

コードレス電動工具： 高出力、バッテリー駆動時間の延長、小型化を実現

使い勝手、携帯性、安全性の向上により、プロの職人、日曜大工（DIY）愛好家の両方がコードレス電動工具市場を牽引しています。継続して工具の軽量化、小型化を図るよう、メーカーに対する要求が高まっています。また、メーカーはバッテリー駆動時間の延長、多様な使い方における長期信頼性の確保に注力しています。これらの要求を満足させる上で、最先端のリチウムイオン電池が役立ちますが、それも全体の一部分の話にしかすぎません。適切なパワー半導体を選択することも、ヒット商品を設計する上で極めて大切なことです。

このホワイトペーパーでは、次世代コードレス電動工具の開発者が直面している課題について述べ、バッテリーの充電からモータ制御まで電動工具の主要な機能ブロックについて、パワー MOSFET 技術の最新の進歩がこれらの課題をどのように解決できるかを説明します。

コードレス電動工具：成長を続ける市場

電動工具の使い勝手、効率、利便性は、プロの職人や DIY 愛好家の間で、電動工具の利用が増えている理由のほんの一部でしかありません。実際、簡単な作業であれば自分で済ませてしまう消費者が増えているため、電動工具の売上は手動工具の売上を急速に上回っています。

調査会社 Future Market Insights によると、電動工具市場は 2015 年で 275.8 億ドルでしたが、2025 年には 464.7 億ドルに達すると見込まれています。これらの市場規模の 70% 以上を北米、西欧、アジア太平洋地域が占めています。

住宅市場の著しい回復、発展途上国における急速なインフラの拡大が、プロのユーザーの需要増を牽引しています。さらに、世界的に DIY 人気が高まっており、特に発展途上国では、収入の増加と都市化に伴って、土地を所有している DIY 愛好家の数が急増しています。

多くの理由がありますが、とりわけ、利便性、携帯性、安全性のため、商用電源で動作するコード式の電動工具からコードレスタイプへと大きく移行しつつあります。バッテリー技術の進歩がこの成長に大きく寄与しています。最新のコードレス電動工具では、旧来のニッカド電池は急速にリチウムイオン電池に置き換わりつつあり、軽量化、バッテリー動作時間の延長、高効率化を可能にしています。

モータの選択肢

コードレス電動工具では、バッテリーの電気エネルギーを工具の仕事を行う動きに変換するモータが中心的な役割を果たします。当然のことですが、コードレス電動工具では何らかの DC モータが使われています。これらのモータは、広範囲の速度制御が可能で、コードレス電動工具の主要な特性である大きな始動トルクを有しています。ところが、モータには多くの選択肢が存在していて、それぞれ利点や性能パラメータが異なります。

ブラシ付きモータは一番古いタイプの DC モータで、長い歴史があります。単純なブラシ付きモータは、電機子（回転子）、整流子、ブラシ、支軸、永久磁石で構成されています。電流は整流子と電氣的、物理的に接触しているブラシの中を移動します。電流が電機子を通過することで、必要不可欠な磁界が生じます。

電機子を取り囲む永久磁石は、電機子により発生した磁界と作用し、それにより、電機子は支軸の周りを回転します。印加する電流が大きくなると、電機子に発生する磁界は強くなり、磁石の相互作用力が増し、それによって回転数が上昇します。

別の選択肢にブラシレス DC (BLDC) モータがあります。名前が示すとおり、ブラシレス DC モータにはブラシがないため、摩擦する機構や摩擦エネルギー損失がありません。ブラシレスモータでは、永久磁石がローターに取り付けられ、それを囲むように電機子の電磁コイルが固定されています。

ブラシ付きモータでは、電機子のコイルを電流が通る際、整流子により電流の向きが逆になり、磁界が反転するため、回転子は回り続けます。ブラシレスモータでは、電子的な制御で電機子の巻線を流れる電流の位相を正確なタイミングで切り替えることで、回転を生み出しています。

一般的に、ブラシレス DC モータのほうがブラシ付きモータよりも高価で、制御も複雑です。ブラシレス DC モータの良い面は低保守・長寿命で、同じ大きさのブラシ付きモータに比べて、一般的に大きなパワーがあることです。

コードレス電動工具の主要ブロック

コードレス電動工具の設計は、メーカーによって独自のアプローチがありますが、電源・モータ間の動力伝達系の原理は大変似通っています。

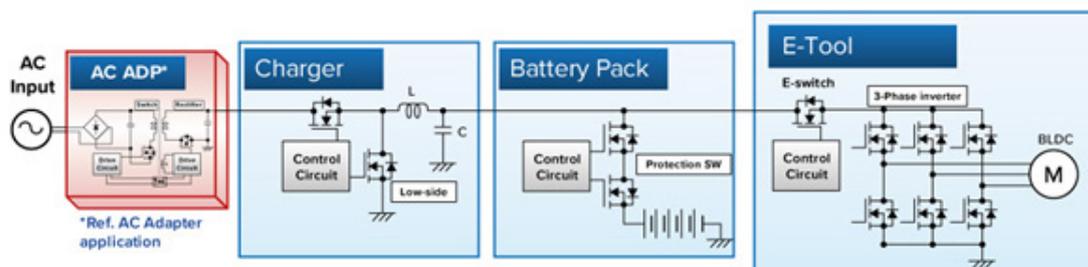


図 1：ほとんどのコードレス電動工具の基本レイアウトは似ています

電動工具を含め、すべてのコードレス機器は、どこかで充電する必要があります。ほとんどの場合、充電は商用 AC 電源から行いますが、太陽光充電など、他の選択肢を採用することも可能です。ほとんどのコードレス電動工具は脱着可能なバッテリーパックを使っていて、長時間連続稼働が可能です。動作後のバッテリーは充電器につなぎますが、多くの場合、充電器は工具本体とは独立しています。

通常、充電スタンドは商用電源から電力を得ます。フロントエンドは AC アダプタで、交流電源を整流し直流へ変換します。次に、電力は充電回路に入り、バッテリーを充電します。充電するバッテリーの種類、サイズはあらかじめ分かっているため、充電器は高度な最適化が可能です。

バッテリーパック自体は、ますます高度化しており、今では相当量のエネルギーを保持できます。電力を安全かつ安定的に工具に送るために、複数の小型セルに沿って制御回路、保護回路が配置されています。

工具にはモータ駆動回路が内蔵されています。モータ駆動回路は制御回路と、三相インバータを形成するディスクリート半導体で構成されています。インバータは正しくブラシレス DC モータを駆動するための電源信号を生成します。

設計者が直面する課題

コードレス電動工具の設計者は多くの課題に直面します。それらの課題の多くは相互に作用し合う関係にあり、中には、対立する関係のものもあります。例えば、人間工学的な考慮は工具の形状を決定するための課題になります。また、多くの場合、工具は長時間使用するため、製品が市場で成功するためには、ユーザーにとっての快適性、利便性が重要な鍵になります。形状は工具・ユーザー間の直接の接点となるため、大切です。また、モータや電子回路が使えるスペースは、工具の形状によって決まります。例えば、工具を右利き・左利きの両利き仕様するような場合、そのために利用できるスペースが制約を受ける場合もありますし、スイッチの配置位置がそれで決まる場合もあります。

もう一つの基準は工具の重さです。これにより、モータ技術（ブラシレス DC モータのほうが軽量）、バッテリー、筐体の設計が決まります。近年、ユーザーはバッテリー残量などの重要な情報が表示されることや、暗い場所や狭い場所での作業を容易にする内蔵 LED 照明などを求めています。これらを実現するには、追加回路が必要で、バッテリー電力を消費します。

バッテリーが一番大きく、もっとも明らかなトレードオフとなる部品の一つです。ユーザーは、より軽量で便利な工具でありながら、同時に、長時間のバッテリー駆動を望んでいます。したがって、設計者はこれらの 2 つの相反する要求に関して最良のバランス点を見つけるという難問に直面します。工具用にいくつかのバッテリーサイズ、容量を提供するのも一つの解決策です。しかし、本当の解は、単位重量当たり最大のエネルギーをもったバッテリー技術を選択し、設計のすべての側面でエネルギーを無駄に消費しないように、できる限り効率を高めることにあります。

価値のある道具である反面、工具はしばしば厳しい使用環境にさらされます。通常の使用状態であっても、作業の性質上、工具は機械的、電気的なストレスとそれらの最大値に耐える必要があります。特にきつく絞まったナットやドリルが詰まって動かなくなるような状況では、必要なトルクを得るために最大の電流を要します。そのような場合でも、制御回路、保護回路により、電子回路やモータが損傷を受けるような大きな電力が瞬間的にもバッテリーから送られないようにしなければなりません。

工具は必然的に過酷な環境で使われます。塵埃、湿気は工具がさらされる危険要素のほんの一例にすぎません。ほかには温度もあります。工具は高い周辺温度で動作することを求められるだけでなく、工具自体が熱の発生源になります。効率を改善することで、工具の温度上昇を抑えることができ、その結果、より高い周辺温度で動作可能になります。

最後に、故障して動かない工具には、いらいらさせられます。そうなると、重要な安全作業が遅れたり、別の方法で作業を完了させるために効率が落ちる方法を使わざるを得なくなり、受託業者は赤字を出してしまうかもしれません。常に確かなことは、工具の故障はメーカーの評価を傷つけるということです。つまり、すべてのコードレス電動工具の設計者にとって、信頼性と堅牢性は優先事項であるということです。

■ 効率に関する課題への対応

工具の設計者にとって極めて重要な 2 つの課題は、使用可能なエネルギーをバッテリーから最大限引き出すことと、そのエネルギーを最大限効率良く処理することです。

近年、バッテリーは著しく進化し、今後も進化し続けるでしょう。一般的に、従来の 12 V と 14.4 V のソリューションは 18 ~ 21 V のカテゴリのバッテリーで置き換わりつつあり、電圧は上昇傾向にあります。さらに最近になると、36 V も選択肢として増えています。これらのバッテリーはより多くの電力を迅速に供給する能力があり、園芸用具やプロ仕様の手動工具などのより大きな製品でよく使われます。

基本的なバッテリー技術はニッカド電池からニッケル水素電池を経て、リチウムイオン電池へと移行してきました。ニッカド電池は充電前に完全に放電しなければならず（いわゆるメモリ効果のため）不便である反面、堅牢性もとても高い技術であり、まだ多くのニッカド電池が使われています。ニッカド電池はニッケル水素電池に置き換わりましたが、ニッケル水素電池は放電サイクルのどの時点でも充電でき、ニッカド電池よりも高い容量をもっていました。今日販売されているほとんどの工具はリチウムイオン系のバッテリーを使っています。この技術はメモリ効果がなく、必要に応じて、フル充電することができます。リチウムイオン電池は、同等のニッケル水素電池に比べて、一般的に 40% 軽量という大きな利点があります。

バッテリー電力を最大限有効に使うために、コードレス電動工具ができるだけ高い効率で動作するような設計が求められます。これは電子回路の設計のあらゆる面に影響しますが、特に、主要なスイッチング素子である MOSFET がもっとも大きな影響をもっています。適切な電力変換トポロジと最適な MOSFET を選択することにより、設計者は良く売れる製品を作り出すチャンスを得ることができます。

もう一度、図 1 を見てください。主要な構成ブロックのすべてが、エネルギーの変換、処理のために MOSFET 技術に依存しています。第一に、商用電源を変換してバッテリーを充電し、そして、蓄えたエネルギーをできる限り効率的な方法で MOSFET で構成されたインバータ回路を通じてモータに供給しています。

■ 最先端の MOSFET 技術は電動工具の課題を解決する

要求の厳しい電力用途、特に、コンパクトなバッテリー駆動機器を成功させるには、最新の低損失パワー MOSFET で、便利な小型パッケージ製品が必要です。

コードレス電動工具の厳しい設計要求に対応するための新しい技術の一つは、当社のトレンチ LV MOSFET（低耐圧 MOSFET）です。例えば、当社の U-MOS VIII MOSFET 技術は、30 ~ 250 V クラスという広い電圧範囲で、豊富な製品ラインナップを提供します。U-MOS IX 技術は 30 ~ 60 V クラスをサポートし、市場でもっとも低オン抵抗の製品も含まれています。U-MOS IX シリーズには、耐圧 40 V で $R_{DS(ON)max}$ がわずか 2.3 mΩ、パッケージサイズが 3 mm x 3 mm の製品もあります。また、耐圧 40 V、パッケージサイズが 5 mm x 6 mm で、 $R_{DS(ON)max}$ が 0.85 mΩ の製品もあります。

U-MOS IX 技術の開発に当たり、当社が重視したのは、パワースwitching用途の損失に影響を与える 3 つの主要パラメータであるゲート電荷量 (Q_g)、オン抵抗 ($R_{DS(ON)}$)、逆回復電荷量 (Q_{rr} ; Q_{oss}/E_{oss} とも表記する) です。ゲート電荷と逆回復電荷は、各スイッチングサイクルで放電されるため、最高速でスイッチングするデバイスではもっとも大きな影響があります。オン抵抗はしばしば導通損失として知られ、MOSFET に電流が印加されている時に無駄な熱を発生させます。

以下の表から分かるように、U-MOS は異なる性能レベル、重要パラメータの組み合わせでラインアップされているので、設計者は個別の用途に最適な製品を選択することができます。

◎ excellent fit, ○ good fit, △ fair fit

Characteristics		Q_g (Q_{sw})	$R_{DS(ON)}$	Q_{rr} (Q_{oss}/E_{oss})	Voltage Lineup
Influence		Switching speed	Conduction loss	Recovery charge	
U-MOS for Low voltage (20V-250V)	U-MOS IX-H	◎	◎	◎	30V-60V
	U-MOS VIII-H	◎	○	○	30V-250V
	U-MOS VII-H	△	△	○	20V-30V

図 2 : 様々な性能パラメータの組み合わせの U-MOS ラインアップ

これらの改善は、それぞれ特定の目的をもった開発により達成されたものです。Q_gとR_{DS(ON)}の関係は大切に、これら2つのパラメータはトレードオフ関係にあります。つまり、静的損失の改善は、動的損失改善と相反関係にあり、その逆も同様です。

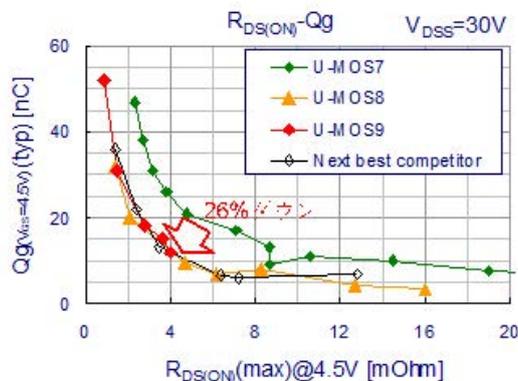


図 3 : U-MOS の世代ごとに R_{DS(ON)}—Q_g 特性が継続して改善

U-MOS の世代ごとに、これらの主要パラメータのトレードオフが改善されてきました。最新の U-MOS IX (U-MOS 9) では、前の世代の U-MOS VII (U-MOS 7) に比べて、R_{DS(ON)}—Q_g が 26% 改善しています。

最新の U-MOS IX-H は、非常に重要な逆回復電荷量に直接影響がある Q_{oss} パラメータをチューニングすることで、逆回復損失を低減しています。逆回復電荷量は損失だけでなく、EMI にも影響し、電流監視に誤差がでることもあります。

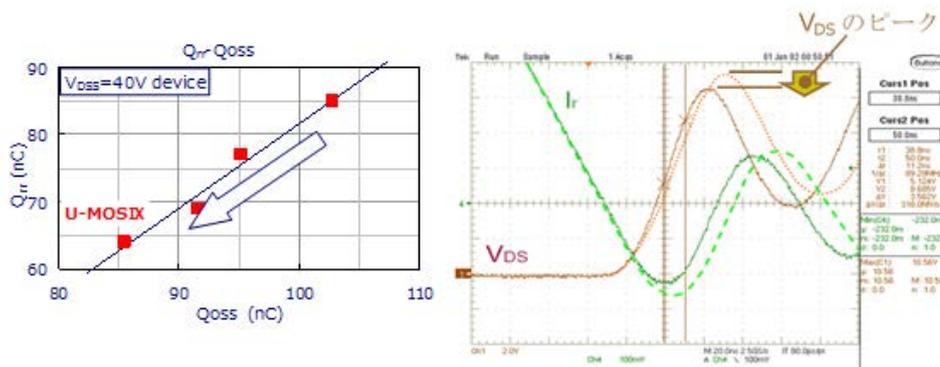


図 4 : 40 V デバイスの逆回復電荷量 (Q_{rr}) —Q_{oss} 特性

最後に、基本的な抵抗も小さくなり、MOSFET の導通損失が低減されています。例えば、U-MOS IX-H シリーズの 5 mm x 6 mm パッケージ品では、標準値において、30 V で 0.36 mΩ、40 V で 0.65 mΩまで小さくなっています。将来 100 V 品、80 V 品でさらにラインナップを拡大していく予定です。

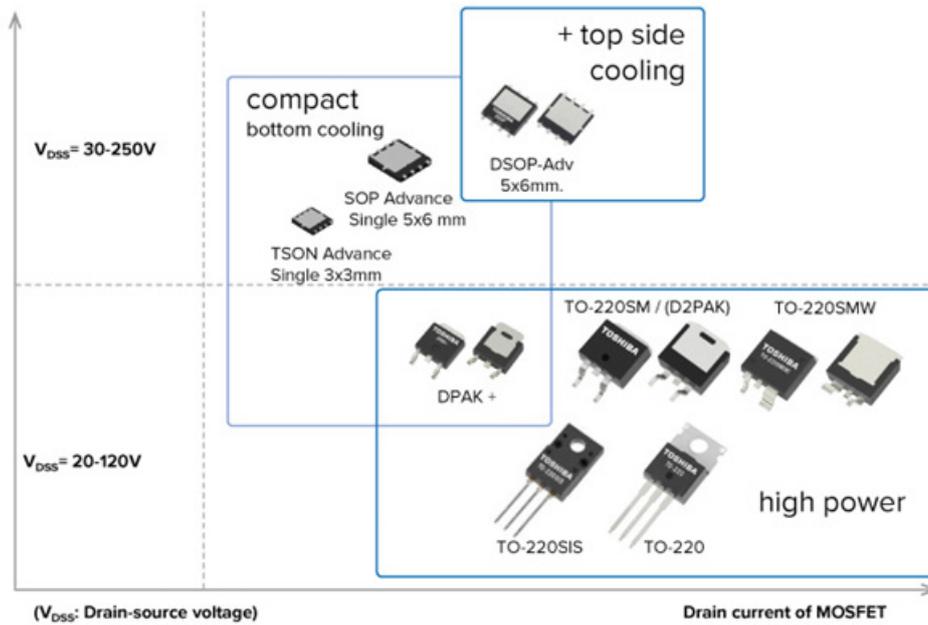


図 5 : 40 V デバイスの逆回復電荷量 (Q_{rr}) - Q_{oss} 特性

筐体を有する用途では、デバイスをスペース内に収められるように、様々なパッケージタイプがあることは大切なことです。また、新たに追加された放熱機能により、熱は迅速かつ容易に工具の筐体へ、そして、最終的に大気中に逃がすことができます。当社の LV-MOSFET は多様なパッケージで提供されています。パッケージには、パッケージ下面から放熱される 3 mm x 3 mm の TSON Advance や 5 mm x 6 mm の SOP Advance などの業界標準パッケージタイプや、パッケージの上面と下面の両面から放熱される DSOP-Advance などがあります。

また、業界標準の多様なパッケージでラインナップされていることのもう一つの利点は、既存のデバイスを同じフットプリントのパッケージ品でアップグレードすることができることです。これにより、ボードを再設計するリスクなしで、既存製品に最新の開発品を適用することができます。

SOP Advance は高性能パッケージと考えられていますが、DSOP Advance は、シリコンチップからボードおよびヒートシンクへ直接熱が伝わるため、性能が飛躍的に向上しています。これにより、DSOP Advance は熱伝導性が大幅に改善しています。このパッケージのデバイスはスペースや放熱設計が制限されることが多いコードレス電動工具に最適です。

DSOP パッケージに匹敵するのが、従来からある比較的高価なメタル缶パッケージです。メタル缶パッケージでは X 線を使ってはんだ接合部を制御する必要がありますが、DSOP パッケージでは端子の一部が露出しています。

また、他社の両面放熱のプラスチックモールドパッケージと比べて、当社の DSOP は上面のコネクタが広いという利点があります。最終的に、これによりパッケージ上面への R_{th} が大幅に改善されます。既存の 5 mm x 6 mm の標準品から最新の DSOP 品へとアップグレードするのは、単純な手順になります。

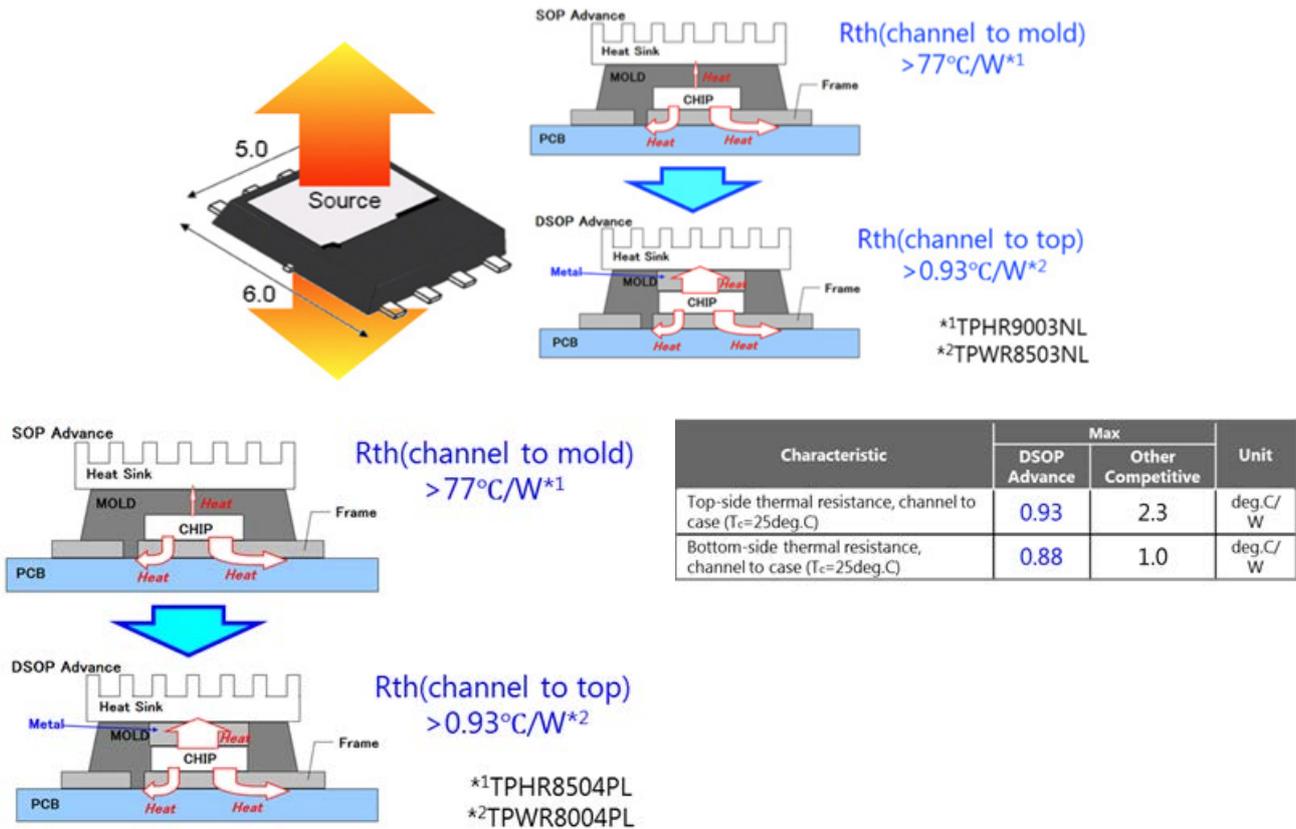


図 6：熱伝導性が大幅に向上する DSOP Advance

電動ドライバ・ドリルなど、一般的なコードレス電動工具の各構成ブロックで、高性能 MOSFET 技術を使うことは有効です。充電器では、MOSFET はハイサイドとローサイドのスイッチング素子として動作します。バッテリーパックでは、MOSFET は異常状態が生じたとき、迅速にバッテリーを切り離して保護するために使われます。工具本体では、MOSFET は電子スイッチとして使うとともに、6 素子でモータ駆動用の三相インバータを構成します。

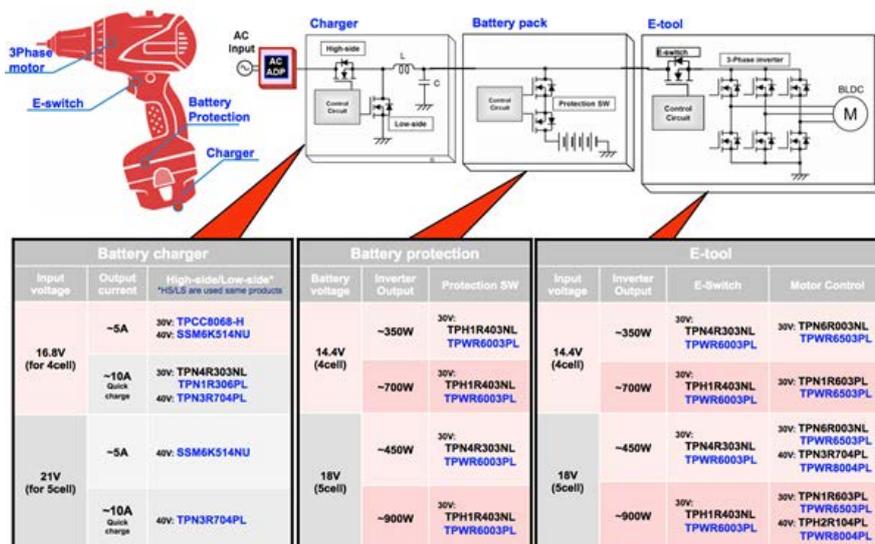


図 7：一般的なコードレス電動工具の各用途に適した MOSFET の例

上図に示したように、U-MOS LV-MOSFET ではバッテリー電圧の選択肢が多くあります。上記の例は、4 個か 5 個のバッテリーセルでブラシレス DC モータを駆動する工具の例です。青で示したデバイスにより高性能工具は最高の性能を得ることができ、黒で示したデバイスは価格対性能に対してベストのトレードオフになるので、DIY 市場向けのコードレス工具用途に最適です。