

# エンジニアの悩みを解決 パワーエレクトロニクス

—— パワーデバイスを使いこなす設計・計測・自動車への展開 ——

高木 茂行

【編著】

長浜 竜・服部 文哉・今岡 淳

佐藤 大介・平沢 浩一・向山 大索

【共著】

コロナ社

## 執筆者一覧

---

### 〈編著者〉

たかぎしげゆき  
高木茂行 (東京工科大学, 1～6章)

### 〈著者〉

ながはま りゅう  
長浜 竜 (岩崎通信機株式会社, 9, 10章)

はっとりふみや  
服部文哉 (元 株式会社パワエレアカデミー, 7.1, 7.2節)

いまおか じゅん  
今岡 淳 (名古屋大学, 7.4, 8.2節)

まとうだいすけ  
佐藤大介 (長岡モーターディベロップメント株式会社, 7.3節)

ひらさわこういち  
平沢浩一 (KOA 株式会社, 8.3節)

むかいやまだいさく  
向山大索 (ルビコン株式会社, 8.1節)

---

(所属は2020年4月現在)

## はじめに

2010年代に起きた二つの出来事は、エネルギーに対する人々の考え方を大きく変えるきっかけとなりました。その一つが2011年3月11日の東日本大震災で、もう一つが2019年10月12日に伊豆半島に上陸した台風19号による甚大な災害の発生です。

東日本大震災の後には、電力不足による計画停電が実施され、福島第一原子力発電所の事故により、われわれは電力・エネルギーの大切さを改めて認識しました。電気の使えない時間が定期的に訪れるというのは、想像を超えた不自由な生活でした。そして、台風19号の襲来は、かつてない巨大台風がいつ上陸してもおかしくない現実をわれわれに突き付けました。台風の巨大化は地球温暖化が原因といわれています。地球温暖化を抑制する脱炭素化社会の実現は、もはや待ったなしなのです。

こうした、環境に配慮したエネルギー問題を解決するため、多くの方法が提案されています。電気電子工学では、発電工学やグリーンエネルギーといった分野がありますが、根幹となるのがパワーエレクトロニクス（以下、パワエレ）であることは間違いありません。

パワエレは、電子回路とパワーデバイス（エレクトロニクス）を使って、電力（パワー）を制御する技術で、発電、送電、電力利用のあらゆる局面で使われています。例えば、太陽光発電は直流出力であり、この電力で家電製品を動かしたり、電力系統に戻したりして使用するには、周波数50あるいは60 Hzの交流100 Vに変換する必要があります。

また、パワエレ技術は、電力分野だけでなくエレクトロニクスの分野でも、きわめて重要です。スマホの充電がワイヤレスでできるようになったのもパワエレ技術の展開です。PC内部には多数の直流電圧変換器が入っており、バッテリーの電圧を、液晶ディスプレイ、USB、SSDなどそれぞれのデバイスに必要な電圧に変換しています。

こうした見地から、もっと多くの学生、研究者、技術者がパワエレの基礎や応用を習得し、新しい技術を創出すべきと考えています。そこで、2017年に

は、パワエレ回路とそれを使ったモータ駆動，パワエレ計測の基礎について解説した『これでなっとく パワーエレクトロニクス』を出版しました。出版後，パワーデバイスについて基礎から実用までを知りたい，電気自動車に使われているパワエレ技術を知りたい，より一層突っ込んだ計測技術について知りたいという意見をいただきました。

そこで，前回計測部分を執筆した長浜氏に加え，パワエレ業界に精通する元株式会社パワエレアカデミーの服部氏を迎えて内容を検討し，高木がパワーデバイス，服部氏が電気自動車，長浜氏が計測技術を執筆担当することを決めました。執筆にあたり，中古のハイブリッドカーを入手してパワーユニットの調査を行い，その調査結果・測定手法を本書に加えました。また，電気自動車の主要なパワエレ要素の解説は各々専門とする今岡氏，佐藤氏，平沢氏，向山氏に依頼しました。

こうした経緯を経て完成したのが本書です。前回のテキストは，その対象をおもに初学者としましたが，本書の電気自動車（7，8章）と計測（9，10章）はすでにパワエレに携わっている技術者，研究者を対象としています。また，パワーデバイス（2～6章）は，初学者はもちろん，パワエレに携わっている技術者，研究者も幅広く活用できるよう心掛けました。

それぞれの項目で，具体的なイメージを持てるよう「実際の波形を測ってみると…」 「実際の〇〇を調べてみると…」の項目を加えました。ここでパワーデバイスの動作波形や実際の部品の写真，構成を紹介しています。

最初に述べましたようにパワエレは，地球に優しいエネルギー開発の基礎となる重要分野です。1人でも多くの学生，研究者，技術者がこの本を活用して新しい技術を開発し，この分野を一層発展させてくれることを切に望みます。

なお，3.4節，4.1.3項，4.4.4項に掲載した測定回路と実際のデバイス写真・波形は，横浜国立大学にて開講された「NEDO 先端パワーエレクトロニクス技術体系教育講座ベーシック・コース 2018 夏学期」でのテキストと実習結果を参考にさせていただきました。教育プログラムへの参加，データ掲載への許可につきまして，横浜国立大学の関係各位に心より感謝いたします。

# 目 次

## 1. サステイナブル社会を実現するパワーエレクトロニクス

1.1	大きな社会問題：地球温暖化	1
1.2	サステイナブル社会に向けて～再生可能エネルギーと電気自動車～	3
1.2.1	温暖化対策とサステイナブル社会に向けた政策	3
1.2.2	再生可能エネルギーの導入	5
1.2.3	電気自動車の普及	6
1.3	サステイナブル社会に向けたノルウェーの挑戦	9
1.4	再生可能エネルギーと電気自動車を支えるパワーエレクトロニクス	11

## 2. 半導体物性が決めるパワーデバイスの特性

2.1	パワーエレクトロニクスとパワーデバイス	14
2.1.1	パワーデバイスの分類と開発の流れ	14
2.1.2	パワーデバイスの特徴と用途	17
2.2	パワーデバイスの理解に必要な基礎物性	18
2.2.1	バンドギャップの正体とバンド図	18
2.2.2	金属，半導体，絶縁物とフェルミレベル	23
2.2.3	純粋な Si の真正半導体と混ぜ物が主役を果たす n 型，p 型	30
2.2.4	電子密度の定量的扱い（半導体工学の鬼門）	35
2.2.5	デバイスの動作速度も支配する移動度	42

## 3. パワーダイオードの耐圧とスイッチング速度

3.1	パワーダイオード	46
3.2	pn 接合型ダイオード	47

3.2.1 pn 接 合	47
3.2.2 高耐圧を実現する pin 構造	50
3.2.3 リカバリー動作と高速リカバリーダイオード	54
3.3 もう一つのダイオード：ショットキーダイオード	56
3.4 実際の波形を測ってみると～pn接合型ダイオードとショットキーダイオード～	57

## 4. パワーデバイスで最も重要な MOSFET, IGBT

4.1 パワー MOSFET	62
4.1.1 低出力用途の横型（プレーナ型）MOSFET	63
4.1.2 高出力用途の縦型 MOSFET	68
4.1.3 実際の波形を測ってみると～縦型 MOSFET の静特性・動特性～	74
4.2 IGBT	77
4.2.1 構造と動作原理	77
4.2.2 トランジスタ部分の特性	78
4.2.3 IGBT の動作特性	80
4.2.4 実際の波形を測ってみると～IGBT のスイッチング波形～	81

## 5. Si デバイスを超えるワイドバンドギャップ半導体

5.1 ワイドバンドギャップ半導体の特徴と用途	84
5.1.1 特 徴	84
5.1.2 広がる応用用途	86
5.2 ワイドギャップ半導体の温度特性	88
5.3 ワイドギャップ半導体の耐圧・抵抗	89
5.3.1 耐圧と ON 抵抗のトレードオフ関係	89
5.3.2 バンドギャップは耐圧の要	90
5.3.3 絶縁破壊電圧と ON 抵抗の定式化	92
5.4 実際の波形を測ってみると～GaN デバイスと Si デバイスの比較～	95

## 6. パワーデバイスと回路をつなぐエンジニアリング

6.1	パワーデバイスの動作点	99
6.1.1	デバイス静特性と負荷線から求まるデバイスの動作点	99
6.1.2	負荷線と動作点	100
6.2	パワーデバイスの損失	103
6.2.1	電流で定義されるターン ON, ターン OFF	103
6.2.2	パワーデバイスの損失	104
6.3	パワーデバイスのゲート回路	107
6.3.1	ゲート回路の絶縁	107
6.3.2	ゲート駆動回路の電流と電力	111
6.3.3	MOSFET と IGBT のゲート回路	114
6.4	パワーデバイスの選定・確認	117
6.4.1	安全動作領域とデレーティング	118
6.4.2	デレーティングと信頼性を考慮した電圧・電流	120
6.5	パワーデバイスの発熱	122
6.5.1	とにかく重要な接合部温度	122
6.5.2	熱抵抗による接合部温度の見積り	123
6.5.3	熱抵抗の求め方	127
6.6	ハイブリッドカーのパワーデバイスユニット	128

## 7. パワーエレクトロニクス技術のかたまり・電気自動車

7.1	電気自動車とは	130
7.1.1	電気自動車の歴史と普及の背景	130
7.1.2	電気自動車のメリットとデメリット	132
7.1.3	エコカー（対応環境車）の種類	134
7.1.4	電気自動車の実力は	138
7.2	ハイブリッド・電気自動車に使われているパワーエレクトロニクス技術	140
7.2.1	PCU と は	140

7.2.2	PCU の構成と回路	141
7.3	電気自動車におけるモータ制御	143
7.3.1	力行と回生	144
7.3.2	電気自動車用インバータの基本	145
7.3.3	インバータの動作原理	145
7.3.4	インバータで任意の電圧を出力する方法	149
7.3.5	PWM のスイッチングパターン生成方法	150
7.3.6	過変調動作と 1 パルス動作の利用	152
7.3.7	デッドタイムの必要性	154
7.4	DC-DC コンバータ	155

## 8. 電気自動車に使われる受動素子

8.1	コンデンサ	160
8.1.1	コンデンサの基本原理 (電気容量と誘電体特性)	160
8.1.2	コンデンサのインピーダンス特性	162
8.1.3	コンデンサの種類とその用途	166
8.1.4	電気自動車用コンデンサを設計する	168
8.1.5	電気自動車用インバータのフィルムコンデンサ	174
8.1.6	実際の電気自動車用インバータのフィルムコンデンサを調べてみると	176
8.2	インダクタ	181
8.2.1	インダクタの基本原理	181
8.2.2	パワーエレクトロニクス回路に使用される磁性体コア	185
8.2.3	電力変換回路上でのインダクタと高周波動作・サイズの関係	187
8.2.4	磁気回路法を使って電気自動車用インダクタを設計する	190
8.3	抵抗	202
8.3.1	抵抗の基本原理	202
8.3.2	抵抗の用途と選定・使用上の注意点	205

## 9. パワーエレクトロニクス測定に利用する電圧・電流プローブ

9.1	パワーエレクトロニクスに必要とされる回路機能とプローブ	216
9.1.1	パワーエレクトロニクスの機能	216
9.1.2	パワーエレクトロニクスの測定に使われるプローブ	219
9.2	電圧プローブ	220
9.3	電流測定用センサ	230
9.3.1	間接測定方式プローブの原理および特性	231
9.3.2	間接検出の電流プローブ	234
9.3.3	直接検出の電流プローブ	239

## 10. パワーエレクトロニクスの測定項目と測定事例

10.1	パワーエレクトロニクスに必要とされる回路機能と測定器	244
10.2	電圧・電流波形を測定する	245
10.2.1	デジタルオシロスコープ	245
10.2.2	アイソレーションディジタイザ	251
10.3	電力（瞬時電力および平均電力）を測定する	253
10.3.1	瞬時電力測定	253
10.3.2	パワーアナライザ（平均電力測定）	254
10.4	デバイスのスイッチング特性を測定する	259
10.5	受動部品の特性を測定する	264
10.5.1	周波数特性	264
10.5.2	磁性体材料試験	271
10.6	実際の波形を測ってみると～高速パワーデバイス GaN のスイッチング～	275
10.7	実際の波形を測ってみると～ハイブリッド車のインバータと双方向チョッパ～	282
引用・参考文献		287
索引		292

# 1. サステイナブル社会を実現する パワーエレクトロニクス

地球温暖化が大きな社会問題であることはだれもが認識している。2015年に採択されたパリ協定では、温暖化による温度上昇を産業革命前の2℃以下に抑制する目標が定められた。これを実現するためには、2000年代後半の化石燃料使用量を限りなくゼロに近づける必要がある。自然界に存在する再生可能エネルギーを導入し、二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）を排出しない電気自動車の普及させることで、**サステイナブル**（sustainable：持続可能な）社会を実現すること期待されている。北欧の国ノルウェーでは、エネルギーの97%を水力でまかない、販売された車の50%以上が電気自動車となり、サステイナブル社会を着実に実現しつつある。こうした再生可能エネルギーの導入と電気自動車普及を実現するキーテクノロジーが、電力（パワー）を、パワーデバイスと電子回路（エレクトロニクス）で制御するパワーエレクトロニクスである。

## ■ ■ ■ 1.1 大きな社会問題：地球温暖化 ■ ■ ■

地球温暖化が議論され始めた当初、地球の周期変動で温度が高くなっているという否定的意見も多かった。しかしながら、いまでは地球温暖化はだれもが認識する緊急の社会問題となっている。図1.1はその原因がCO<sub>2</sub>にあり、人類にとって解決のハードルが高い問題であることを明確に示している<sup>1)†</sup>。

われわれの快適な生活は大量のエネルギー消費の上に成り立っており、その80%近くが天然ガス、石油、石炭といった化石燃料に依存している。ところが、化石燃料の大量の使用は、大量のCO<sub>2</sub>を発生させ、これが地球温暖化の

† 肩付き数字は、巻末の引用・参考文献の番号を表す。

## 2 1. サステイナブル社会を実現するパワーエレクトロニクス

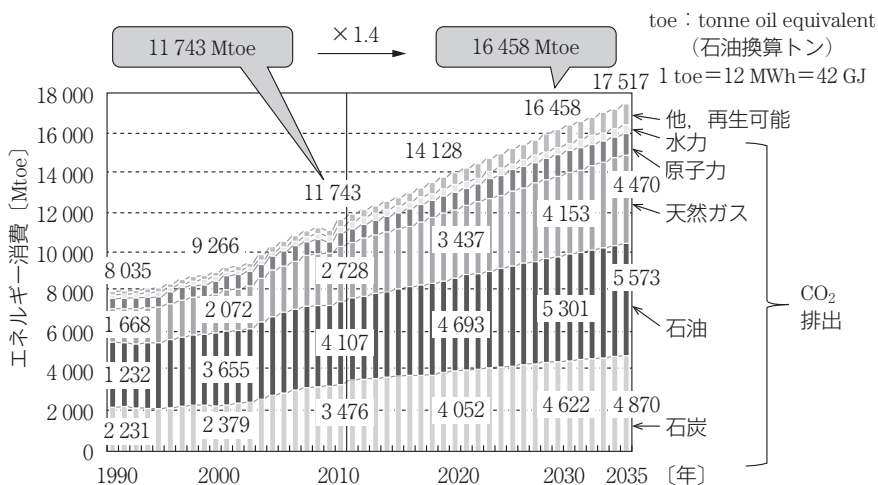


図 1.1 エネルギー消費の推移と予測<sup>1)</sup>

原因となっている。自然界にある太陽光や風力などのエネルギーは再生可能エネルギーと呼ばれているが、その割合は数%にすぎない。われわれの快適な生活は、地球温暖化の原因となる大量のCO<sub>2</sub>排出との交換に得られている。そしてさらに深刻なことに、エネルギー使用量は今後も増え続け、2030年には2010年の1.4倍と予想されていることだ。

温暖化の原因と推定されているCO<sub>2</sub>濃度について示したのが図 1.2 のグラ

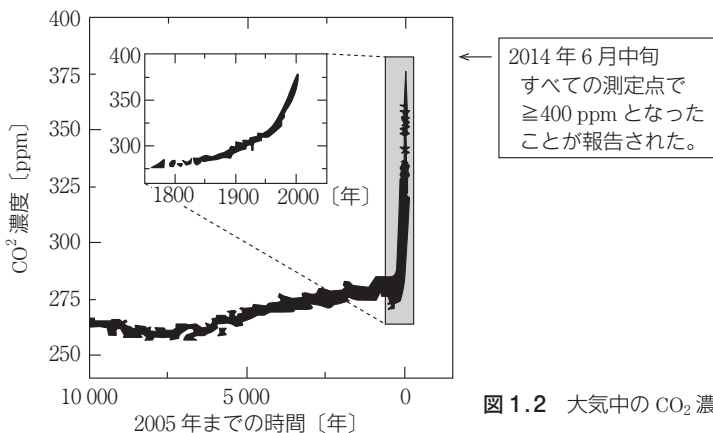


図 1.2 大気中のCO<sub>2</sub>濃度の増加<sup>2)</sup>

フである<sup>2)</sup>。横軸の時間は2005年を0年として、それまでの時間(2500年/1目盛)で表示している。左上は、時間を拡大して西暦単位で表示したグラフである。いわゆる1900年以降の産業革命が起きるまで、地球のCO<sub>2</sub>濃度は280ppm以下で維持されていた。これ以降、CO<sub>2</sub>濃度は徐々に増加し、2000年には375ppmにまで増加している。さらに、2014年4月には異常気象が発生することが予想されている400ppmにも達している。

CO<sub>2</sub>濃度が増加し始めた1900年以降の地球の平均気温を示したのが**図1.3**である<sup>3)</sup>。平均気温は変動を繰り返しながら、徐々に高くなっている。2019年時点で、平均気温が最も高かったのは2016年、2位が2015年、3位が2017年というように、最も高い気温の記録はこの数年間に集中している。このように、多くの人は地球温暖化の対策は待ったなしと思いながらも、CO<sub>2</sub>を放出し続ける大量エネルギー消費から抜け出せないでいる。

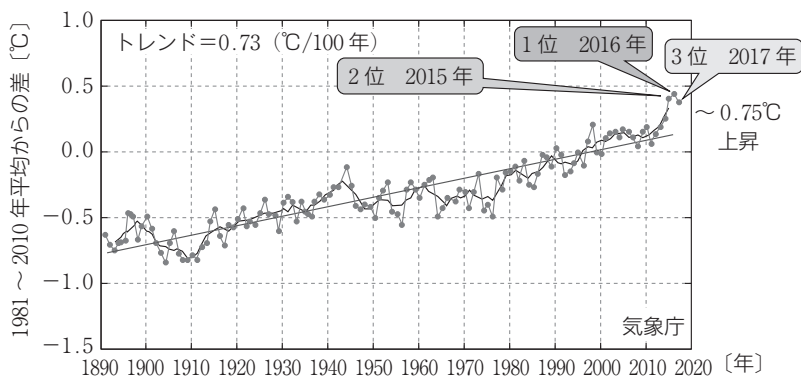


図 1.3 世界の平均気温<sup>3)</sup>

## 1.2 サステイナブル社会に向けて ～再生可能エネルギーと電気自動車～

### 1.2.1 温暖化対策とサステイナブル社会に向けた政策

温暖化が社会問題と認識され、1997年12月に京都市で開催された国際会議では、気候変動に関する国際連合枠組み協約の**京都議定書**が採択された。これ

#### 4 1. サステイナブル社会を実現するパワーエレクトロニクス

により CO<sub>2</sub> を初めとするメタンなどの温室効果ガスに対し、先進国における 1990 年を基準とした削減率を各国別に定め、一定期間に目標値を達成することが定められた。同時に、暮らし、経済環境を維持しながら地球環境を維持している **サステイナブル**（持続可能な）社会の重要性が認識されるようになった。

京都議定書は先進国を中心した温室効果ガス対策を示すものであり、発展途上国も加わった削減の枠組みが必要となった。このため、2015 年 12 月には、**図 1.4** に示すように 196 の国が参加する初めての **パリ協定** が採択された。協定では、温室効果ガスによる全世界の気温上昇を産業革命前の 2℃未満に抑えるという目標とともに、1.5℃に抑えるよう努力することが盛り込まれた。国連 IPCC からは、「2017 年の時点で 1.0℃上昇しており、温室効果ガスの排出がこのペースで続くと、2040 年頃にはパリ協定の努力目標 1.5℃には達する」ことが報告されている。

##### パリ協定

- 2015 年 12 月 12 日に採択
- 196 の国と地域がすべて参加する 2020 年以降の温暖化対策



##### 内容

- ① 気温上昇を産業革命前に比べ 2℃未満に抑える目標とともに 1.5℃に抑えるよう努力する
- ② そのために、21 世紀の後半に世界の温室効果ガス排出を実質ゼロにすること

図 1.4 パリ協定とその内容

1.1 節で述べたように、現在の社会生活は化石燃料を多用したエネルギー基盤を前提としている。しかしながら、パリ協定で目標としている 2.0℃あるいは努力目標として 1.5℃を達成するには、21 世紀の後半に世界の温室効果ガス排出をゼロにする必要があり、以下のような結論となる。

21 世紀の後半には、化石燃料が使えなくなる

### 1.2.2 再生可能エネルギーの導入

化石燃料の削減に向けたサステイナブルなエネルギー基盤として提案されているのが、**再生可能エネルギー**（renewable energy）の導入である。再生可能エネルギーは、自然界に存在するエネルギーで、利用・消費してもそれ以上の速度で補充されるエネルギーである。図 1.5 に示すように、気象変化に由来する太陽光、風力、水力、生物に蓄えられるバイオマスやバイオエタノール、地球の内部に蓄えられた地熱などのエネルギーである。

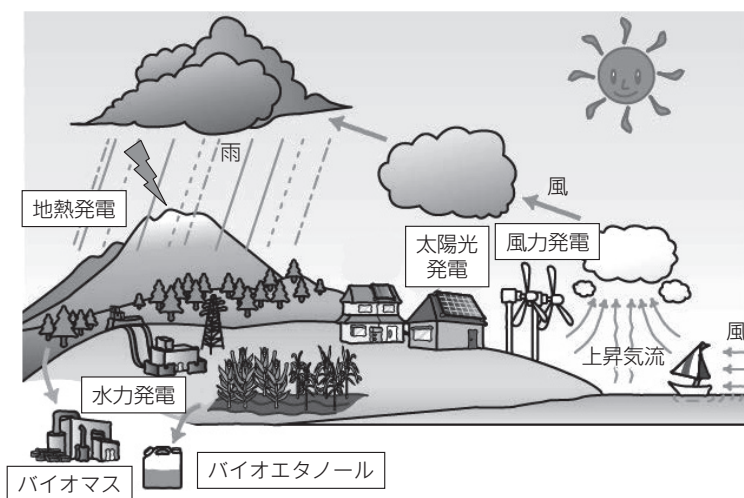


図 1.5 再生可能エネルギー<sup>4)</sup>

図 1.6 に再生可能エネルギーへの投資額を示しており、この額に応じて再生可能エネルギーが増加している<sup>5)</sup>。これらのなかで、水力発電は最も早くから開発が進められてきた再生可能エネルギーである。国内では商業ベースで利用可能なエネルギーはほぼ開発が終わっており、今後大幅に増加する余地がほとんどない。また、地熱はそのエネルギー源が火山や温泉地といった国立公園内に存在している。環境保全との共存が課題となり、投資額は少なくなっている。これに対して、その発電効率の向上とともに、風力、太陽光の投資額が急速に増加している。

# 索引

<b>【あ】</b>		ガウスの定理	52	高速リカバリー	
アイソレーション		拡張スタインメッツ		ダイオード	56
デジタルイザ	251	方程式	184	高電圧差動プローブ	225, 276, 277
アクセプタ準位	34	価電子帯	19	高電圧シングルプローブ	220, 276, 277
アクティブプローブ	229	カーブトレーサ	262	固体アルミ電解	
アッテネータアンプ	255	カーボンニュートラル	10	コンデンサ	164
圧粉コア	186	過変調動作	153, 284	コモンモードノイズ	226
アモルファス	236	カレントトランス	231, 235	コールコールプロット	270
アルミ電解コンデンサ	166	カレントトランジェューサ	238	コレクタ	78, 80
アレニウス則	169	<b>【き】</b>		コンバータ	141
安全動作領域	118	寄生ダイオード	70	<b>【さ】</b>	
<b>【い】</b>		基本周波数	149, 257, 284	再生可能エネルギー	5
移動度	35, 42, 66	キャリア	35	最大磁束密度	190, 195
インバータ	145, 218	急速放電抵抗	206	最大電界	53
インピーダンス		京都議定書	3	サステイナブル	1, 4
アナライザ	264	金属薄膜抵抗器	214	差動ペアプローブ	222
インピーダンス特性	222, 227	金属板抵抗器	211	サブハーモニック	
<b>【う, え】</b>		<b>【く, け】</b>		変調方式	150
上アーム素子	146	空乏状態	66	三相インバータ	141, 147
エコカー	130, 134	空乏層	47	三相交流モータ	143
エネルギー準位	21	グランド基準	222, 225	三倍高調波重畳方式	151
エミッタ	78, 80	クランプ式電流プローブ	231	サンプリング	249
エリアプロダクト法	189, 195	ゲート	63, 80	<b>【し】</b>	
エレクトロンボルト	28	ゲート抵抗	111, 207	しきい値電圧	66
円形コア	271	ケルビンフィクスチャ	269	磁気回路	192
<b>【お】</b>		ケルビンリード	265	磁気回路法	190
オフセット電位	226	ケルビンリードフィクスチャ	266	磁気抵抗	182
折込み構造シャント抵抗	241	<b>【こ】</b>		磁性体コア	181
<b>【か】</b>		降圧チョップ	141	下アーム素子	146
回生	7, 144	降圧チョップ回路	156	四端子測定法	267
		公称抵抗値	203	実行密度	38
		高速フーリエ変換	170	シャント抵抗器	211
				主回路給電方式	110
				主回路コンデンサ	174



パリ協定	4	フォトカブラ	114	ミラー効果	208
パルス幅変調	149	負荷線	102	無誘導巻き	210
パワーアナライザ	254	輻射	125		
パワーエレクトロニクス	11	不純物	30	<b>【ゆ,よ】</b>	
パワーデバイス	14	ブートストラップコンデンサ		有限要素法	172
搬送波	150		115	有効質量	37
反転状態	66	ブートストラップ方式	110	誘電損失	161
バンドギャップ	19	プラグインハイブリッドカー		ユニポーラ素子	16
バンド図	23		136	横型 MOSFET	62
汎用シャント抵抗	239	フラットチップ抵抗器	207		
		ブリーダ抵抗	206	<b>【り,れ,ろ】</b>	
<b>【ひ】</b>		ブリチャージ抵抗	205	リカバリー時間	55, 59
光アイソレーション計測	276	プレーナ型 MOSFET	62	リカバリー動作	54
光ファイバ	114			力行	144
非固体アルミ電解		<b>【へ,ほ】</b>		リプル	216, 217
コンデンサ	163	平衡ブリッジ法	266	リプル電流	170
非線形動作	154	ベース	78	レグ	147
ヒューズ機構	179	ヘビーエッジ構造	179	ロゴスキーコイル	231
表面実装シャント	239	変調波	150	ロゴスキーコイル	
表面実装用固定抵抗器	207	ホウ素	30	電流プローブ	234
		飽和領域	42	ローサイド	107
<b>【ふ】</b>		ボディダイオード	70	ロジック信号	218
フィードバック抵抗器	214	ホール	25, 33		
フィルタ回路	217			<b>【わ】</b>	
フェライトコア	185	<b>【ま,み,む】</b>		ワイドギャップ半導体	84
フェライト磁性体材料	236	巻線	181	ワイドバンドギャップ	
フェルミ分布関数	37	窓面積	189	半導体	84
フェルミレベル	26	ミラー期間	74, 77, 111	ワイヤプローブ	223

A-D 変換	246	ESR	162	n 型半導体	33
AL 値	182	EV	9	n チャネル型	64
$A_p$ 値	196	FEM	172	OFF 損失	105
B-H アナライザ	184, 271	FET	63, 170	ON 抵抗	70, 90, 105, 261, 263
B-H カーブ	183	FFT	170	PCU	140
CMRR	226, 253	GaN	84	PHV	9
DC-DC コンバータ	155	HVIC	114	pin 構造	50
DC 電源回路	216	IGBT	17, 77	PMLCAP	163
DC バイアス	272	IPM	17	PP フィルムコンデンサ	168
DDS	264	I-V 特性試験	260	p 型	64
DOS	36	Mn-Zn フェライト	185	p 型半導体	34
DFT	256	MOS	63	p チャネル型	64
DPLL	256	MOSFET	17, 62, 64	SiC	84
DSP	264	Ni-Zn フェライト	185	SOA	118
ESI	168	n 型	64	sp <sup>3</sup> 混成軌道	31