



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。

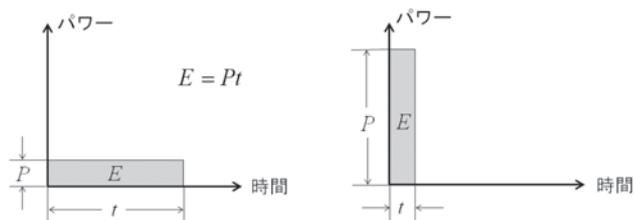


図1 パルスパワーの基本的考え方。

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。

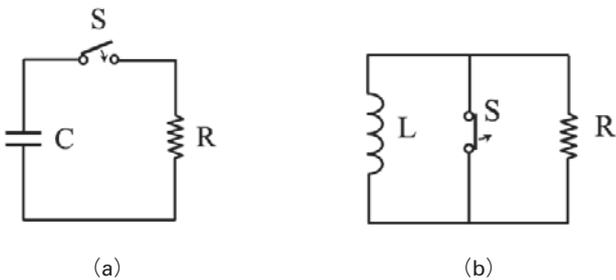


図 2 (a)容量性エネルギーと(b)誘導性エネルギーを抵抗負荷へ出力する理想的な回路。

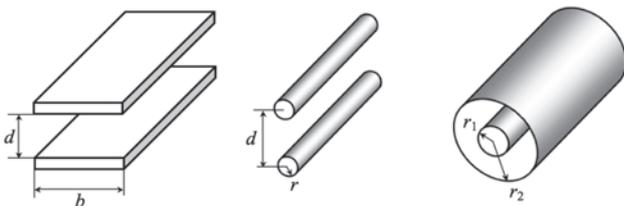


図 3 典型的なパルス成形線路。

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

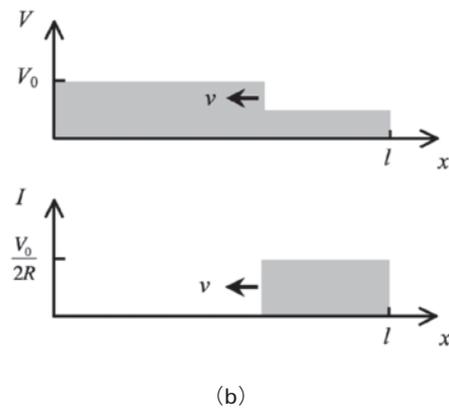
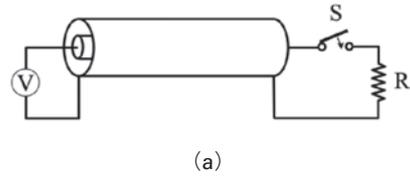


図 4 (a)パルス成形線路の容量性エネルギーを抵抗負荷へ出力する回路、および(b)出力過程を示す概念図。

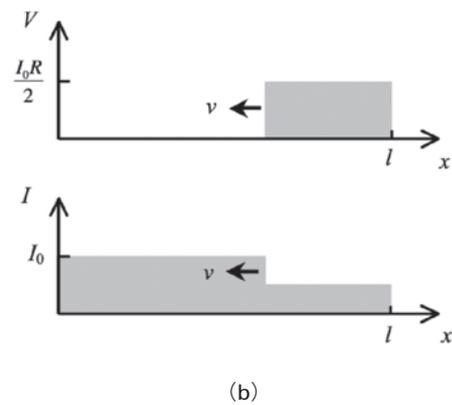
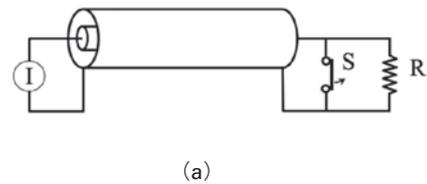


図 5 (a)パルス成形線路の誘導性エネルギーを抵抗負荷へ出力する回路、および(b)出力過程を示す概念図。

$I_0/2$ 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

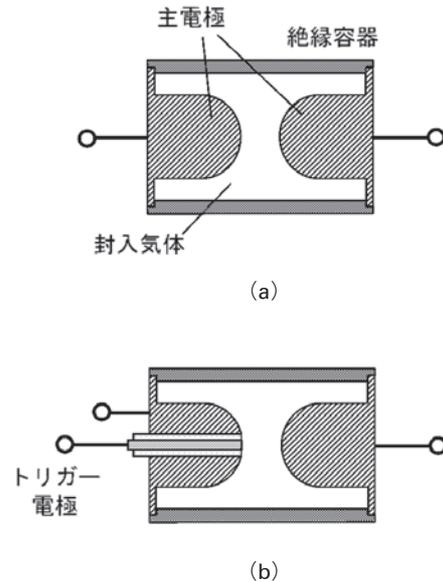


図6 (a)自爆型と(b)外部トリガー型ギャップスイッチの例。

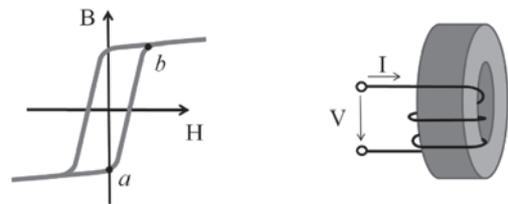


図7 (a)磁性体の磁気特性および(b)磁気スイッチの模式図。

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).