

産業界の技術動向

ハイブリッド車の現状と今後

トヨタ自動車株式会社 HV電池ユニット開発部
稲津 雅弘

1. はじめに

1997年に量産型ハイブリッド車として発売されたトヨタプリウス以降、ハイブリッド車は急速に市場を拡大し、昨年、その累計販売台数は百万台を超えるまでになった。また、昨年秋以降の欧州、米国でのモーターショーに見られるように、欧米の自動車メーカーもハイブリッド車の市場投入を宣言し、地球温暖化対策の有力な対応策としてその地位を確立しつつある。



この背景として地球環境に対する意識の高まりのみならず、原油供給への不安、燃料価格の高騰による低燃費志向が追い風となっていることが上げられる。さらに、進化型として、クルマの外部からの充電を可能としたプラグインハイブリッド車に対する期待感も米国を中心に高まりを見せている。以下では、トヨタのハイブリッド車に対する現状と今後の取り組みを紹介する。

2. ハイブリッド車の種類

ハイブリッドシステムの基本構成は、シリーズ型とパラレル型に分かれる。シリーズ型はエンジンを発電システムの駆動動力として用い、発電された電力により電気モータを駆動して走行する方式である。発電電力が余剰時には電池を充電し、発進加速など大電力を必要とする場合にはこの電池からの出力を併用して走行する。基本的には電気自動車に発電システムを追加した方式とも言える。

パラレル型のハイブリッドシステムは、エンジンの出力を機械動力として直接駆動軸に伝達する経路と電池などからの電力によるモータ駆動力を伝達する経路が並列に構成される方式である。プリウスのハイブリッドシステムは、エンジンの動力をプラネタリギヤで分割する方式であり、パワースプリットハイブリッドとも呼ばれる。この方式はトヨタハイブリッドシステムとして知られているが、最近ではGM、ダイムラー、クライスラー、BMWアライアンスの開発による2モードハイブリッドが登場してきた。この2モードハイブリッドはトヨタの方式に対して、プラネタリギヤの構成をもう一つ追加した構成であり、動力分割による機械動力と電気動力の分配制御の範囲をより広げたものと言える。

ハイブリッド車を機能から分類する場合、ストロングハイブリッド、マイルドハイブリッドと呼び分けることが多い。ハイブリッド車の特長として、①車両停止時のエンジン停止、②制動時のエネルギー回収（駆動モータによる回生ブレーキ）、③加速時のモータ動力によるアシスト、④電池からの供給電力によるモータ走行（EV走行）がある。マイルドハイブリッドは、これらのうち①、②及び③の機能が主体であり、ストロングハイブリッドは④の機能が追加されている（図1）。言い換えれば、マイルドハイブリッドは電気システムが小出力に対して、ストロングハイブリッドはエンジンと同等程度の出力設計が必要とされる。そのため、ストロングハイブリッドの構成ではモータ、発電機、これ

らの電力供給および制御装置であるインバータユニットの小形・軽量化が技術課題となる。

トヨタハイブリッドシステムの作動原理を図2に示す。燃費の画期的向上の達成手段は、①エンジンの最適効率運転により発電された余剰電力を電池に充電（エネルギーの一時的貯蔵）、②エンジンプレーキ走行を含む制動時のエネルギー回収、③走行中のエンジン停止（間欠運転）と電池からの供給パワーでのモータ走行である。ハイブリッド車の制御は、クルマを運転するドライバーの要求に応じて、これらの作動を燃費向上が最適になるように制御するシステムと言える。

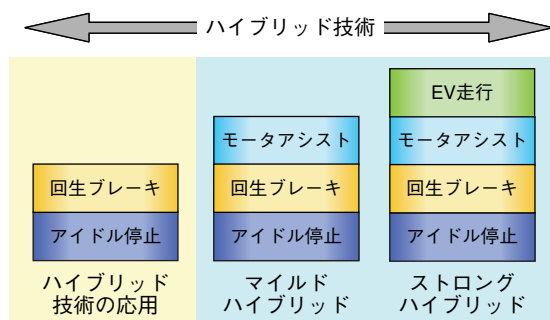


図1. ハイブリッドシステムの種類

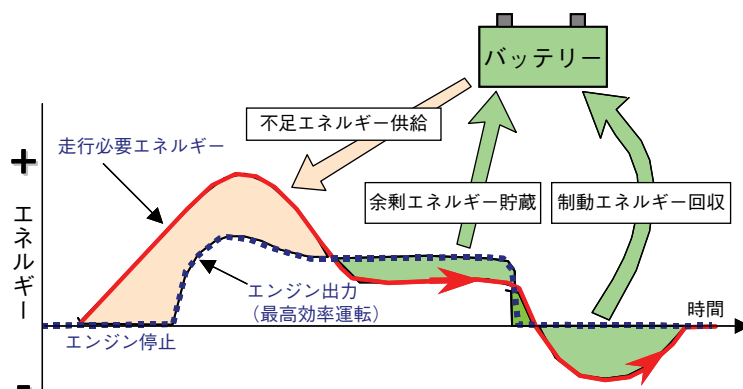


図2. ハイブリッドシステムの動作

3. ユニット技術の動向

燃費向上を実現するには、電気系システムの損失を極力低減していくことが技術課題のひとつである。また、ハイブリッドシステムは従来のシステムにアドオンする形で構成されることから、軽量化、限られた車載スペースへの搭載、コスト低減が高いハードルといえる。

1) モータ

現在の主流は、ネオジウム磁石を用いたPMモータである。構成要素の主なものは、ステータおよび巻線、回転ロータと内蔵される永久磁石、ステータとロータを積層で構成する電磁鋼板、そしてロータの回転角度位置を精密に検出するレゾルバである。モータに発生する損失は、通電部の抵抗損失（銅損）と、誘導磁界による電磁鋼板内部の誘導電流（鉄損）である。この鉄損を抑制するためには、磁石配置の最適化設計と電磁鋼板の薄板化が要求される。

ハイブリッド車の適用拡大には、エンジン排気量の大きなカテゴリーへの対応が要求される。すなわちモータの高出力化である。このため、2005年のハリアーハイブリッドから、モータ最高回転数を従来の2倍以上とした高回転化設計とし、同時にモータリダクション機構を追加することで、ハイパワーパフォーマンスを実現した。2006年およびその翌年に販売開始されたFRハイブリッド車では駆動軸出力の大出力化に対応するため、モータの2段変速リダクション機構が採用された。これらの高速、高出力への対応を行うことにより、高速走行が要求される欧州市場においてもトップレベルのパワーを引き出し、画期的な燃費の向上との両立を図っている。図3はトヨタハイブリッド車における体格当たりの出力の変遷で、初代プリウスに比べて、約6倍にまで出力密度が高まっている。

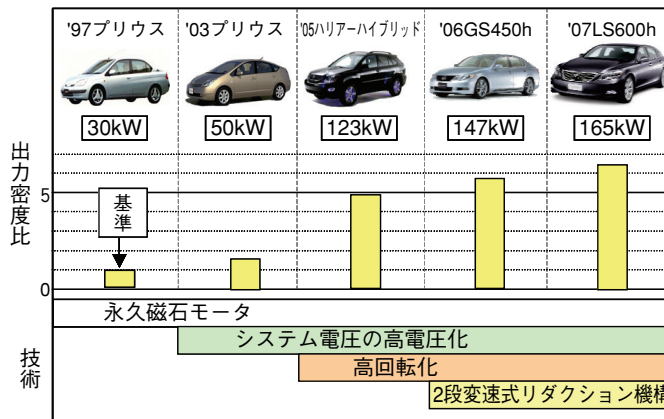


図3. ハイブリッド用モーターの出力密度の向上

2) インバータ

インバータは電池の直流電力を三相交流に変換し、モーターを駆動する装置である。インバータを構成するパワートランジスタは、初代プリウスよりIGBTが採用されてきたが、より高出力かつ低損失のモーター駆動システムを構成するために、電池の直流電圧を昇圧（降圧）する昇圧コンバータが2003年のプリウスより採用され、現在プリウスは500V、それ以降のハイブリッドシステムでは650Vのモーター作動電圧に引き上げられている。昇圧電圧は電池電圧から作動電圧まで出力要求と損失抑制を最適に制御するように可変電圧制御される。出力向上を実現するためには、冷却設計の改良も必要となり、LS600hに採用されたインバータでは、従来のヒートシンク方式から、素子（パワーカード）を直接冷やす直冷方式を採用した。

3) 電池

現在の主流はニッケル水素電池である。初代プリウスでは単一乾電池サイズの円筒形セルをモジュール化したものが採用された。2000年のプリウスでは樹脂電槽ケースに6セルを組み込んだ角型モジュールが採用され、その後のハイブリッド車へ適用されている。2005年のハリアーハイブリッドでは、SUVとしての車室スペースを最大限優先するため、セルの高さを低減した金属電槽電池セルを開発した。モジュール化には隣接するセルの端子を溶接する方式とし、モジュール当たりのセル数を車載のスペース要求に柔軟に対応できるようになり、車両搭載設計の自由度の拡大が可能となった。

次の電池として期待されるのがリチウムイオン電池である。この電池は作動電圧が高く、出力密度およびエネルギー密度が高いことから、小型軽量かつ高出力な電池として開発が進められている。米国においても、次世代電池としての開発プロジェクトがエネルギー省

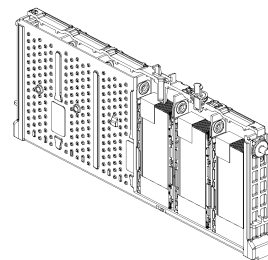


図4. 角型ニッケル水素電池モジュール

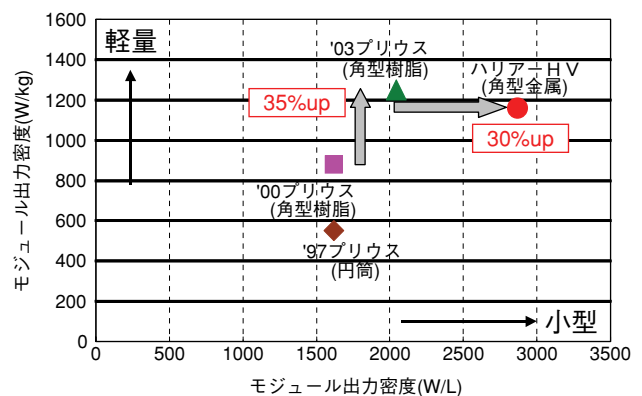


図5. 出力密度の推移

の予算の下に進められており、欧州、中国、韓国、日本など世界規模での開発競争が始まっている。

エネルギーデバイスとして駆動用電池に求められる要求性能は、小型、軽量すなわちエネルギー密度の向上だけでなく、低コストであり、かつ長寿命であることが要求される。電気自動車用電池では、深い充放電の繰り返しは電池の容量低下を招くことから長寿命化が実用化への高いハードルとなっていた。ハイブリッド車では、バッテリーのSOC (State of Charge) に応じて制御することで寿命を飛躍的に伸長している。

4. プラグインハイブリッド車

より環境性能に優れた次世代自動車として注目を集めているのがプラグインハイブリッド車である。従来のハイブリッド車のバッテリー容量を大幅に増加させ、さらに家庭電源などからの充電装置を追加し、短距離走行では「電気自動車走行 (EV 走行)」を、急加速、登り坂走行など大きな動力が必要な場合や電池の充電量が低下した場合には、「ハイブリッド車 (HV 走行)」として走行する、電気自動車とハイブリッド車の双方の機能をもっている (図6)。

EV 走行可能距離の拡大により、短距離走行の際は、ガソリンを消費しないEV 走行が可能である。これにより、燃費の向上による、CO₂排出量の削減や燃料の消費抑制、大気汚染の防止に加え、深夜電力の使用により、電気代も含めたトータルの燃料代が安くなるといった経済的な効果も期待できる。さらに多様なエネルギー源から得られる電力を使うことができることから、石油エネルギー問題への対応性が期待されている。

実用化のためには、EV 走行距離をどの程度にすればよいか、すなわち搭載する電池容量の決め方や充電の利便性向上などの課題がある。EV 走行距離は車載する電池のエネルギー量に比例することから、限られたスペースに、より大きな容量の電池を搭載するためには、電池エネルギー密度の飛躍的向上が不可欠である。これらの課題への取り組みとして、2007年7月にトヨタ自動車は国土交通省大臣の認可を取得して、プラグインハイブリッド車の公道試験を開始した。次世代自動車としての意義が高まる中で、その実用化へ向け、着実な取り組みを進めている。

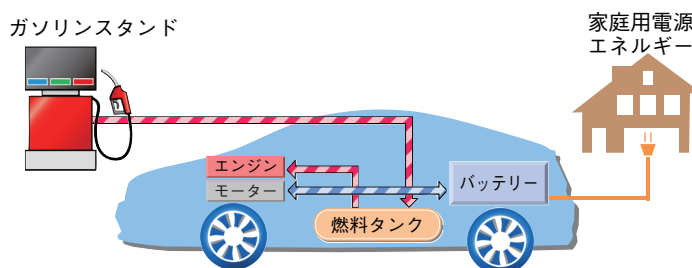


図6. プラグインハイブリッド車

5. ハイブリッド車の将来

二十世紀初頭に自動車産業が勃興し、蒸気自動車、電気自動車、ガソリンエンジン、ディーゼルエンジンなど石油エネルギーを用いた内燃機関自動車が淘汰の時代を乗り越えて、現在の内燃機関を中心とした自動車文明があることは周知の通りである。しかしながら、今世紀、石油エネルギーから代替エネルギーへの転換を迫られている状況の中で、既存の技術であるガソリンエンジン、ディーゼルエンジンの効率をさらに高めていくと同時に、ハイブリッド車の普及による環境問題、エネルギー問題への対応が求められている。

ハイブリッド技術は複数の動力源の組み合わせという考え方であり、互いの短所を補い、それぞれを組み合わせることでより高い性能を実現するという技術思想であることが理解されつつある。自動車が人類の文明を支える利器として発展していくために、ハイブリッド技術を将来の軸に世界の各地域の市場特性に合った自動車の導入を図っていくこと、すなわち「適時、適地、適車」の考え方が今後益々重要になってくると思われる。