

TAKAKI Koichi, TAKAHASHI Katsuyuki, UENO Takatoshi, AKIYAMA Masahiro and SAKUGAWA Takashi

corresponding author's e-mail: takaki@iwate-u.ac.jp

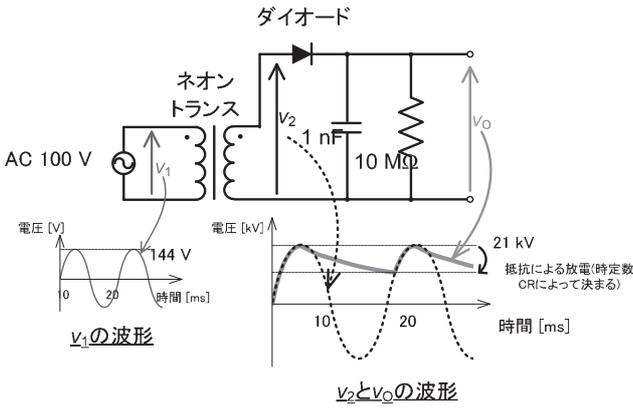


図1 ネオントランス（変圧器）を用いて AC100V から直流高電圧を得るための基本回路と動作。（ v_1 ：ネオントランス一次側電圧， v_2 ：二次側電圧， v_0 ：平滑回路の出力電圧）

になる。整流にはダイオードが用いられ、高電圧用のダイオードは、オリジン電気株式会社 (<http://www.origin.co.jp/>) などで販売されている。平滑回路には、コンデンサと抵抗が用いられる。高耐圧のコンデンサは村田製作所 (<http://www.murata.co.jp/index.html>) 等で入手できる。ただし、数kV～数十kVの高耐圧で、安価に入手できるものはセラミックスコンデンサとなり、比較的低容量（2nF程度）になる。このため平滑に必要な抵抗は、商用周波数50Hzの場合、10MΩ程度（ $T < RC$ ； T ：周期， R ：抵抗値， C ：容量）と大きな値となる。

図3に、構成の一例として、定格15kVの巻線型ネオントランス（長野愛知電機株式会社，ネオン変圧器15）を用いた直

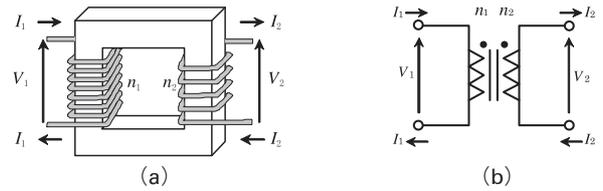


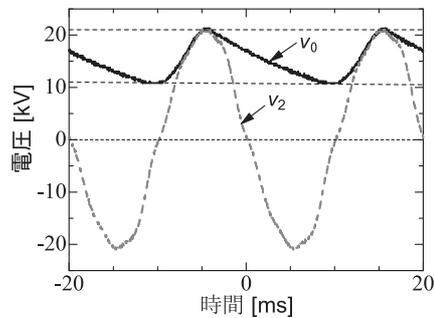
図2 変圧器の基本構成と回路図

流高電圧発生回路の写真と、その出力を示す。回路図は、図1に示している。入力を100Vとした場合、ネオントランスの二次側の出力は15kVとなる。このため、ピーク電圧は約21kV（ $= 15\sqrt{2}$ ）となる。この電圧は、1nFのコンデンサと、10MΩの抵抗で平滑化される。しかしながら、周期が20msと長いこともあり、時定数RCで、21kVから、約11kVまで減衰している。ダイオードには、前述のオリジン電気製（型番：ED-24H1）を用いている。

(2) 100V 直流電源とインバータネオントランスを用いた高電圧発生

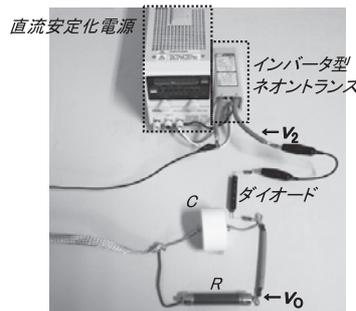
スイッチング素子を組み込んで交流を作り（インバータ）、さらに共振トランスで昇圧するものを、インバータトランスと呼び、蛍光灯など照明器でよく利用されている。市販もされているため、容易に入手できる。出力電圧は、9kVが一般的だが、15kVまで販売されている (<http://www.lecip.co.jp/lecip/product/product12-01.htm>)。このトランスは、巻線型ネオントランスに比べて小型で、コンパクトな電源作成に適する。巻線型ネオントランスを、インバータネオントランスで置き換えて使うことも可能である。しかし、100Vの定電圧電源（例えば

(a) 写真

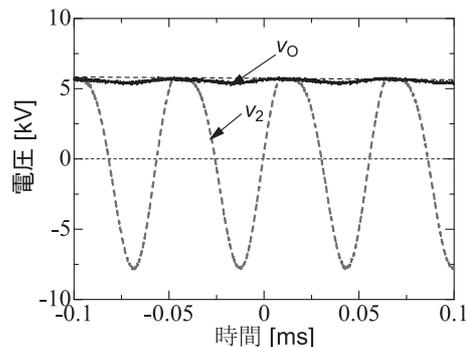


(b) 各部の波形

図3 ネオントランスを用いた直流高電圧発生回路と出力波形（ v_2 ：ネオントランス二次側電圧， v_0 ：平滑回路の出力電圧）。



(a) 写真



(b) 各部の波形

図4 インバータネオントランスを用いた直流高電圧回路と出力波形（ v_2 ：トランス二次側電圧， v_0 ：平滑回路の出力電圧）。

matsusada.co.jp/dcps/pl/) を用いることで、インバータの周波数の 20 kHz で電圧を取り出せる。この結果、時定数は通常のネオントランスの 1/400 程度になる。一例として、**図 4** に、100 V 直流安定化電源（型番：TEXIO Co., PA120-06B）とインバータネオントランス（型番：レシップ株, Alpha Neon M-5）、前述のダイオードとコンデンサで構成した直流高電圧発生回路と出力の様子を示す。写真より、巻線型電源に対して小型になっていることがわかる。加えて、**図 3** の波形に対して出力電圧の変動が小さいこともわかる。

(3) コッククロフト・ウォルトン回路

コッククロフト-ウォルトン (Cockcroft-Walton) 回路は、コンデンサとダイオードを多段式に組み合わせたもので、低電圧の交流電源を高電圧の直流電源へ変換できる。二段のものは、倍整流回路とも呼ばれる [2]。一例として、前述のインバータネオントランスとセラミックコンデンサを 4 段使用したものを、**図 5** に示す。またその出力を **図 6** に示す。条件として、段数を変えており、段数が増えると出力電圧が上がる様子などが確認できる。インバータネオントランスの出力は 20 kHz だが、入力商用周波数の 50 Hz となっており、このため電圧の上昇に、多少の時間を要する。一次側に、直流安定化電源を用いることで、出力電圧の調整や出力までに要する時間の低減などが可能である。

4.1.2 直流高電圧からパルス高電圧の発生

前節では、コンセントの電気 AC100 V から、例えば 10 kV（1 万ボルト）などの直流高電圧を得る手法について述べた。パルス高電圧は、基本的には直流高電圧を、大

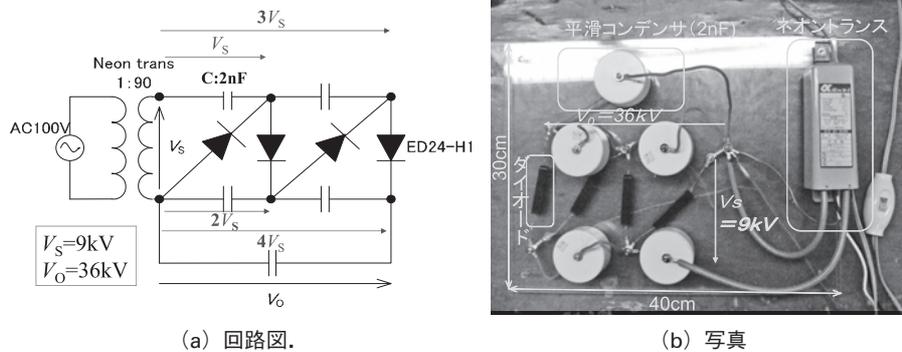
電力スイッチを用いてパルス化すれば得られる。このように直流電圧をパルス化する手法に、1) コンデンサと短絡スイッチで正弦（三角）波を得る、2) 同軸ケーブルなどの分布定数線路で方形波（ナノ秒オーダ）を得る、3) コンデンサとコイルを多段接続して方形波（マイクロ秒オーダ）を得るなどがある。ここでは、それらの具体例とその動作について述べる。

(1) コンデンサと短絡スイッチによるパルス発生（集中定数回路）

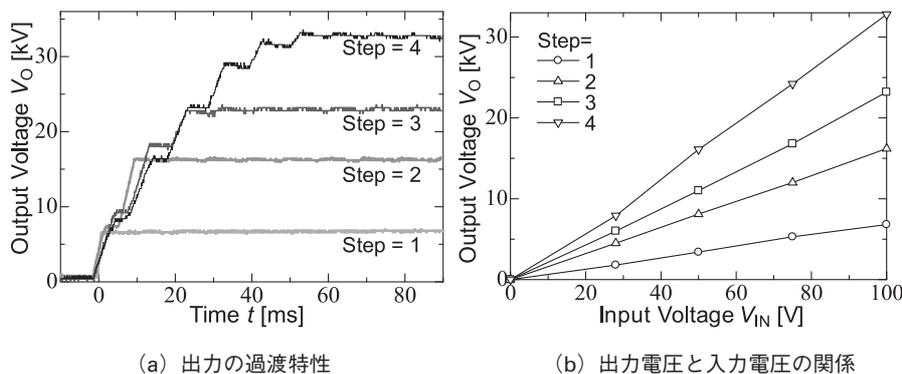
直流高電圧を利用してパルスを発生する方法は、コンデンサ等のエネルギー蓄積素子に蓄えられたものを、短時間かつ高電圧駆動のスイッチで取り出すのが一般的である。スイッチには、半導体などの電力素子 (MOS-FET; Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, IGBT; Insulated Gate Bipolar Transistor) を使う方法や [15]、簡便なギャップスイッチなどが用いられる。典型的な回路構成を **図 7 (a)** に、また出力電圧の模式図を示す。短絡スイッチの動作前の充電電圧を V_0 として、 $R^2 - 4\frac{L}{C} > 0$ （負荷のインピーダンスが回路のインピーダンスに対して十分大きい）とした場合、出力電圧 v_0 は、以下の式となる [2]。

$$v_0(t) = V_C (e^{-\frac{t}{CR}} - e^{-\frac{R}{L}t}) \tag{2}$$

一例として、もっとも簡単に、安価にパルスを作り出す方法として、ギャップスイッチを短絡スイッチとして構成したものを、**図 8 (a)** に示す。ギャップスイッチは、気体等のギャップの媒体の絶縁降伏（インピーダンスが非常に大きな状態；数百 MΩ から短絡へ近い状態；ミリ Ω オーダへ



(a) 回路図. (b) 写真
図 5 4 段で構成したコッククロフト・ウォルトン回路.



(a) 出力の過渡特性 (b) 出力電圧と入力電圧の関係
図 6 段数を 1 から 4 まで変化させたコッククロフト・ウォルトン回路の出力特性.

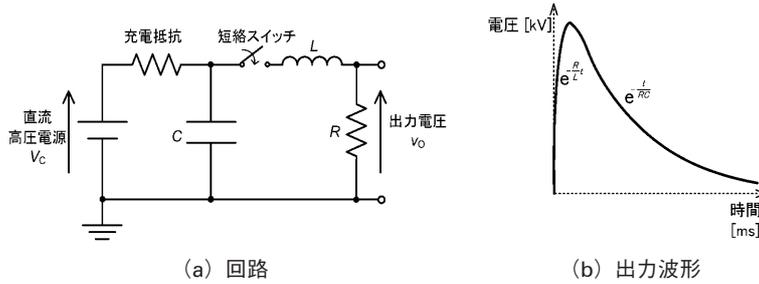


図7 クロージングスイッチを用いた正弦（三角）波の発生回路。

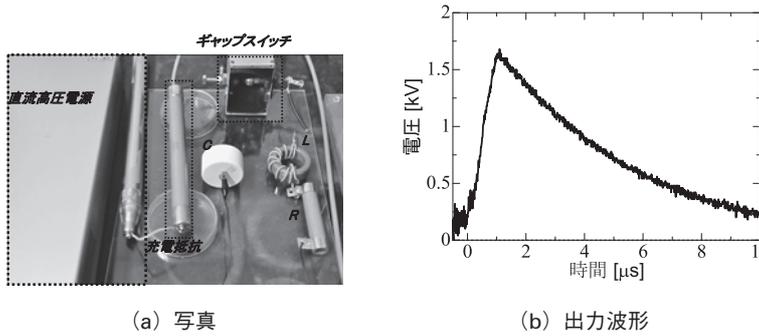


図8 ギャップスイッチを用いた正弦（三角）波の発生回路とその出力。

短時間に变化する現象)を利用する。写真のギャップスイッチは、ネジ等で電極間の距離（ギャップ長）を変えることで動作電圧を変えている。例えば、大気中で動作させた場合、おおよそギャップ長1mmあたり3kVとなる。したがって、出力電圧を15kVに設定したい場合、ギャップ長を5mm付近に設定し、あとは出力電圧をモニターしながら微調整を行う。実用上は、ギャップスイッチだと動作が安定しないことなどもあり、大電力用の半導体スイッチを用いる。半導体スイッチの耐圧は、キロボルトオーダー、それほど大きくないこともあり、通常は、次節で述べるパルストランスやブルームライン回路を用いて昇圧して用いることが多い。図8の回路の出力波形の一例を図8(b)に示す。

(2) 同軸ケーブルを用いたパルス発生（分布定数線路）

同軸ケーブルなど分布定数線路（回路寸法が電圧や電流の周期に対して短い回路）を用いることで、方形波などのパルス波形を形成できる。基本的な考え方は、すでにこの講座の1回目に記載されている[16]。ここでは、考え方について簡単に触れたのち、安価に購入できる同軸ケーブルを用いたパルス電源の構成例を紹介する。

図9に代表的な伝送線路である同軸線路を示す。円筒形の内部導体と外部導体からなり、その間には誘電体が存在する。したがって伝送線路は同図に示すように、はしご型等価回路の分布定数回路で表すことができる。無損失の場合、その一端に進入した電圧パルス波（あるいは電流パルス波）は、減衰することもひずむこともなくその波形形状を保ったまま伝搬して、他端に到達する。

分布定数線路において、その特性を与える代表的な要素が特性インピーダンスと、伝搬速度vである。特性インピーダンスは、伝送線路の形状と伝送線路に詰められた媒質によって定まり、伝搬速度は、媒質の誘電率と透磁率を

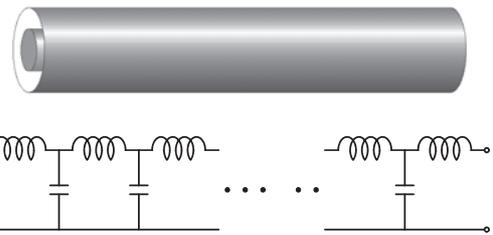


図9 同軸線路とその等価回路。

それぞれεとμとするとき、

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_s\mu_s}} \tag{3}$$

で与えられる[2]。ここで、cは光速(=3×10⁸ m/s)、ε_sとμ_sはそれぞれ媒質の比誘電率と比透磁率である。長さlの同軸ケーブルの一端から取り出されるパルス幅Tは、前進波と後退波のパルス幅の和、

$$T = 2\frac{l}{v} = 2l\sqrt{\epsilon\mu} = \frac{2l}{c}\sqrt{\epsilon_s\mu_s} \tag{4}$$

となる。同軸ケーブルの媒質によるが、おおよその値として、ケーブル1mあたりパルス幅10ns(RG-58Uでの計算値)となる[17]。

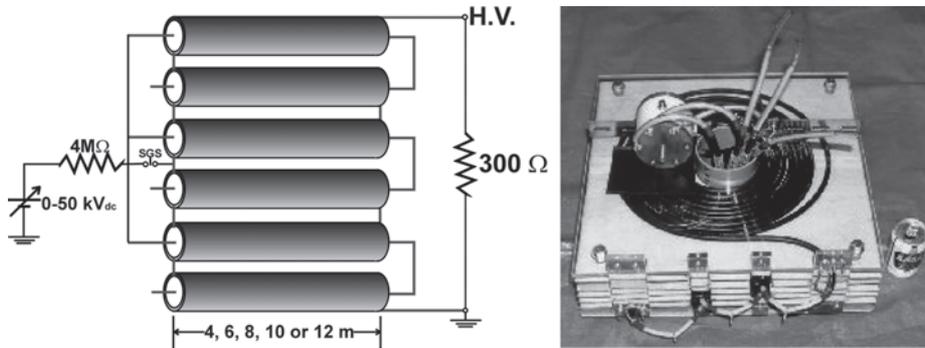
同軸ケーブルを利用したパルス発生方式の利点として、市販されている同軸ケーブルが利用できるため、安価に構成できる点以外にも、同軸ケーブルを複数組み合わせることで、容易に電圧を積み重ねて大きくとれることになる。この方式はブルームライン線路(Blumlein-line)と呼ばれている。一例として、同軸ケーブルを6本用いて構成した3段ブルームライン線路の構成と写真を図10に示す[18]。6本の同軸ケーブルを、それぞれ渦巻状に巻き、各

ケーブル端を接続するなどして構成する。ケーブル長を変えた場合の出力波形を、図11に示す[18]。各ケーブルのインピーダンスは $50\ \Omega$ であり、これが6段になっているため、おおよそ $300\ \Omega$ の負荷で整合がとれる。ケーブル長が12 mから8 m, 4 mと減らすことで、パルス幅は120 nsから80 ns, 40 nsと減少する。しかし回路のインダクタンス成分も影響し、短いケーブルを用いた場合、パルス形状は方形波から正弦波に近づく。

(3) コンデンサとコイルを用いた方形波生成

前述の同軸ケーブルを用いたパルス電源の場合、必要とするパルス幅がマイクロ秒を超えると、必要となるケーブルの長さは100 mを超え、電源の寸法も大きなものとなる。これは、ケーブルの単位長さあたりの静電容量やインダク

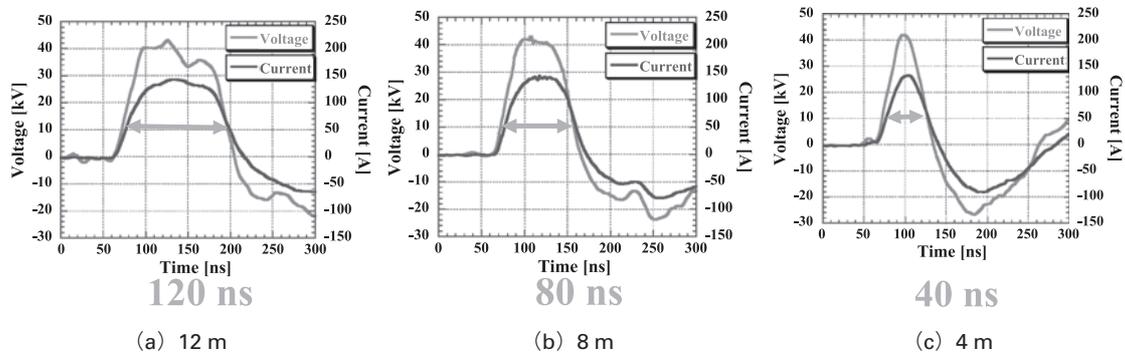
タンスが小さいために生じる。このため、一般的にはマイクロ秒を超える、比較的長いパルスを形成する場合、図9に示す等価回路の、キャパシタ部とインダクタ部に、耐圧の高いコンデンサや、大電流を流すことのできるコイルを配置する。これはPFN (Pulse Forming Network) と呼ばれている。構成を、図12に示す。直流高電圧の発生には、前述のコッククロフト・ウォルトン回路を用いている。PFNは、10段 ($N=10$) で、すなわち10個のコンデンサと、10個のコイルより構成されている。PFNの最大出力電圧は、コンデンサの耐圧で決定され、図12の場合、40 kVである。パルス幅は、コンデンサの静電容量を C_p 、コイルのインダクタンスを L_p とすると、以下の式で表すことができる。



(a) 回路

(b) 写真

図10 3段ブルームライン積み重ね線路[18].

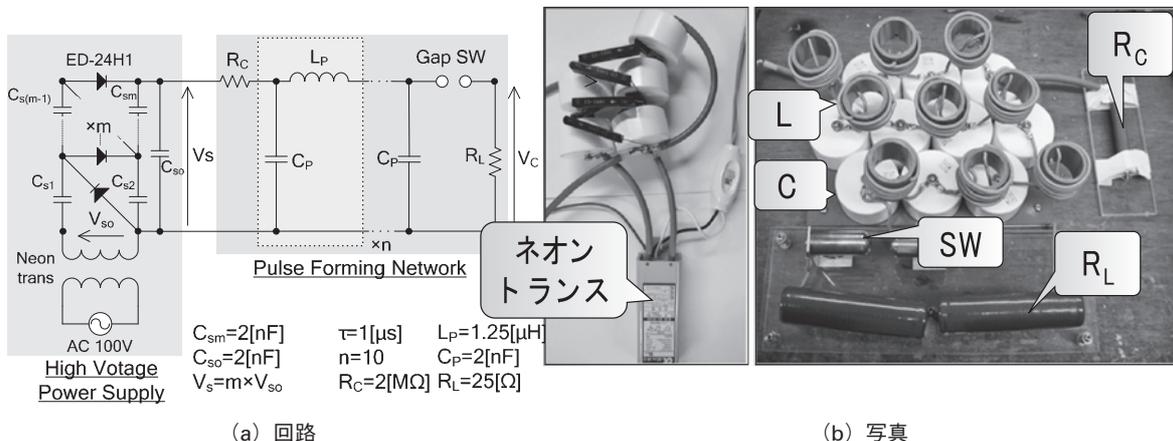


(a) 12 m

(b) 8 m

(c) 4 m

図11 ケーブルの長さを変えた場合の出力電圧波形[18].



(a) 回路

(b) 写真

図12 PFN 回路.

$$T = 2N\sqrt{L_p C_p} \tag{5}$$

図12では、 $C_p = 2\text{ nF}$ 、 $L_p = 1.25\text{ }\mu\text{H}$ 、 $N = 10$ であるので、パルス幅 T は約 $1.0\text{ }\mu\text{s}$ となる。図13に、充電電圧を 5 kV としたときの出力電圧波形を示す。負荷として、回路の特性インピーダンス ($z_0 = \sqrt{L_p/C_p}$) と等しい $25\text{ }\Omega$ の抵抗を接続した。パルス幅が約 1 ms 、大きさが約 5 kV のパルスが出力されていることがわかる。また、点線は回路シミュレータ (マイクロネット, Circuit viewer 3.0) を用いた解析結果になる。解析と計測結果が、おおよそ一致する様子も確認できる。 (高木浩一, 高橋克幸)

4.2 パルス圧縮と昇圧

前章では、直流高電圧の発生と電圧のパルス化について述べた。これでひとまずパルス高電圧を作り出すことはできる。しかし、用途によっては、さらなる短パルス化 (パルス圧縮) や高電圧化 (昇圧) が必要になる。加えて、電源の小型化や低コスト化、高効率化を図る上でも、パルス圧縮や昇圧過程が必要になる。ここでは、主に半導体スイッチング素子を用いた、パルス圧縮や昇圧過程を含む電源について述べる。

4.2.1 MARX 型パルス発生回路

(1) マルクス発生器の動作原理

マルクス発生器は、20世紀初頭にマルクスによって考案され、その回路構造の簡易さから幅広く利用されているインパルス発生回路である。図14に回路図を示す。

V_{in} に高電圧直流電源等を接続し、コンデンサ C を V まで充電する。この時、各ギャップスイッチには V の電圧が印加されている。ここで、ギャップスイッチ①を動作させ

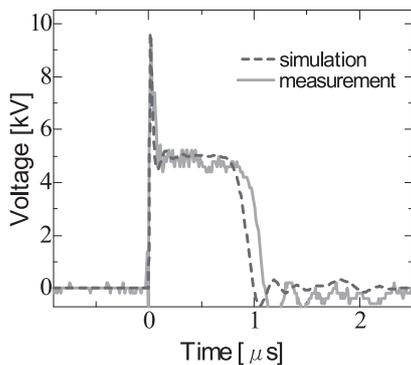


図13 PFN の出力波形 (点線：計算結果, 実線：測定結果)。

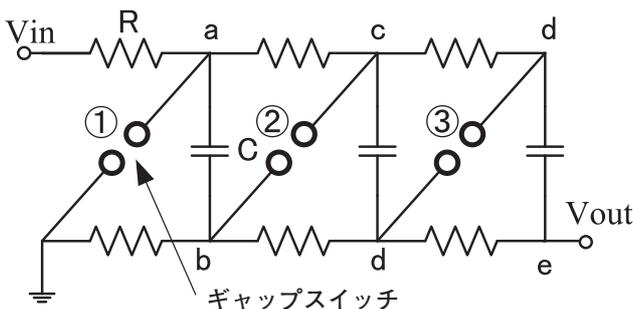


図14 マルクス発生器の構成図。

ると、接点 a の電位が GND (接地電位; 0 V) となるため、b の電位は $-V$ となる。この瞬間、ギャップスイッチ②には $2V$ の電圧がかかり動作する。その後、ギャップスイッチ③には、 $3V$ の電圧がかかり、 V_{out} には $-3V$ の電圧最大値を持つパルス波が出力される。つまり、マルクス発生器とは、並列に充電したコンデンサをギャップスイッチによって直列に接続しインパルスを得る装置である。マルクス発生器において、 V_C まで充電したコンデンサを N [個] 接続した場合、出力の電圧最大値 V_{max} は $N \cdot V_C$ [V] で与えられる。図中の出力の極性は負であるが、充電側の極性を入れ替える、即ち負とすることで正出力が可能である。その時の動作原理は、極性が入れ替わるのみで同一である。

(2) マルクス発生器の製作

マルクス発生器を製作する際、素子のパラメータの選定が必要となる。ここでは、その選定方法について説明する。

a. 抵抗 R

R の選定にあたっては、動作周波数および出力パルス幅を考慮し決定する。動作周波数 f [Hz] とすると、周期 $1/f$ [s] の間にマルクス発生器のすべてのコンデンサへの充電が完了しなければならないので、 $1/f \gg 2 \cdot N \cdot R \cdot C$ を満たす必要がある。また、出力波形のパルス幅を T_{out} [s] とした場合、マルクス発生器のギャップスイッチが動作した瞬間から C は R によって短絡され放電が始まるので、 $C \cdot R \gg T_{out}$ を満たす R を選定しなければならない。これを満たさないと、ギャップスイッチの動作時に C が急激に放電してしまい、所望のパルス幅を持った出力を得ることができない。いずれの場合も、 $R \cdot C$ の積によって満たすべき条件となるため、 C の容量を変化させ調整させても良い。

b. コンデンサ C

C の選定は、入力エネルギー E [J] と充電電圧 V_C [V] から決定され、 $C = 2 \cdot E / V_C^2$ で決定される。また、 C の電圧変化が急激なため、コンデンサの材質も考慮し、損失が小さく、電圧の急激な変化に強いコンデンサを利用する必要がある。

c. ギャップスイッチ

ギャップスイッチは、そのギャップ間隔により動作電圧を調整する。ギャップスイッチの動作電圧を V_G [V] とすると、充電中の動作を防ぐために $V_G > V_C$ としなければならない。また、充電側から数えて n 個 ($n \neq 1$) のギャップスイッチには、マルクス発生器動作時に $n \cdot V_C + V_C = V_C (n + 1)$ の電位が加わるので、 $V_C (n + 1) \gg V_G$ として確実に動作する様にしなければならない。

(3) ギャップスイッチの半導体スイッチへの置き換え

上述のようにマルクス発生器のスイッチングとして用いられているのがギャップスイッチであるが、絶縁を保つための装置の大型化、それに伴うインダクタンスの増加、加えて、ギャップスイッチ短絡動作時に自己破壊電圧を利用しているため、動作時間のずれやミスファイアといった欠点を持っている。これらの欠点を解消し、小型化および立ち上がり的高速化の手法として、半導体スイッチの1つである接合型トランジスタ (Bipolar Junction Transistor: BJT) の利用がある (図15)。

BJT の適用は、寿命、信頼性そして小型化といった多く

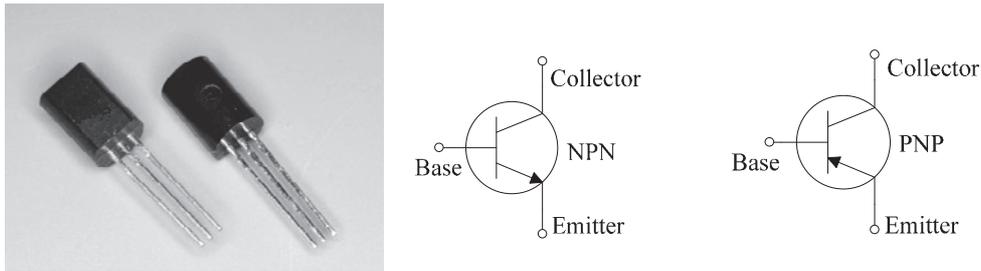


図15 小信号用BJT 外観写真, 回路図記号.

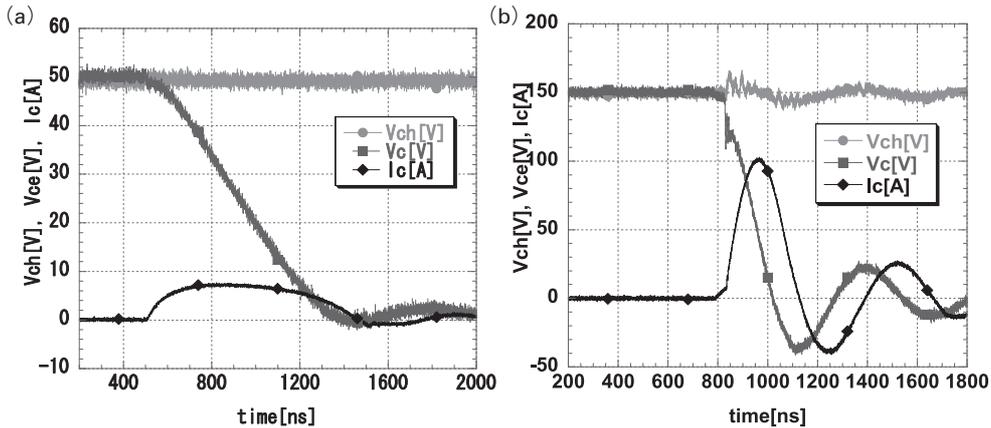


図16 ブレイクダウン現象発生時の電圧電流波形. (a)ブレイクダウン現象発生前, (b)ブレイクダウン現象発生後.

の点において, ギャップスイッチと比較して有用である. しかし, そのスイッチング速度が非常に遅いという欠点も併せ持っている. これは, BJTのスイッチング速度は, PN接合領域に蓄積された蓄積キャリアによって制限されており, 通常動作させる場合には, ベース電流の調整によってコレクタ電流(キャリア)の制御を行っているためである. そこで, この欠点を解消するために, ブレイクダウン現象と呼ばれる現象を意図的に起こし, BJTを動作させる. これにより, 通常動作で得られるマイクロ秒のスイッチング時間をナノ秒オーダーまで縮めることができ, 非常に高速なスイッチング速度を実現することが可能となる. その現象の発生には, コレクター-エミッタ間に定格を超える電圧を加える必要があるが, そのコレクタ電流を制限することにより, 素子破壊に至らずに繰り返し動作が可能となる.

図16にブレイクダウン現象発生前後の電圧電流波形を示す. 1つあたり200円以下の小信号用BJT (2SC2655, $V_{CE} = 50$ [V], $I_C = 2$ [A], 東芝社製)を利用し, コレクター-エミッタ間にコンデンサ 100 nFを接続したときの充電電源電圧 (V_{ch}), コレクター-エミッタ間の電圧波形 (V_{CE}), コレクタ電流波形 (I_C)である. ブレイクダウン現象発生前の図16(a)では, $V_{CE} = 48$ V, 最大 $I_C = 7$ Aでスイッチングを行っているが, V_{CE} を増加させブレイクダウン現象が発生した後(図16(b))では, 定格の3倍の $V_{CE} = 150$ V, 最大 $I_C = 100$ Aを超えるスイッチングが可能である. V_{CE} , I_C 共に定格を超えているが, コンデンサの容量による制限を行うことで, 繰り返し動作が可能である.

(4) マルクス発生器の作製

ギャップスイッチをBJTに置き換えたマルクス発生器の

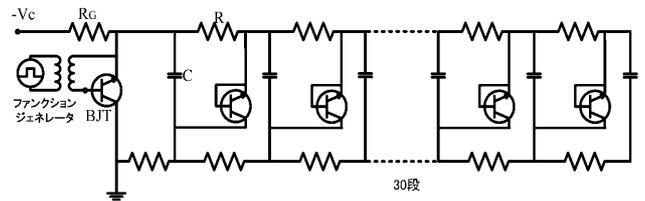


図17 マルクス発生器回路図.

表1 マルクス発生器構成.

使用素子	値
抵抗 R	3.3 kΩ
コンデンサ C	100 nF
BJT	2SC2655
段数	30段

回路を図17, 作製に用いた素子の値, 構成を表1に示す. 段数は30段とし, $C = 100$ [nF]とした. 充電にはコッククロフト・ウォルトンを利用した. 初段を除くすべてのBJTのベース抵抗は, 0Ω (ベース-エミッタ間を短絡)としている. これにより, ブレイクダウン現象発生時にスイッチング時間が最小, かつ出力電圧が最大となる [19, 20].

充電電圧 150 V, 負荷抵抗 3.3 kΩの時の出力波形を図18に示す. 最大電圧 3.9 kV, 立ち上がり時間 6.7 nsの電圧出力が確認できる. 立ち上がり時間はナノ秒であるが, 立ち下がりには負荷の抵抗と発生器全体のコンデンサ容量で与えられる時定数によって決定されるので, マイクロ秒と長くなる.

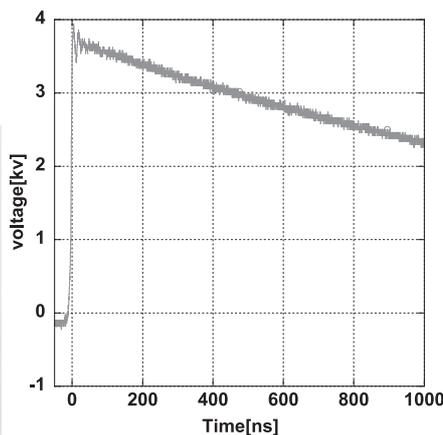
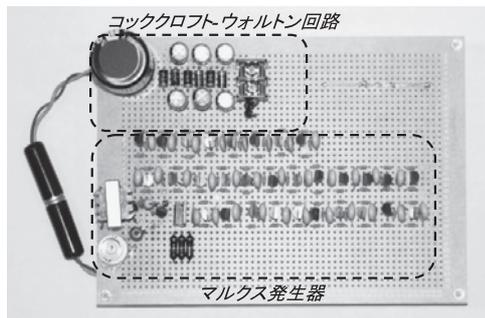


図18 シングルマルクス発生器と出力波形。

(5) おわりに

本節では、ギャップスイッチを半導体素子であるBJTへ置き換えたマルクス発生器を紹介した。BJTの単価が安く、構成素子もコンデンサ、抵抗であるため発生器のコストも低く抑えることが可能である。今回紹介したマルクス発生器以外にもナノ秒短パルス[21]を出力するものやパルス幅を変えられるマルクス発生器[22, 23]も存在する。いずれも安価で研究室にある材料でパルスパワーを発生させることが大きな魅力の1つである。これらの製作を通して、パルスパワーへの興味や理解が深まれば幸いである。

(上野崇寿)

4.2.2 パルストランスと磁気圧縮回路

本節では強磁性体を用いたパルストランスと磁気パルス圧縮回路について述べる。パルストランスや磁気パルス圧縮用飽和インダクタに用いられる磁性材料の特性を表2に示す[24]。形状としては図19に示すようなトロイダル形状がよく用いられる。これら磁心材は大きさにもよるが小型の汎用品だと数千円から入手できる。パルストランスも一般的なACトランスと同様に一次巻線と二次巻線の巻数比(n_2/n_1)で昇圧比が決まる。当然のことながら磁気飽和させないように設計する必要がある。磁気飽和したトランスでは一次巻線と二次巻線の磁気結合が無くなりエネルギー転送がうまくいかない。磁気飽和しないパルストランスの設計にはパルストランス一次側に入力されるパルス電圧波形を見積もる必要がある。パルストランス設計においてトランス一次側の電圧時間積と磁心材の磁束密度変化の関係は次式のようになる。

$$\int_0^{T_s} V(t) dt \leq n_1 \int_{A_m} B ds = n_1 A_m \Delta B \quad (6)$$

ここで T_s は電圧が印加される時間、 $V(t)$ はトランス一次側に印加される電圧、 n_1 はトランス一次の巻数、 A_m は巻線部の磁心材断面積、 ΔB は磁束密度変化量である。通常ACトランスでは $\Delta B = 2B_s$ (ただし B_s は飽和磁束密度)であるが、パルストランスでは正負どちらかの片極性であるため $\Delta B = B_s$ となる。保持力以上の逆バイアス磁界を発生させる三次巻線(リセット巻線)を施して $\Delta B = B_s + B_r$

表2 パルスパワー回路に利用される磁心材料の物理特性。

磁性材料	鉄基 ナノ結晶質合金 (FT-3H)	鉄基 アモルファス合金 (2605CO)	コバルト基 アモルファス 合金(2714)	Mn-Zn フェライト
飽和磁束密度 B_s (T)	1.23	1.8	0.57	0.44
残留磁束密度 B_r (T)	1.09	1.6	0.52	0.26
初透磁率 (at 0.02 T) μ_i	-	14000	170000	5300
比透磁率 (at 100 kHz) μ_r	5000	5000	80000	5300
飽和時比透磁率 μ_{rs}	~1	~1.3	~1	~3
保磁力 H_c (A/m)	0.6	4	0.2	8
半周期 (0.5us) コア損失 P_c (J/m^3)	710	1680	-	70
飽和磁歪 λ_s ($\times 10^{-6}$)	0	35	0	0.6
キュリー温度 ($^{\circ}C$)	570	415	225	> 150
抵抗率 ρ ($\mu\Omega\cdot m$)	1.2	1.23	1.42	1×10^{12}



図19 トロイダル磁心材。

(ただし B_r は残留磁束密度)として利用することで高価な磁心材料の容積を軽減して使用できる。パルスパワー用のパルストランスの一次巻線はできるだけインダクタンスを小さくする必要がある。リッツ線を用いたり、巻線の並列数を増やして低インダクタンス化を計る必要がある。パルストランスは一次側の入力電圧が数kV、二次側出力電圧は数kVから数100kVの高電圧を発生することが多い。そのためパルストランスの巻線は十分耐電圧のある高電圧ケーブルを用いる。シリコンケーブルが扱いやすいが安価な架橋ポリエチレンケーブル等もよく利用されている。

磁気パルス圧縮(MPC; Magnetic Pulse Compression)回路とは磁気スイッチとして機能する可飽和インダクタを用いて電流パルスを時間圧縮していく回路である。電流パル

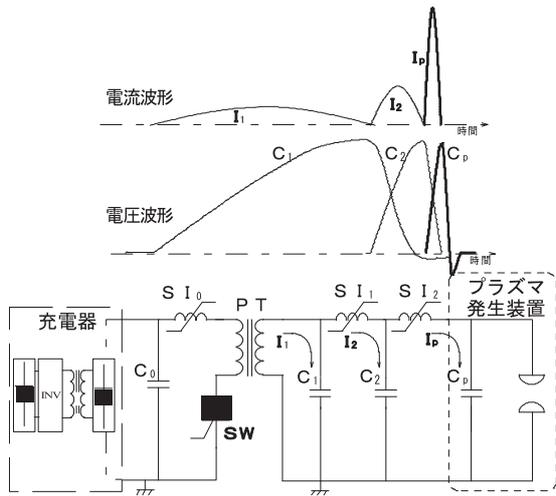
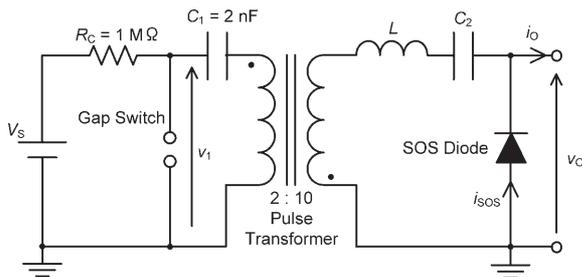


図20 2段磁気パルス圧縮回路と各部の電流電圧波形.

スを圧縮することで電流のピーク値が増加する。可飽和インダクタとは強磁性体の透磁率の非線形現象を用いることで通電しない状態（非飽和時）と通電する状態（飽和時）を作ることができる。図20に典型的な2段磁気パルス圧縮回路と各コンデンサ（ C_1 , C_2 , C_p ）の電流電圧波形の模式図を示す [25]。 $SI_0 \sim SI_2$ は可飽和インダクタ、PTは昇圧用のパルストランスである。 $C_0 \sim C_p$ は充放電用のコンデンサである。SWは半導体スイッチである。動作としてはまず充電器でコンデンサ C_0 を充電する。 C_0 充電後SWをオンすると C_0 に充電されていた電荷は放電しPTを介して昇圧比に対応した電圧で C_1 を充電する。このときSWオン後数マイクロ秒 SI_0 が高インダクタンス状態で電流を流さないようにする。そのことで電圧と電流の位相差が生じ、結果的に電圧と電流の積で決まるスイッチング時の電力損失が低減できる。これを磁気アシストという。 C_1 は C_0 の充電電圧より昇圧された電圧で充電される。このとき SI_1 はオフ（未飽和）状態を維持するように設計すると高インダクタンス状態で電流を流さないようにして効率よく C_0 から C_1 に電荷の転送が行われる。 SI_1 の未飽和状態を維持する時間は、式(6)同様、次式のように求めることができる。

$$\int_0^{T_1} V_{C_1}(t) dt = n_{SI_1} \int_{A_m} B ds = n_{SI_1} A_m \Delta B \quad (7)$$

ここで T_1 は C_1 の充電電圧が最大になるまでの時間、 $V_{C_1}(t)$ は C_1 の充電電圧、 n_{SI_1} は SI_1 の巻数、 A_m は SI_1 の磁



(a) 回路

心材断面積、 ΔB は磁束密度変化量である。磁気パルス圧縮回路はLC共振回路であり、パルス幅 τ_2 は次式で表すことが出来る。

$$\tau_2 = \pi \sqrt{(L_2 + L_s) C_{23}} \quad (8)$$

ここで L_2 は電流ループ I_2 の漂流インダクタンス、 L_s は SI_1 の飽和後のインダクタンス、 C_{23} は C_1 と C_2 の直列接続時の合成容量である。この値をいかに小さくするかが短パルス化につながる。

C_1 充電直後に SI_1 がオン（飽和）し C_1 が放電して C_2 に電荷転送が行われる。この時も同様に SI_2 がオフ（未飽和）状態を維持するように設計すると C_2 は効率よく充電される。同様に C_2 充電直後に SI_2 がオン（飽和）して C_p を高速充電（パルス圧縮）し負荷にパルスパワーを印加する。

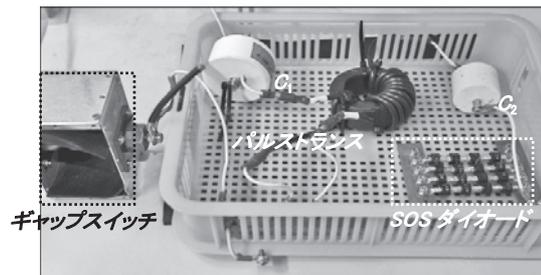
(佐久川貴志)

4.2.3 誘導性パルス発生回路

半導体オープニングスイッチを用いた誘導性エネルギー蓄積型パルスパワー電源[2, 16]の回路図を図21に示す。回路は、充電コンデンサ C_1 、ギャップスイッチ、パルストランス (2:10)、1次エネルギー蓄積コンデンサ C_2 、2次エネルギー蓄積インダクタ L 、半導体オープニングスイッチ (SOS; Semiconductor Opening Switch) ダイオード (Voltage multiplier, K100UF) によって構成している。パルストランスには可飽和磁性体コア（日立金属株式会社製 FT-3L）に 2 : 10の比率で巻き線したものをを用いた。

コンデンサ C_1 が直流電圧 V_s によって充電されギャップスイッチが短絡すると、パルストランスを介して、 C_1 から C_2 にエネルギーが転送される。 C_2 が充電され、磁性体コアが磁気飽和すると、そのインピーダンスが急激に低下し、ほぼ導通状態となる。そのため、SOSダイオードに順方向に電流が流れ、インダクタ L にエネルギーが転送される。その後、 C_2 と L およびパルストランスのインダクタンス成分によるLC振動によって電流が反転する。順方向電流が流れ込むSOSには少数キャリアの蓄積が起り、続く極性反転時には、蓄積したキャリアは逆方向電流となって流れる。ある時間を経て空乏層の蓄積電荷が消滅したときに急激な電流遮断が起り、SOSダイオード両端に以下の式に示すパルス電圧 v_o が生じる。

$$v_o = L \frac{di_{SOS}}{dt} \quad (9)$$



(b) 写真

図21 SOSダイオードを用いたパルス電源.

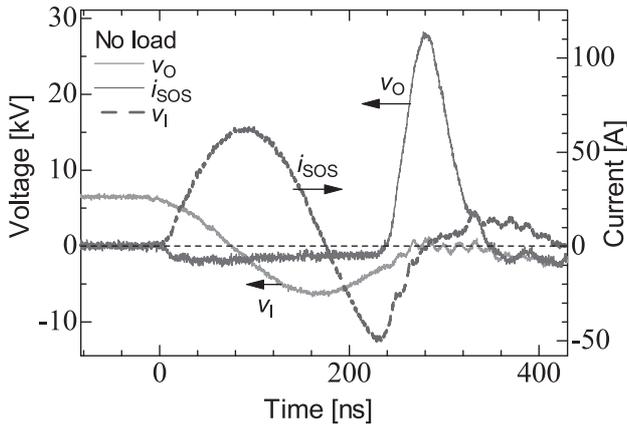


図22 SOS ダイオードを用いたパルス電源の電流・電圧波形。

図22に、出力端を解放とした場合の、ギャップスイッチ両端の電圧 v_i 、SOS ダイオードへの電流 i_{SOS} 、出力電圧 v_o の波形をそれぞれ示す。このとき、 L 、 C_2 はそれぞれ $9.1 \mu\text{H}$ 、 2 nF とした。充電電圧は約 6 kV である。図より 230 ns の時点で、電流の急激な遮断が生じ、約 28 kV のパルス電圧が発生していることがわかる。パルス幅は、半値幅で約 50 ns となっている。ギャップスイッチ部を MOS-FET などの半導体スイッチにすることで繰り返し周波数も大きくとれる。(高木浩一、高橋克幸)

4.3 高度な制御

ここでは、実際に開発したパルスパワー発生装置を例に、組み込みシステムを用いた高度な制御について述べる。FPGA (Field Programmable Gate Array) を磁気パルス圧縮回路 (MPC; Magnetic Pulse Compression) 方式のパルスパワー発生装置へ組み込み、ソフトウェアを用いて高度な制御を行う。

4.3.1 組み込みシステムを用いた制御

電子機器の制御はロジック IC などを用いた電子回路や機械的な操作で実現していたが、テレビや冷蔵庫、携帯電話など、現在の電子機器は組み込みシステム [26] を用いることが一般的である。近年はパルスパワーを用いた応用研究・産業応用の発展に伴い、パルスパワー発生装置の制御が複雑化し、組み込みシステムを用いた制御が有効となってきた。

(1) 開発環境の準備

開発環境は下記である。

FPGA: Xilinx 社 Spartan-3

開発言語: Verilog HDL

統合開発ツール: Xilinx 社 ISE Design Suite 12.1

ダウンロードケーブル: Xilinx 社 HW-USB-G (図23)

FPGA ブレッドボード: ヒューマンデータ社

Spartan-3 VQG ブレッドボード(図24)

コンパイルなどの機能を持った統合開発ツールは、Xilinx のウェブページ (<http://japan.xilinx.com/>) から無償でインストールできる。FPGA、水晶発振器、ダウンロード用の JTAG ポート、LED や操作スイッチなどを搭載した



図23 ダウンロードケーブル。

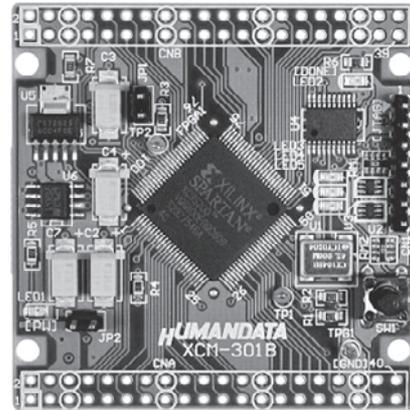


図24 FPGA ブレッドボード。

FPGA ブレッドボードは多くの企業が販売しており、本開発では価格が安く小型なヒューマンデータ (<http://www.hdl.co.jp/>) のブレッドボードを購入した。HW-USB-G のダウンロードケーブルは USB で接続でき、FPGA ブレッドボード上の JTAG ポートと接続させ、作成したソフトウェアを簡単に FPGA へ書き込むことができる。

FPGA のハードウェア記述言語として、主に VHDL と Verilog HDL の 2 種類が対応している。本研究では Verilog HDL を用いて開発を行った [27]。Verilog-HDL は C 言語とプログラムコードが似ており、演算式や条件判断文などの記述はほとんど同じである。

(2) ハードウェアとソフトウェア

図25にロジック IC を用いたコントローラ、図26に FPGA を用いたコントローラを示す。FPGA の導入によって電子

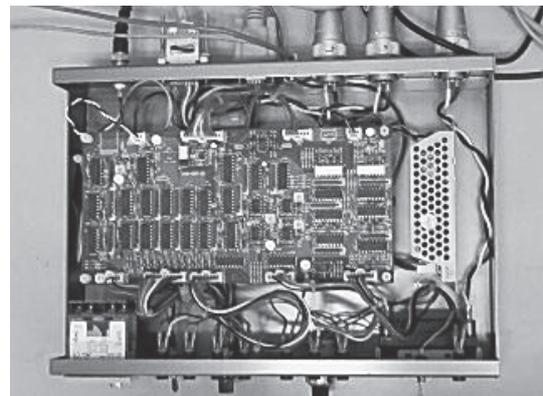


図25 ロジック IC を用いたコントローラ。

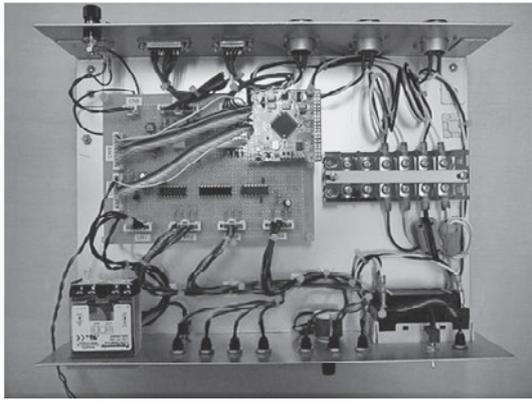


図26 FPGA を用いたコントローラ。

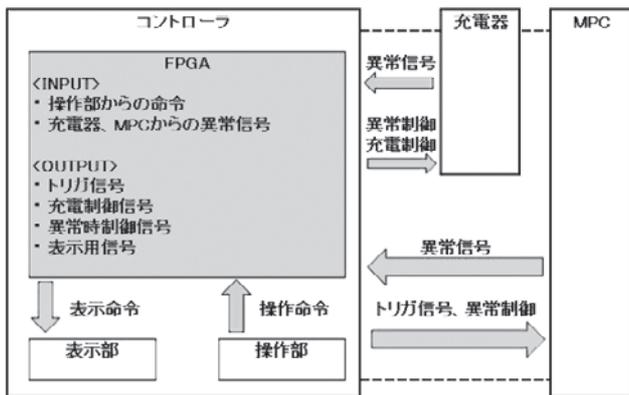


図27 パルスパワー発生装置の構成。

部品の数を減らすことができ、柔軟な仕様変更、高度な制御の実現など、様々なメリットが得られる[28].

図27にパルスパワー発生装置の構成を示す。パルスパワー発生装置は、FPGA を用いたコントローラ、充電器、パルスパワー発生装置で構成される。FPGA は、操作部からの操作命令、充電器および MPC からの異常信号の受け取り、MPC へのトリガ信号と異常制御、充電器への異常制御と充電制御、表示部への表示命令を送っている。コントローラの操作部は、周波数設定用スイッチ、電圧設定用メーター、電源スイッチ、トリガスイッチ、リセットスイッチを持っており、表示部はパルスカウンタ、異常個所の LED 表示などを行っている。

パルスパワーの出力に関するタイミングチャートを図28に示す。周波数の立ち上がりと同時に充電禁止信号を OFF にし、この仕様では 1.5 ms の間充電を行う。その後、50 μ s の保護時間において、トリガ信号を ON にすることでパルスパワーが出力される。図29は FPGA で作成した周波数、充電禁止、保護時間およびトリガの信号であり、この信号で充電時間およびパルスパワーの出力制御を行っている。

これらの FPGA の信号はプログラミングで作成でき、仕様変更や制御の追加などに柔軟な対応ができる。図30にフローチャート、図31に作成したプログラムのソースコードを示す。

作成したプログラムは、1~6行で周波数信号の立ち上

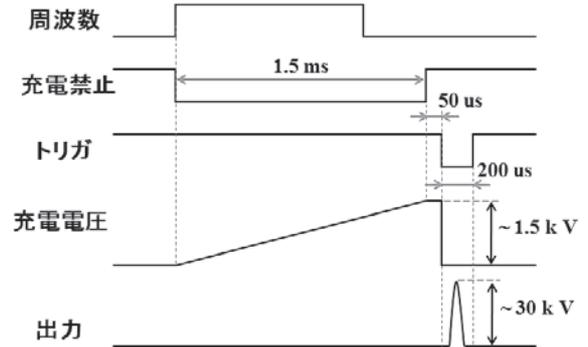


図28 タイミングチャート。

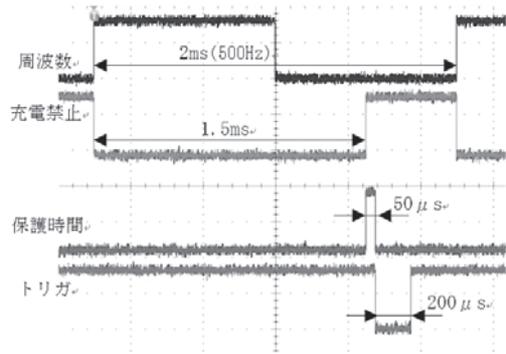


図29 FPGA で作成した制御信号。

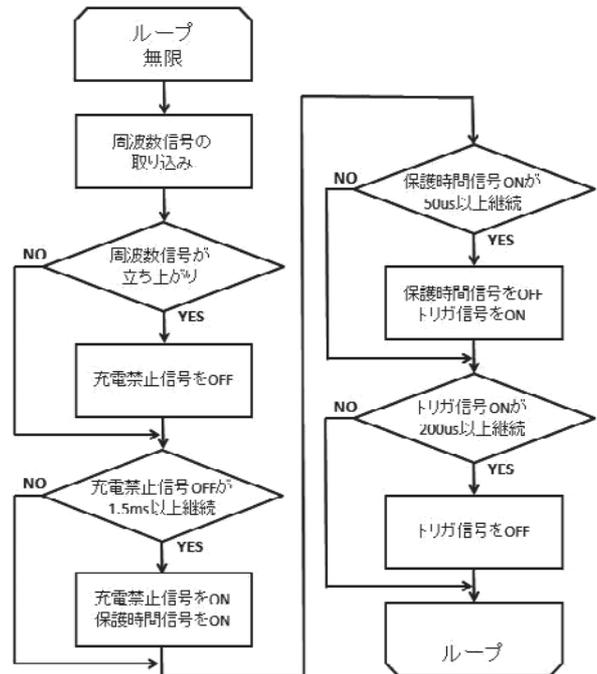


図30 フローチャート。

がり (OFF から ON) を検出し、周波数信号が立ち上がりであれば7~16行の充電制御へ移行する。充電制御へ移行後は、充電禁止信号を許可にして 1.5 ms の間コンデンサの充電を行い、次の保護時間制御へ移行する。保護時間制御が終わるとトリガ制御へ移行し、パルスパワーが発生する。トリガ制御が終わると、周波数の立ち上がり検出を待つ状態へ戻り、その後は同じ処理を繰り返す。

```

. . .
1: if(t_PLS == 'b1') begin //t_PLS : 周波数
2:   if(t_PLS != old_t_PLS) begin
3:     inh_flag <= 'b1'; //充電制御への移行フラ
   グ
4:   end
5: end
6: old_t_PLS <= t_PLS; // 周波数の前回値保存

7: if(inh_flag == 'b1') begin
8:   t_INH <= 'b0'; //充電禁止を許可
9:   inh_cnt <= inh_cnt + 'b1';
10:  if(inh_cnt >= 20'h11940) begin //1.5ms
11:    t_INH <= 'b1';
12:    inh_cnt <= 20'h00000;
13:    inh_flag <= 'b0';
14:    tt_THY <= 'b1'; //保護時間制御への移行フ
   ラグ
15:  end
16: end

17: if(tt_THY == 'b1') begin
. . .

```

図31 プログラムのソースコード。

10行目の if 文の成立条件を“==”ではなく、“>=”と記述した理由は、FPGA がパルスパワー発生時の EMI ノイズの影響を受けやすく、条件文の判定が頻繁に抜けてしまうためである。一般的には使用しない記述だが、パルスパワーのノイズ対策として非常に有効であった。

4.3.2 パルスパワーの制御

組み込みシステムをパルスパワー発生装置へ導入することで、プログラミングによる高度な制御が可能となった。プログラミングを用いた制御を工夫することで、装置だけではなく 1 ショット毎のパルスパワーを制御することもできる[29]。図32にパルスパワー制御のイメージ図を示す。高繰り返し動作中の周波数変更、パルス間のインターバル、出力回数の指定など、様々な制御が可能である。

パルスパワーの出力のタイミングは、図33のトリガ信号によって制御されている。プログラミングで作成した制御信号をトリガ信号として使用すれば、パルス間のインターバルや出力回数の指定など、図32のパルス制御が実現す

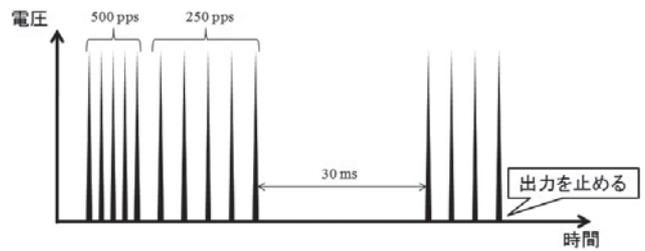


図32 パルスパワー制御のイメージ。

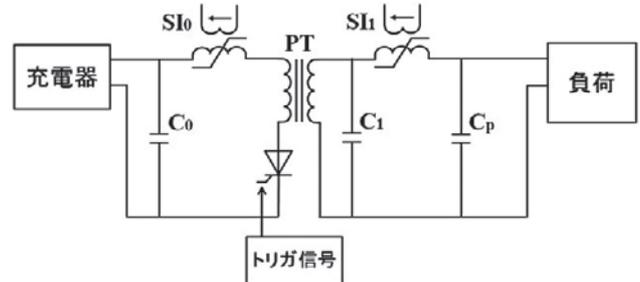


図33 MPC 方式パルスパワー発生装置の回路図。

る。また、初段コンデンサ (C₀) の充電電圧を制御すれば、パルスパワーの電圧値が制御できる。制御に少しの工夫を入れることで、様々なパルスパワーの制御が実現する。

(秋山雅裕)

4.4 目的別マニュアル

ここまで家庭のコンセントにきている AC100 V の電圧を、昇圧およびパルス圧縮して、数万ボルトのナノ秒もしくはマイクロ秒パルス高電圧の発生する方法について述べてきた。ここでは、より時間がない人のために、市販のグッズを利用してパルス電圧を得る方法や、適当なパルス電源を購入もしくは作成の相談先の情報を記載する。

4.4.1 1時間以内にパルスがほしい；ピエゾ素子

最も安価・容易に高電圧パルスを発生させることができる手段の一つとして、ピエゾ素子 (圧電素子) が挙げられる。ピエゾ素子は、振動や圧力が加わると電圧が発生し、素子に電圧が加えられると伸縮する素子で、ライターやガスの着火や、スピーカーなど幅広く用いられている。図34 (a)に、市販の電子ライター (100円で2個入り) から取り

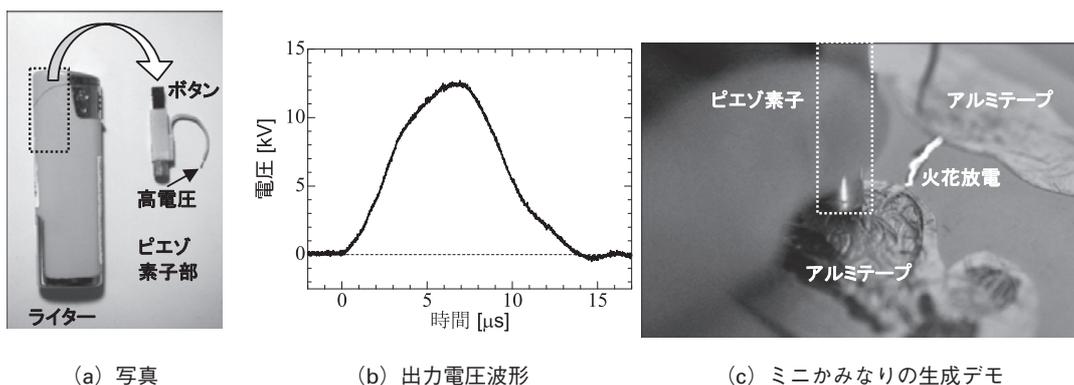


図34 ピエゾ素子を用いたパルス高電圧の発生の様子。

出したピエゾ素子部を示す。ボタンを押すと素子に圧力が加わることにより、図中矢印間に高電圧パルスが発生する。図34(b)に、発生する電圧波形を示す。図より、12 kV (1.2万ボルト) が容易に発生できることがわかる。高電圧発生部がある程度近づけると、図34(c)に示すように、火花放電が発生する[9]。ライターやガスコンロでは、この火花によって燃料ガスに着火し火を灯している。50円で作ることのできるパルス電源となる。

4.4.2 安価な既製品を活用したい；スタンガン

図35(a)に、スタンガン(タイタン QUASAR；13万ボルト；定価 15,800円)の外観を示す。スタンガンは電気ショックを与える機器で、護身用に用いられる。定価は15,800円だが、ネット販売では3,980円である。販売されている種類も多く、発生する電圧は製品によって異なるが、一般的に数万～数十万ボルトである。電圧は電池(9ボルト程度)を、半導体スイッチを用いて交流に変え、先に述べたコッククロフト・ウォルトン回路などによって昇圧している。図35(b)に、スタンガンで発生する電圧波形を示す。図より、0.5 μ s (一千万分の5秒) 程度の時間で、38 kV (3.8万ボルト) の電圧が発生していることがわかる。電圧がある程度高くなると(絶縁破壊電圧に達すると)、図35(c)に示すように、電極間で火花放電が生じる。火花放電のインピーダンス(電気の流れを妨害する尺度)は、空気に比べ、非常に小さい。その結果、図35(b)に示すように電圧が急激に低下する。

4.4.3 目的に適した電源に仕上げてもらいたい；ここに相談！

ここまで述べてきたパルス電源の作成や購入に関しては、もちろん筆者らに連絡をいただければ、相談にのることは可能である。ただ、“お金はある。時間はない。誰か適当な電源を作成してほしい”と考える場合、電源メーカーへの問い合わせとなる。以下に、電源メーカーなど、相談先について記載する。

- (株)融合技術開発センター：

<http://fusiontech.jp/index.html>

パルスパワーに関する融合技術開発コンサルタント、環境エネルギー機器・医療バイオ機器・組み込み技

術、試作、技術移転等を行う。窓口は、取締役副社長の秋山秀典 (fusiontechs@fusiontech.jp)。

- PPJ(株)パルスパワー技術研究所：

<http://www.mypj.com/>

パルスパワーを専門として発生と制御に関する技術支援・実験品試作・共同研究などを行っている。

- (株)末松電子製作所：<http://www.suematsu-el.jp/>

出力パルスの立ち上がり時間が数十ナノ秒の小型で安価なパルス電源の販売を行う。国外の販売に対応している。

- シシド静電気(株)：<http://www.shishido-esd.co.jp/>

主に除電などの静電気障害対策を目的とした小型の高電圧電源の設計製作を行っている。窓口は、新横浜工場・研究開発センターの竹内隆一 (メール:r_takeuchi@shishido-esd.co.jp, 電話：045-948-4410, FAX：045-948-4415)。

(高木浩一, 高橋克幸)

4.5 おわりに

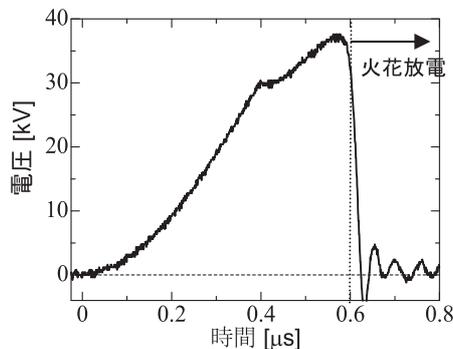
今回の講座では、誰でも気軽にパルスパワーが利用できるように、“ちょいバル”(ちょっと、パルスパワー)といったコンセプトでパルスパワーの生成方法について記載した。パルスパワーの生成方法は、その規模や用途によって多岐に分かれ、サイズや価格帯も幅が大きい。ここで紹介した記事が入り口となり、気軽にパルスパワーを使い、パルスパワー人口が増えれば、筆者等の喜びである。

参考文献

- [1] 八井 浄, 江偉 華：パルス電磁エネルギー工学 (電気学会, 2002年)。
- [2] 秋山秀典編著：高電圧パルスパワー工学 (オーム社, 2003年)。
- [3] 京都ハイパワーテクノロジー研究会：パルスパワー工学の基礎と応用－プラズマ・レーザー・粒子ビーム・X線の発生と応用－ (近代科学社, 1992年)。
- [4] H. Bluhm, *Pulsed Power Systems* (Berlin: Springer, 2006)。
- [5] H. Akiyama, T. Sakugawa, T. Namihira, K. Takaki, Y. Minamitani and N. Shimomura, *IEEE Trans. Dielectric*



(a) 写真



(b) 出力電圧波形



(c) 放電発生部の様子

図35 スタンガンを用いたパルス高電圧の発生の様子。

- and Electrical Insulation, 14(5), 1051 (2007).
- [6] 高木浩一, 浪平隆男: 電気学会誌 126, 784 (2006).
 - [7] 高木浩一: 電学論 A 130, 963 (2010).
 - [8] 秋山秀典, 勝木 淳, 浪平隆男: 放電学会誌 45, 2 (2002).
 - [9] 高木浩一, 猪原 哲, 高橋 徹, 杉山敏樹: プラズマ・核融合学会誌 80, 669 (2004).
 - [10] 高木浩一: 応用物理 77, 426 (2008).
 - [11] 高木浩一: 静電気学会誌 32, 104 (2008).
 - [12] 高木浩一, 高城 大, 井上祥史, 加藤 正, 笠木俊一: エネルギー環境教育研究 5, 86 (2010).
 - [13] 高木浩一, 佐藤秀則, 高橋 徹, 猪原 哲, 向川政治: 大学一年生のための電気数学 (森北出版, 2006年).
 - [14] 高木浩一, 佐藤秀則, 高橋 徹, 猪原 哲: できる! 電気回路演習 (森北出版, 2009年).
 - [15] 江 偉華, 高木浩一: プラズマ・核融合学会誌 87, 669 (2011).
 - [16] 江 偉華: プラズマ・核融合学会誌 87, 46 (2011).
 - [17] M.A. Jani, K. Takaki and T. Fujiwara, J. Phys. D: Appl. Phys. 32, 2560 (1999).
 - [18] T. Namihira, S. Tsukamoto, D. Wang, S. Katsuki, R. Hackam, H. Akiyama, Y. Uchida and M. Koike, IEEE Trans. Plasma Sci. 28, 434 (2000).
 - [19] 上野崇寿: 大分工業高等専門学校紀要 45, 16 (2008).
 - [20] 上野崇寿, 渡邊一光, 猪口 誠, 佐久川貴志, 秋山秀典: パルスパワー放電研究会 PPT-09-103, 7 (2009).
 - [21] 上野崇寿, 佐久川貴志, 秋山雅裕, 浪平隆男, 勝木淳, 秋山秀典: 静電気学会誌 32, 216 (2008).
 - [22] 内田香輝, 上野崇寿: 平成22年度高専連携教育研究プロジェクト発表会資料 22 (2009).
 - [23] 上野崇寿: ミニチュアパルスパワー電源の開発とその応用 (熊本大学大学院自然科学研究科 複合新領域科学専攻博士論文, 2009.3).
 - [24] 佐久川貴志, 秋山秀典: 機械の研究 62, 949 (2010).
 - [25] 佐久川貴志: プラズマ・核融合学会誌 76, 15 (2003).
 - [26] 藤広哲也: よくわかる組み込みシステムの基本と仕組み (秀和システム, 2005年).
 - [27] 堀桂太郎: 図解 Verilog HDL 実習 (森北出版株式会社, 2006年).
 - [28] 秋山雅裕, 猪口 誠, 佐久川貴志, 秋山秀典, 上野崇寿, 末松謙一, 甲田 忠: プラズマ・核融合学会誌 85, 631 (2009).
 - [29] M. Akiyama, T. Sakugawa, S. Hamid R. Hosseini, E. Shiraiishi, T. Kiyan and H. Akiyama, IEEE Trans. Plasma Sci. 38, 2588 (2010).



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られる。

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的に電極間のみならず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

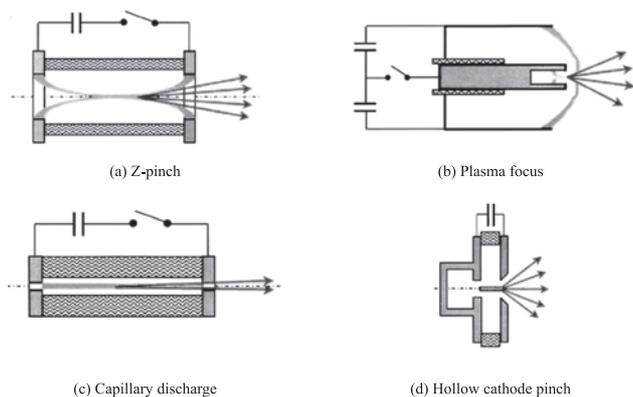


図1 放電型高エネルギー密度プラズマ生成方式[3].

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 μm 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有する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

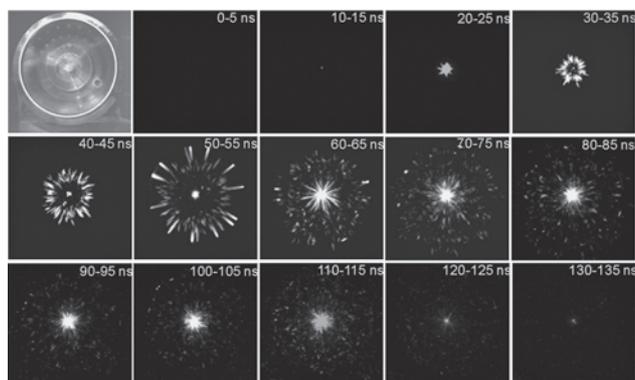


図2 大気中同軸線対円筒電極間におけるパルスパワー放電の可視光像の時間推移[6]（線電極と円筒電極の直径はそれぞれ 0.5 mm, 76 mm, 奥行きは 10 mm）。

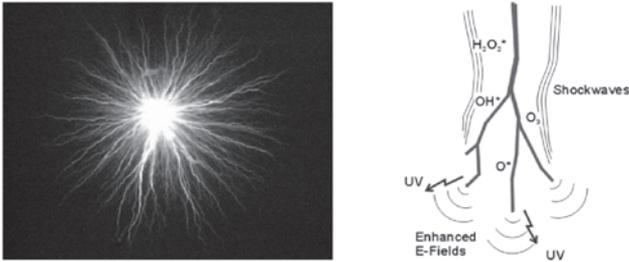


図3 水中パルスパワー放電プラズマと物理化学作用の模式図[7].

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-ユゴニオ (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、シリコンウエ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エハ上に

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、電位のくぼみが発生し、このくぼみを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や酸素は、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 と低いいため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な不可欠であり、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

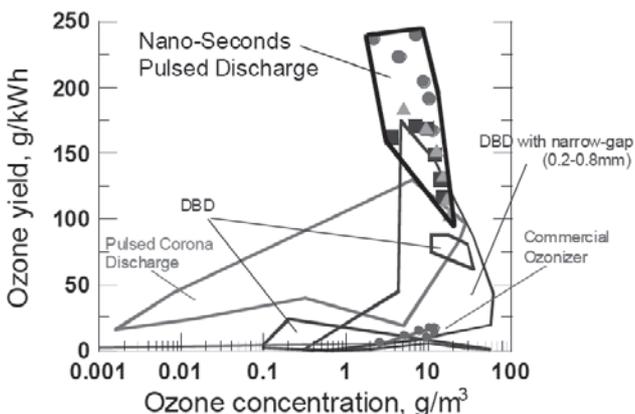


図 4 各方式オゾナイザのオゾン濃度 - 収率特性 [17]。

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応答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)ほだ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。パルス印加後のほだ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] 三間園興編：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. Inslat.* 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)。

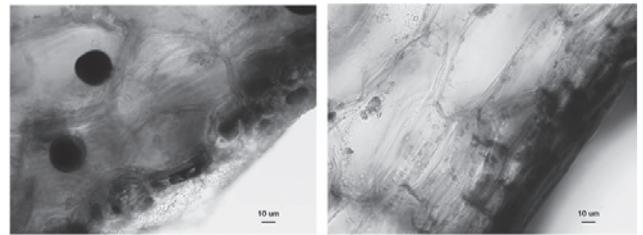


図6 パルス電界の印加の有無によるブドウの皮の細胞の光学顕微鏡画の比較 (左：パルス非印加, 右：60 kV 印加) [*]。

(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. Communi.* 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。



6. おわりに

勝木 淳

熊本大学バイオエレクトロニクス研究センター

(原稿受付：2011年3月22日)

パルスパワーの研究は、欧米において、戦後の東西冷戦構造を背景とした兵器開発と荷電粒子ビームで駆動する慣性核融合の研究を通して本格化し、各国で軍やエネルギー関連の大規模予算が投入されてきた。2年ごとに米国で開催されるパルスパワー国際会議では今でも兵器開発の講演がしばしば行われ、日本との軍備に対する考え方の違いを認識させられる。一方日本では、1980年代から1990年代にかけて、大阪大学の REIDEN 名古屋大学の LIMAY、長岡技科大学の ETIGO など、いくつかの限られた大学に大型のパルスパワー装置が設置され、Zピンチや荷電粒子ビーム慣性核融合の実験が盛んに行われた。90年代後半になると、世界最大のパルスパワー装置 PBFA (後に Zピンチ核融合のために改造され Z と改名される) を有する米国で軽イオンビーム核融合の研究が下火になると、国内でも研究の軸足は重イオンビーム核融合や高エネルギー密度物性研究、一方で産業応用へと移った。幸か不幸か、もともと日本には巨大な装置がなかったこともあり、研究室レベルで実施可能な産業応用をめざした取り組みは世界に先んじていたように思う。特に、半導体露光用高出力エキシマレーザーの登場は、駆動用のパルスパワー電源の固体化、高繰り返し化や小型化を加速し、その後もパルスパワー産業を牽引してきた。一方で、研究レベルでは非常に良い成果を挙げているものの、放電スイッチを使っているが故に実用化との距離がなかなか縮まらないものも少なくない。結

局、産業応用拡大の鍵はパルスパワー電源である。現在の技術では、数 J クラスの繰り返し電源のパルス幅は 100 ns 弱であるが、これが効率の犠牲なしに 20 ns 程度以下まで縮まれば、応用範囲が格段に広がることは間違いない。パルスパワー発生方式は30年前の教科書に書かれている内容と然程変わっていない。実用化の要の技術はスイッチ、磁気コアやコンデンサ等のデバイスであり、益々その重要性が高まっている。また、バイオ・医療など新しい応用では、コンポーネントをペン型ケースに収納したり、パルス波形の精度を高めるなど、電源に対して多様な要求があり、負荷と一体化した制御性の高い電源が求められている。新応用開拓のためには、これまでパルスパワーに従事してきた研究者だけでなく、他分野の研究者を巻き込んだ共同作業が不可欠である。

本講座「パルスパワー技術入門」は、パルスパワーに初めて触れる方々に読んでもらうことを想定し割りきって贅肉をそぎ落とした内容にした。パルスパワー研究の歴史的背景に始まり、産業応用のために不可欠なパワー半導体デバイスとその利用法、パルスパワー電源の実践自作マニュアル、そして最後に、パルスパワー応用の考え方と最近の応用研究を紹介した。本講座をきっかけに、パルスパワーをもう少し詳しく調べてみたい、あるいは装置を自作してみたいと思っていただけたとすれば、執筆者一同幸せに思う次第である。