高性能・高機能を目指すパワー半導体

重兼　寿夫（しげかね　ひさお）

1　まえがき

富士電機は，1953年にセレン整流体の製造を開始して以来，1959年にシリコンダイオード，1961年にサイリスタ，1975年にディスクリートBJT（Bipolar Junction Transistor），1980年にBJTモジュール，1986年にパワーMOSFET（Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor），1987年にディスクリートIGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor），1988年にIGBTモジュール，1989年にBJT-IPM（BJT-Intelligent Power Module），1993年にIGBT-IPMと，次々に新型のパワーデバイスを市場に送り出し続けてきた。

1991年以降は，これらのデバイスの高性能化・高機能化に取り組み，現在では，IGBTモジュールやIGBT-IPMなどに代表される産業用パワーエレクトロニクス装置用のパワーデバイス，パワーMOSFETや整流素子に代表される情報・民生機器用パワーデバイス，スマートMOSやIPD（Intelligent Power Device）に代表される自動車電装機器用パワーデバイスなどの特徴あふれる豊富な製品系列をそろえ市場で高い評価を得ている。

また，後で詳細を述べるように，パワーデバイスとパワーエレクトロニクス技術は互いに密接な協力関係を保ち，互いを刺激し合いながら発展してきたが，富士電機は，これを特に重視し，顧客との密接な連携のもとにパワーデバイスの研究開発を進めてきた。

本稿では，その代表例として，パワーデバイスと産業分野の電動機可変速駆動装置の関係を取り上げ，その発展の歴史，最近の開発動向について述べる。

2　パワーデバイスとパワーエレクトロニクス技術の発展

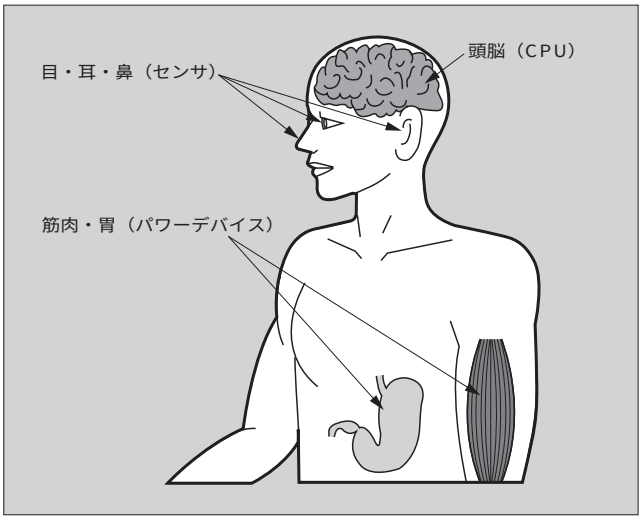
2.1　パワーデバイスと関連する技術の関係

近年の電子装置の発展は，機械を限りなく人間の身体に近づけたいという要求が背景になっているといっても過言ではない。人間の「より遠くを見たい」「どこにいても話しをしたい」「より大きな力が欲しい」という要求が「テレビ」「携帯電話」「ロボット」などを生み出してきた。

機械をより人間の身体に近づけるために電子デバイスの果たしてきた役割は大きい。機械に人体の頭脳に相当するマイクロプロセッサやメモリ，目・耳・鼻に相当する半導体センサなどを適用することで，**図1**のように人体に近づけていく。わけても忘れてはならないのは人体の筋肉や胃を担当するパワーデバイスである。パワーデバイスは「縁の下の力持ち」的な存在であるが，その急速な技術の発展は最先端LSI（Large Scale Integrated Circuit）技術に勝るとも劣らない。

パワーデバイス技術は，パワーデバイスの設計技術とパワーデバイスの応用・適用技術，パワーデバイス用にアレンジした半導体の微細加工技術の三つの主要要素技術が結実したものである。すなわち，パワーデバイスは，**図2**に示すように，パワーエレクトロニクス技術の種々の要求を満たすべく，デバイス設計技術と微細加工技術とを発展させてきたという見方もできるが，逆に，デバイス設計技術と微細加工技術の進歩により新しいパワーデバイスが開発され，これを用いたパワーエレクトロニクス技術を発展さ

図1　パワーデバイスの役割



重兼　寿夫

パワー半導体デバイスの研究開発に従事。現在，電子カンパニーパワー半導体事業部副事業部長兼富士日立パワーセミコンダクタ(株)代表取締役副社長。工学博士。電気学会会員。

せてきたとも見ることができる。このように，パワーデバイスとパワーエレクトロニクス技術は，緊密な関係の下に，互いを刺激し合いながら発展してきた。

種々のパワーエレクトロニクス装置分野における最近のパワーデバイスの進歩に関する共通した話題は，サイリスタ（SCR：Silicon Controlled Rectifier や GTO：Gate Turn-Off thyristor）からパワートランジスタ（BJT，IGBT，MOSFET）への転換である。

図3に，パワーデバイスの適用領域を示すが，IGBT や MOSFET は，急速にその適用領域を拡大し，主流の座を占めるほどになっている。

2.2　電動機の可変速駆動分野の発展の歴史

図4に示すように，電動機の可変速駆動の歴史を見ると 1970 年以降に，直流電動機から交流電動機への切替りという非常に大きな転換が生じており，これを駆動するパワーエレクトロニクス装置は，サイリスタレオナードからトランジスタインバータへの転換が生じている。

1979 年は，日本が第二次オイルショックを経験した年であるが，このような時代的背景の下，省エネルギー化・メンテナンスフリー化などの要求に応えられる交流電動機のインバータによる可変速駆動方式採用の要求が高まりつつあった。インバータ装置の実用化のためには，比較的高速度でスイッチングのできる高耐圧・大容量自己消弧デバイスが必要であるが，この要求に応えられるデバイスとして BJT モジュールが登場し，上記のような大きな転換が生じたといえる。

図5に，サイリスタインバータとトランジスタインバータの比較を示す。この後，インバータ装置に使用されるパワーデバイスが BJT から IGBT に切り替わり，現在では電圧型高周波 PWM（Pulse Width Modulation）制御インバータ全盛の時代になっている。

富士電機は業界に先駆けて BJT モジュールを世に送り出して以来，大容量化やインテリジェント化への進化を遂げさせ，1988 年に登場した IGBT モジュールへと世代交代させてきた。

BJT から IGBT への転換は，その後高まってきたインバータ装置の軽薄短小化や低騒音化の要求に対して，これを実現できる高速度スイッチングが可能で，かつ低損失な IGBT の製造が可能になったことが背景になっている。

一方，パワーデバイスの高機能化の面では，富士電機は，ドライブ回路，過熱検知回路，自己診断回路などを内蔵させた IPM をいち早く開発し，市場に供給した。その後，主デバイスを BJT から IGBT へと移し，IGBT の特性改良とリンクして，小型化・高性能化などを進めている。これまでのパワートランジスタモジュールでは，これを装置に適用するための周辺回路をアプリケーションエンジニア

図2　パワーデバイスと関連技術

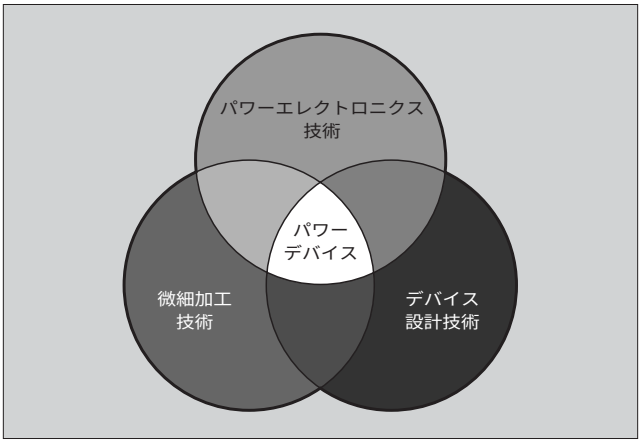


図3　パワーデバイスの適用領域

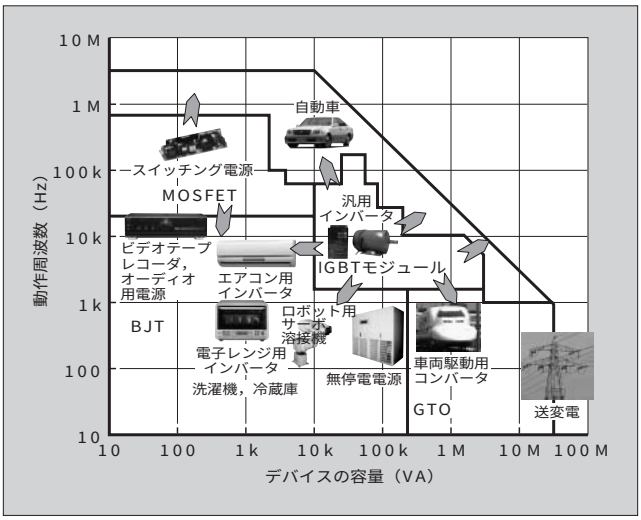


図4　可変速駆動装置とパワーデバイスの歴史

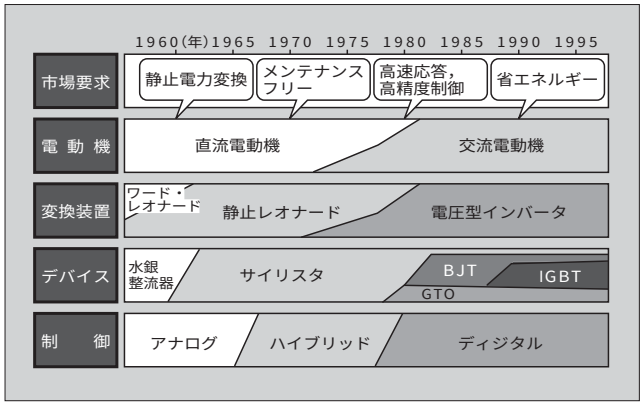


図5　インバータの主回路比較

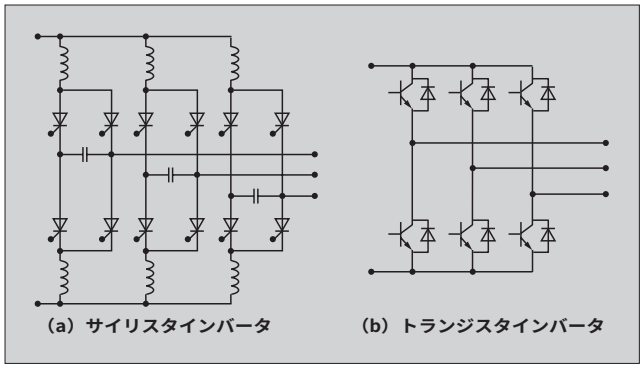
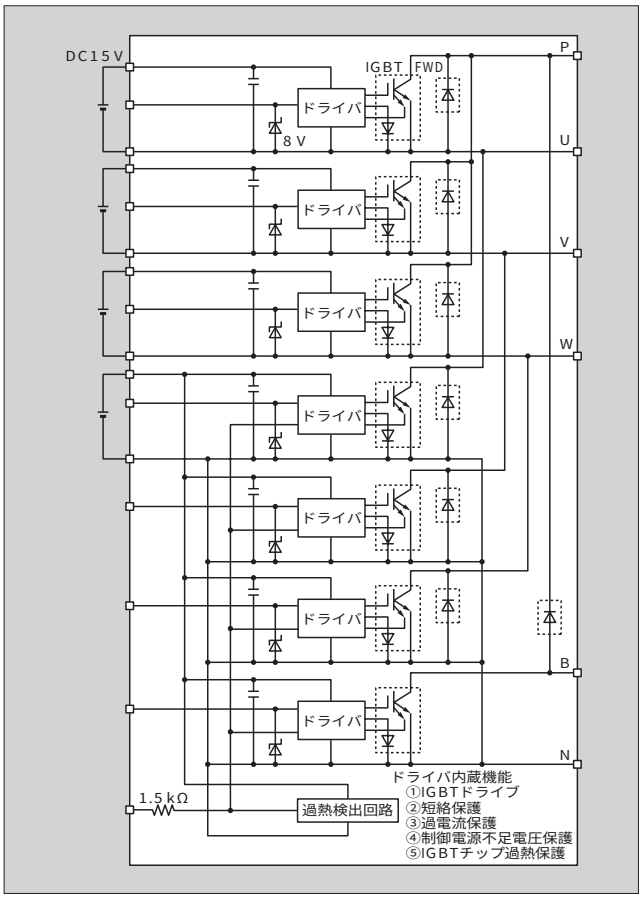


図６　R-IPM３の内部回路図



が設計してやらねばならず，パワーデバイスは，単なる一本の筋肉の筋のようなものであった。これを反射神経を持った筋肉（事故が起これば止まる）のレベルにしたいとの思いで開発を行った。現在，IPM は工作機械やロボットなどの産業用分野のみならず，家庭用エアコンや電気自動車など幅広い分野で使われている。

図６に，最新の IGBT-IPM（R-IPM3）の内部回路図を示す。

③　最近の IGBT の開発動向

図７に富士電機の IGBT に適用した技術の推移を，**図８**に代表例として 1,200 V チップ断面構造の推移を，**図９**に 1,200 V IGBT チップのトレードオフ特性比較を示す。**図９**において縦軸はスイッチング損失を代表するターンオフ損失を，横軸は定常損失を代表する飽和電圧を示す。トレードオフポイントが両軸でゼロに近づくほど，低損失な装置を実現できる高性能なデバイスであることを意味する。

現在は第五世代 IGBT の製品化・系列拡大のステージにあるが，第一世代から第三世代まではエピタキシャルウェーハを用い，ライフタイムコントロールと表面ゲート構造の微細化によって性能構造を追求していた。第四世代以降は，FZ（Floating Zone）ウェーハの採用と NPT（Non Punch Through）化という大きな設計方針の変更による性能向上を追求してきた。NPT 化のためには，

図７　富士電機の IGBT チップ適用技術の推移

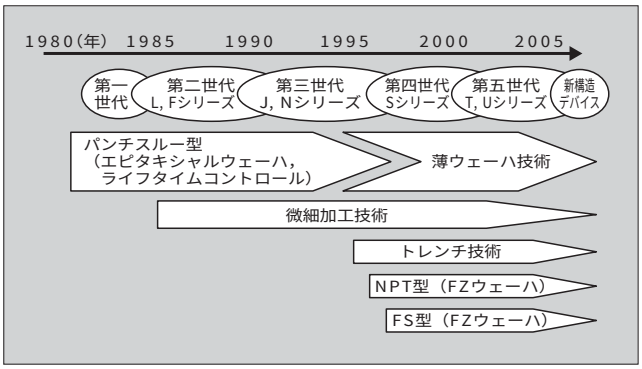


図８　1,200 V IGBT チップ断面構造の推移

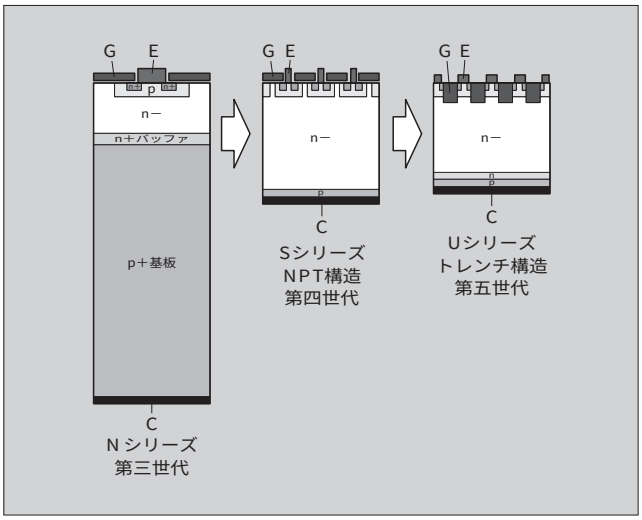
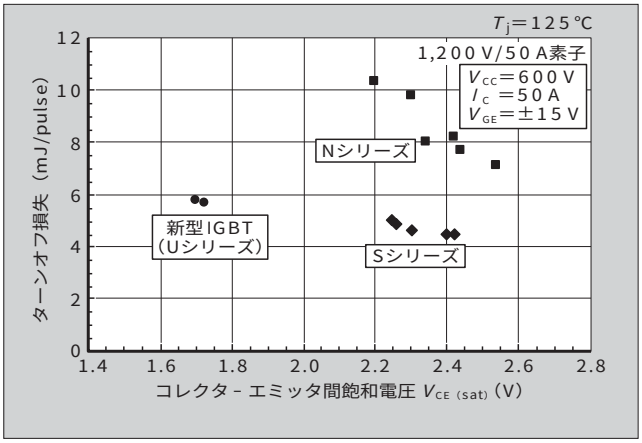


図９　1,200 V IGBT チップのトレードオフ特性比較



ウェーハを薄くする技術の確立が必要であったが，これにより，性能向上ばかりか，ライフタイムコントロールが不要となりデバイス特性の製造上のばらつきが低減されることにもなった。第五世代ではさらに，表面ゲートへのトレンチ構造の採用と，FS（Field Stop）構造の採用によって，さらなる性能向上を達成している。富士電機は，現在，1,200 V 以上の耐圧の IGBT チップには，トレンチ＋ FS 構造を適用した製品，そして 600V の IGBT チップには NPT 構造を適用した製品の系列化を進めている。

これらのデバイスのキーとなる技術は，ウェーハを 100 μm 程度に薄くし，かつ裏面から拡散接合層を形成する技術である。これらの技術はパワーデバイス特有の技術であるということができる。

現在，第五世代の U シリーズ IGBT モジュールは，各種装置の小型軽量化・高効率化に幅広く貢献している。

4　次世代パワーデバイスの研究開発動向

4.1　SJ-MOSFET

シリコン（Si）を素材とした高耐圧パワー MOSFET の性能は，富士電機が 2000 年に発表したスーパー FAP-G シリーズにより，理論的性能限界に達したとの見方がされていたが，SJ（Super Junction）-MOSFET の性能は Si を材料として使いながら，Si の理論的性能限界といわれていたレベルを軽く超えている。

図10 にチップ断面構造を示すように，SJ-MOSFET ではボディ部分のドリフト領域に pnpn …の不純物領域をサンドイッチ状に形成することにより，空乏層を水平方向に伸ばすことで，従来構造では不可能であった全ドリフト領域の同時空乏化を可能とし，これにより，従来構造よりも不純物濃度を高めて低オン抵抗化を図ることを可能としている。

SJ-MOSFET は，すでに製品化された例も出てきつつあり，富士電機は近日中の製品化を目指して開発を進めている。

4.2　逆阻止 IGBT

富士電機が業界に先駆けて発表した逆阻止 IGBT は，富士電機固有の薄ウェーハ IGBT プロセス技術を発展させて実現したものであり，パワーデバイス技術者とパワーエレクトロニクス技術者の緊密な情報交換・連携により，新たな電力変換方式を提案しようとするものである。

先に述べたように，今や電動機の可変速駆動といえば，電圧型高周波 PWM インバータによる交流電動機の制御が主流を占めている。この方式は，**図11**(a)に示すように商用交流電流をいったん直流に変換して，インバータにより再度，可変周波数・可変電圧の交流電流に変換して出力するものであり，前述のパワーデバイスの研究開発は，この電圧型高周波 PWM インバータへの適用を目的としたものであった。これに対して，**図11**(b)に示すように，商用の交流電流を直接的に可変周波数・可変電圧の交流電流に変換する方式も考えられているが，双方向高速スイッチングデバイスを必要とし，その実用化は困難とされてきた。

従来の IGBT は，エミッタ-コレクタ間の耐圧（逆耐圧）が高くないが，もし，逆耐圧を有する IGBT を実用化できれば，これを逆並列接続することにより双方向スイッチングデバイスを実現できるのではないかと考えたところに逆阻止 IGBT 開発の背景がある。

逆阻止 IGBT を用いた変換装置は，逆耐圧を持たない IGBT で構成した変換装置に比較して，

(1)　2 個の IGBT を介して電流が流れるので，4 個の IGBT を介して電流が流れる逆耐圧を持たない IGBT を使用する方式に比べ，発生損失の低減が可能である。

(2)　直流平滑コンデンサが不要なので，装置の小型・軽量化が可能である。

などの特徴を持つ。

阻止 IGBT 用いた高周波 PWM 制御の直接 AC-AC 変換装置であるマトリックスコンバータは，実用化間近となってきている。

図10　SJ-MOSFET のチップ断面構造

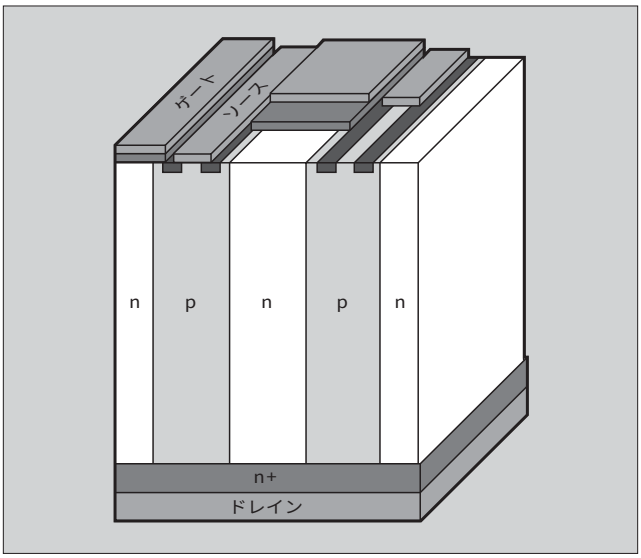
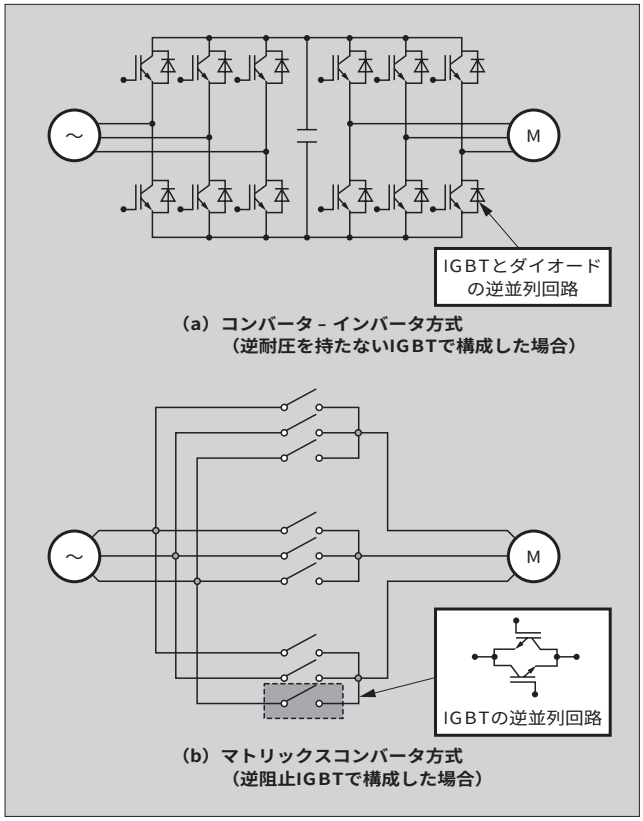


図11　コンバータの主回路比較



5　あとがき

富士電機は，「世界最先端の技術で高性能なパワーデバイスを実現することにより，グローバル No.1 あるいはオンリーワンとなる製品の開発を行うこと」と，「顧客と一体となってパワーデバイスと IC 技術を融合させ，ソリューション提案型のスマートデバイス，インテリジェントデバイスを実現し，提供していくこと」を方針として，顧客の懐の中に入って新製品を開発し，提供してきた。

本稿では，上記の方針に基づいて開発してきた製品の代表例について，開発の歴史や動向を紹介してきた。

パワーデバイスの進歩はとどまるところを知らず，今なお，熾烈（しれつ）な研究開発競争が続いており，逆阻止 IGBT に代表されるように長年主流の座を占めてきた電力変換方式の見直しを迫るようなデバイスの提案も行われている。

富士電機は，今後も，より高度なパワーエレクトロニクス製品の実現に向けて，パワーデバイスのさらなる低損失化・高機能化を強力に推進していく所存である。

参考文献

(1) Sawa, K. My Experiences in Developments of Power Electronics. ISPSD2001. Banquet Keynote Address. 2001.

(2) 21 世紀に向けたパワーデバイスの重点課題．電気学会技術報告．no.666. 1998.

(3) 大西泰彦，藤平龍彦．シリコン超接合デバイス．電子情報通信学会論文誌 C. vol.J85-C, no.11, 2002, p.968-977.

(4) 重兼寿夫ほか．パワー半導体の現状と動向．富士時報．vol.75, no.10, 2002, p.551-554.

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。