

シリコンパワーデバイスの発展と新材料デバイスの展開（連載２）

岩室 憲幸

筑波大学 数理物質系

第2回 パワーデバイスは「スイッチ」である

電気エネルギーは輸送性、利便性が特に高いことから、電力系統という広域ネットワークを形成し広く社会に浸透している。電力は発電所で作られ、工場やオフィスビル、一般家庭など、日本全国隅々にまで送電されている。広範囲に電気を送る為には、非常に長い送電線等が必要になる。そのため、当然送電中の電圧降下（電力損失）も非常に大きくなり、したがって発電所から送電する電圧もそれを見越して数十万ボルトという高電圧にする必要がある。しかしながら、例えば一般家庭では発電所から送電される高電圧の電力をそのまま使用出来ないため、高電圧から使いやすい低電圧である100V/200Vに下げて使用する。交流はこの高電圧から低電圧に下げる（変圧という）という動作を変圧器（トランス）を使って極めて簡単に行えるため、送電は交流で行われるのである。その結果、家庭のコンセントに差し込んで得られる電力は交流100V/200V（周波数50Hz または60Hz）と決まっているのである。

しかしながら、家庭内で使うパソコンやテレビ、冷蔵庫などの電気機器を動かすための最適な電力の形はそれぞれの機器でバラバラのため、たとえば交流100V-50Hzの電力を各電気機器に最適な電力の形（交流または直流、周波数・電圧の高低など）に変換する必要がある。ここに登場するのがパワーデバイスを使ったパワーエレクトロニクス技術なのである。つまりパワーエレクトロニクス技術とは、パワーデバイスを用いて電力を制御し、電力をそれぞれの機器に使いやすい形に効率よく変換する技術なのである。

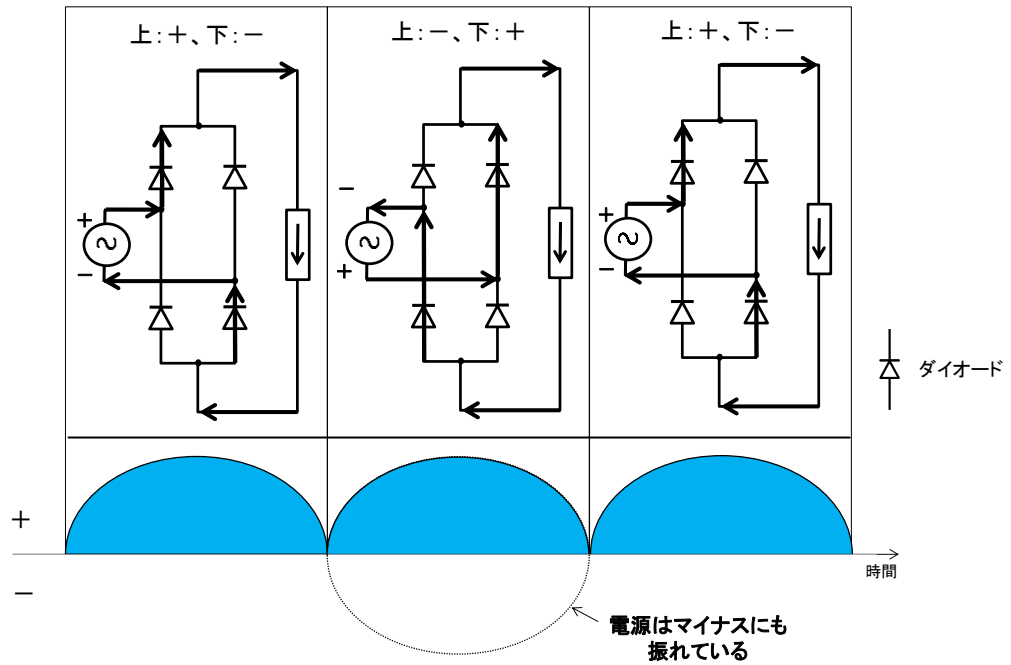
図1に示したのはパワーエレクトロニクス回路の基本である、コンバータ回路ならびにインバータ回路である。コンバータ回路とは、交流を直流に、インバータ回路は直流を交流に電力を変換する回路のことで、それぞれにダイオードやトランジスタといったパワーデバイスが使われている。この図からもわかるように、パワーデバイスに電流が流れたり、遮断したりすること、つまりパワーデバイスを「オン」したり「オフ」したりすることで電力を変換しており、このことから電力変換はパワーデバイスをスイッチとして使うことで電力変換を実現していることがわかる。ちなみに、スイッチであればダイオードとかトランジスタといった半導体を使わずに金属接点を有する機械式リレーを使ってもよさそうであるが、①半導体のほうが電気信号でのコントロールが簡単②機械式リレーだと接点が摩耗して長期間使えない③半導体だと電気信号で一秒間に約1,000~10,000回程度のスイッチングが可能、などの理由で半導体デバイスが使われている。図2はパワーデバイスの種類をまとめたものである。受動素子であるダイオードと能動素子であるトランジスタ系素子に大きく分類さ

れ、さらに能動素子は自己消弧能力の有無により、サイリスタ、トライアックなどのデバイスとGTOサイリスタ、バイポーラトランジスタ、MOSFET、IGBTのそれに分けることができる。

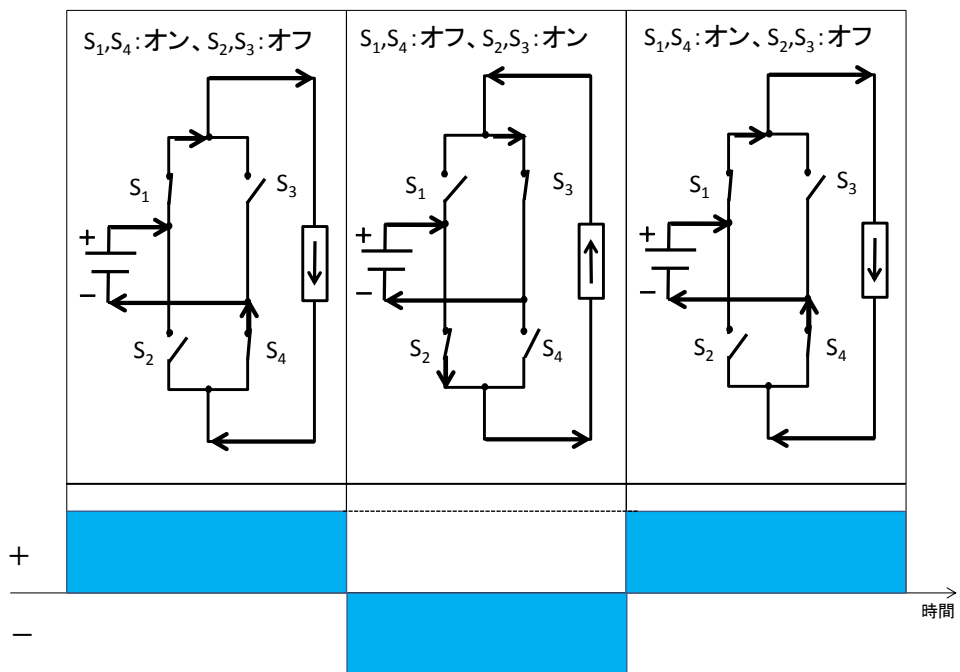
各種電気機器の省エネのためには電力変換の高効率化が重要であり、このことは言い換えれば、いかに損失を発生することなく入力された電力を使いやすい形に変換して出力するかがポイント、ということである。そのためにパワーデバイスに要求される主な性能は、スイッチとして動作する際の損失が小さいこと、具体的には①電流導通時の電気抵抗が低いこと、②スイッチング速度が速いこと、となる。さらに③動作中にスイッチが壊れないこと、この三つが要求される重要な特性となる。ところが、たとえば電気抵抗を下げようとすると一般的にはスイッチング速度が遅く、または壊れやすくなる。つまりパワーデバイスの上記三特性はすべてトレードオフの関係にある。そこで、これら特性のいずれも犠牲にすることなく同時に改善することが「パワーデバイスを開発する」、ことなのである。

1947年、世界で初めての半導体デバイスである点接触型トランジスタがアメリカAT&Tベル研究所のショックレーらにより発明された。その当時の半導体材料は、実はシリコン(Si)ではなくゲルマニウム(Ge)を使っていた。Geはその材料物性値であるバンドギャップ E_g が0.66eVと小さいため素子耐圧を高くすることが難しく、かつ半導体として動作する最高温度が約40°Cと低いこともあって、パワーデバイスとしては不向きであった。そこで、バンドギャップ E_g が1.12eVと大きく十分な素子耐圧が確保でき、高温150°Cでも動作が可能で、なおかつ地球上で二番目に多い元素と言われ豊富に存在するSiがパワー半導体材料として多く使われるようになった。そして今では、そのSiよりも高温で高耐圧動作が可能なSiCやGaNへと転換しようとしている。これら材料の変遷も、結局は上記三つの特性を同時に向上させようとする要請に応えるものなのである。

パワーデバイスの市場は近い将来2兆円を超えともいわれNANDフラッシュメモリーと同等の大きな市場である。パワーデバイスの代表的な応用市場を図3に示す。OA・家電用途から自動車、大型産業機器、電力用機器まで幅広く使われているが、スイッチングデバイスとしてそのほとんどがMOSFETとIGBTで占められている。しかしながら30年前の1980年代前半まではバイポーラトランジスタやサイリスタが主役を務めていたのである。バイポーラトランジスタやサイリスタがなぜ市場から消えていったのか？MOSFETやIGBTのどんな特性がパワーデバイスユーザーに受け入れられたのか。次回はMOSFET、IGBTの開発の歴史を振り返りながら、現在の地位を築くまでに至った理由を明らかにしたい。



(a)交流から直流への変換(コンバータ)



(b)直流から交流への変換(インバータ) (S₁~S₄にトランジスタが使われる)

図1. 電力変換の方法

いろいろな種類のパワーデバイスがある

}	<p>受動素子: ダイオード</p>	<p>整流用ダイオード ショットキバリアダイオード ファストリカバリダイオード</p>
	<p>能動素子</p>	<p>自己消弧能力なし... サイリスタ、トライアック</p> <p>自己消弧能力あり... GTO サイリスタ パワートランジスタ パワーMOSFET IGBT など</p>

図2. パワーデバイスの種類

MOSFET, IGBTの適用分野が拡大

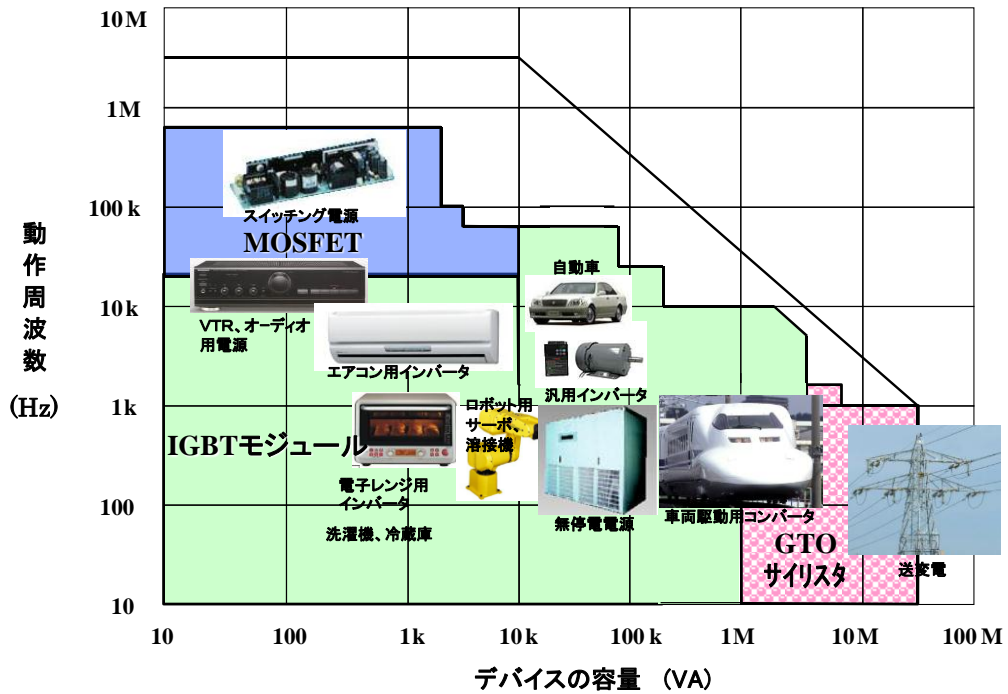


図3. 現在のパワーデバイス適用分野