ハイブリッド車における燃費向上技術の動向

解説

正員 神谷 宗宏

久保 馨

トヨタ自動車(株)

キーワード

ハイブリッド車, EV, HEV, 省エネルギー, 高効率, 低燃費

1. はじめに

自動車走り始めてから100年あまり、今や世界中で自動車のない生活は考えられない時代となった。しかし世界中のエネルギーの約半分を先進諸国が消費している中で、自動車によるCO₂排出量は24%と言われており、地球温暖化の防止、資源保護の観点からも自動車の果たすべき役割が大変重要になってきている。自動車にとってCO₂削減は燃費を改善することであり、排出ガス浄化や安全性確保とも両立することが必要である。

日本での自動車の燃費に関する動向は、温室効果ガス削減の世界協定の動きを受けて省エネ法が改定され、表1に示す目標基準が定められている。この目標値が達成された場合、2010年における省エネルギー量は、原油換算で約490万kLとされる⁽¹⁾。

表1 燃費目標基準値

	対象範囲	目標年度	目標年度における燃費向上率 (対1995年度比)
ガソリン自動車	乗用車	2010年度	22.8%
	車両総重量2.5t以下 貨物自動車	2010年度	13.2%
	上記全体		21.4%
ディーゼル自動車	乗用車	2005年度	14.9%
	車両総重量2.5t以下 貨物自動車	2005年度	6.5%
	上記全体		13.1%

これらの課題に対応する有力な手段の一つとして、内燃機関と電気駆動とのハイブリッド車が注目されている。ハイブリッド車は'97にトヨタ自動車がプリウスを日本市場に投入して以来、'99に本田技研がインサイトを、'00に日産自動車がティーノ HEV を発売し、それぞれ従来のガソリンエンジン自動車に対し概ね2倍の大幅な燃費向上を達成している。今回、プリウスでの実施例を中心に、ハイブリッド車における燃費向上のメカニズムと、利用されている技術動向などについて紹介する。

2. ハイブリッドシステムの概要

ハイブリッドシステムとは複数の原動機からなるシステムを示し、原動機としては内燃機関あるいは外燃機関と、エネルギーを再生利用できる原動機である電気モータ、油圧

モータ、機械的フライホイールなどとの組み合わせによるシステムが検討されてきた。近年、電気モータ、バッテリー関連の技術が飛躍的に進展し、現在では内燃機関と電気モータを使ったハイブリッドシステムの実用化が進んでいる。

電気モータを使ったハイブリッドシステムは、シリーズ方式とパラレル方式の2種類に大別できる。シリーズ方式は、エンジンの機械動力を一旦電気エネルギーに変換した後、駆動用モータで再び機械エネルギーに変換するためエネルギーの流れがシリーズになるのに対し、パラレル方式は、エンジンの動力とモータの動力が駆動系で合力として出力される方式であり、エネルギーの流れがパラレルになる。

これら基本的な方式以外に、最近実用化されているシステムには、シリーズ方式とパラレル方式を組み合わせ、それらの長所を最大限に引き出すよう構成されているものもある。トヨタのプリウスに採用されている方式は、エンジン動力を分配して機械的なエネルギーをそのまま出力するパラレル的な動作と同時に、一部は発電機により電気エネルギーに変換し、モータで機械動力に変換するシリーズ的な動作も行うため、スプリット方式と呼ばれる⁽²⁾。

F:燃料 B:バッテリー I:インバータ E:エンジン M:モータ G:発電機 T:変速機

図1 ハイブリッドシステムの分類

3. ハイブリッド車の燃費向上メカニズム

ハイブリッドシステムの基本的な燃費に関する特長・利点は以下の4点と考えられる。

(1) 複数の動力源を持つことから、エネルギー効率上及び排出ガス上有利な動力源を選択できる。

(2) 複数の動力源を持つことから、個々の動力源は相対的に小さい出力を分担すれば良く、エンジンを小型にできるため実使用での熱効率が向上する。

(3) エネルギー蓄積体としての電池を持つことから、車両の運動エネルギーを回収・再利用できる。

(4) エネルギー蓄積体としての電池を持つことから、エネルギー効率上有利なエンジン動作点を選べる機会が増える。

以下にこれらの特徴をどのように実現しているかを、実施例を用いて示す。

Trend of Energy-Saving Technology in Hybrid Vehicles.

By Munehiro Kamiya, Member & Kaoru Kubo, Non-member
(TOYOTA MOTOR CORPORATION).

3-1. トヨタプリウス

プリウスは世界初の量産ハイブリッド車として'97/12に発売されたが、欧米市場への投入を機会に'00/5に車両の改良を行い、新たな使用環境に合わせた動力性能を確保しつつ、更なる燃費向上を達成した。

ここでは、プリウスに搭載された乗用車用量産型ハイブリッドシステムであるトヨタハイブリッドシステム (THS) の概要について紹介すると共に、新型での燃費改善上の改良点についても併せて述べる。

3-1-1. THS のシステム構成⁽³⁾

動力源として、ガソリンエンジンと電気モータを備えているが、基本となるのはエンジン動力である。エンジン動力は遊星歯車を使用した動力分割機構により、車輪の駆動力と発電駆動力に分割される。発電した電力は、モータ駆動に直接使用したり、インバータで直流に変換し、高電圧バッテリーに蓄えられる。(図2)

図2 THSの構成

3-1-2. 燃費向上手続

プリウスパワートレインにおいて採られた燃費向上策は下記である。

(1) エンジン単体の効率化

主動力源のエンジンは『アトキンソンサイクル』(高膨張比サイクル)を応用し、排気損失および吸気損失を画期的に抑制するとともに、摩擦損失も低減した 1.5L 高効率エンジンを新開発した。

(2) エンジン運転域の改善

走行状況に応じ、燃費率が良い高トルク域をできるだけ使用するように、エンジンとモータの分担を制御し、かつ運転域も燃費率が良くなるように回転数も一定域に制御し、低燃費化を図る。

(3) 停止時および走行中のエンジン停止

車両停止時や、低車速での減速時などにエンジンを自動的に停止し、エネルギーを削減し排出ガスの発生を防ぐ。

(4) 制動エネルギーの回収、再利用

モータを発電機として作動させることにより、制動時に失われる運動エネルギーを電気エネルギーに変換しバッテリーに回収する。(回生ブレーキ)

図3に市街地走行パターンでの THS 搭載車のエンジン正味熱効率を従来車両と比較したものを示す。高効率エンジンを燃費の良い領域で運転することで、従来車両比 80% という画期的な効率改善を達成している。更に制動時のエ

図3 エンジン使用域の最適化

ネルギ回生によって 20%効率を高め、併せて従来車の約2倍の燃費向上を達成している。

3-1-3. システムの作動

図4に THS の駆動力特性を示す。横軸は車速、縦軸は駆動力であり、従来車では変速機で必要な駆動力を作り出している。THS では低速、軽負荷時はエンジンを止めモータのみで走行し、通常の運転ではエンジンを起動して直接動力とモータによる動力により走行する。更にパワーが必要な場合には、バッテリーの電力をモータに加えてパワーアシストする。

図4 THSの駆動力特性

(1) 発進時および軽負荷時(図5)

車両停止時には、エンジンは停止している。発進時や、ごく低速で走行するか、緩やかな坂を下る時など、エンジン効率の悪い領域は燃料をカットして、モータにより走行する。

図5 発進時および軽負荷時

(2) 通常走行時(図6)

エンジン動力を動力分割機構で2経路に分割する。一方は車輪を直接駆動し、他方は発電機を駆動して発電し、この電力でモータを駆動して駆動力をアシストして走行する。

図6 通常走行時

(3) 全開加速時 (図7)

全開加速時にはバッテリーからも電力が供給され、更に駆動力を追加する。

図7 全開加速時

(4) 減速時・制動時 (図8)

減速制動時には車輪がモータを駆動し発電機として作用し、回生発電を行う。回収したエネルギーはバッテリーに蓄えられる。

図8 減速時・制動時

(5) バッテリー充電

バッテリーは一定の充電状態を維持するよう制御する。充電量が少なくなると車両の走行中/停止中に問わず、発電機を駆動し充電を行う。

(6) 停止時

車両停止時は、自動的にエンジンを停止する。

3-1-4. 主要コンポーネントの特徴

図9に'97に発売したプリウスに搭載したTHSのエンジンとトランスミッションを示す。

図9 エンジンとトランスミッション

'00発売の新型プリウスでは、THSパワートレインを大幅に改良し、燃費性能、動力性能と排出ガス性能を更に高いレベルで両立した。表2に新型プリウスのTHS主要諸

元を示す。

表2. 新型プリウス THS 主要諸元

	新型プリウス	旧型
エンジン	排気量[cc]	1,496
	圧縮比	13.0
	最高出力[kW/rpm]	53/4,500
	最大トルク[N・m/rpm]	115/4,200
モータ	最高出力[kW/rpm]	33/1,040
	最大トルク[N・m/rpm]	350/0~400
		305/0~940

(1) エンジン

主動力源として、高効率化した1.5Lエンジンを開発した⁽⁴⁾。高膨張比サイクルと、排気損失および吸気損失を画的に抑制、モータのアシストが期待できるため最高回転数を低回転に抑え、摩擦損失を大幅に低減した。

図10にエンジンのP-V線図で、高膨張比サイクルの概念を示す。膨張行程を長くして、排気で捨てている損失を減らしている。また車両の燃費向上には積極的にエンジンを停止させる事が有効だが、反面エンジン起動時の不快な振動が課題になる。吸気VVT-i(可変バルブタイミング機構)の採用及び燃料噴射制御・点火遅角制御・ジェネレータによるエンジン起動トルクの最適化によりエンジン起動時振動を大幅に低減することに成功した。

図10 高膨張比サイクル概念図

新型では、最大回転数の変更、VVT-iの最適化、圧縮比の最適化および徹底したフリクション低減により、高出力と高効率を両立させた。

(2) トランスミッション

トランスミッションの最大の特徴である動力分割機構は、シングルプラネタリギヤを用い、エンジンの動力を車輪と発電機を駆動する動力に分割すると共に、発電機、駆動モータと協働して無段変速機の役割を果たしている。プラネタリギヤは、キャリアをエンジンに、サンギヤを発電機に、リングギヤを出力軸に結合しており、各回転状態に応じて動力を分配している。配置としては発電機と駆動モータの中間部に位置し、モータの形状からできる空間を有効に活用しユニットのコンパクト化を図った。

旧型のプリウス用モータはギア室とモータ室を隔離し、トランスミッションオイルがモータ室に進入しない構造としていた。しかしこれはシール構造が必要な為、引き摺りトルクが大きく燃費の観点からは好ましくなかった。新型では、新たな樹脂材料を採用しモータ本体の耐油性を向上

図 1 1 動力分割機構

させることにより、オイルシールの廃止、ベアリングの低フリクション化を行ない機械損失の低減を行なった。また、オイルポンプの損失低減、オイル攪拌損失低減も合わせて行なった結果、動力分割機構を含めたトランスミッション全体で約 40% 機械損失を低減することができた。

(3) 駆動モータ・発電機

駆動モータ、発電機ともに、構造は永久磁石式の交流同期モータで、冷却は水冷式としている。ロータ内に磁石を埋め込む IPM (Interior Permanent Magnet) 方式の逆突極型ロータを採用して高トルク化と同時にコスト低減を図った。制御的にも電流位相制御（最大トルク制御、弱め界磁制御）、電池電圧追従制御によりトルク向上や高速化を可能としている。

図 1 2 1パルススイッチング制御

旧型では PWM スイッチング方式のみでモータを駆動していたが、新型では低速域では PWM スイッチング方式を用い、高速域では 1 パルススイッチング方式に切替えている。高速域において 1 パルススイッチング方式を採用することにより、PWM スイッチング方式よりも 27% 高い基本波電圧をモータに加えることが可能となり出力を向上させることができた。それと併せて、巻線及び磁気回路の最適化を行い、システム効率を向上している。

(4) インバータ

ハイブリッド車では、EV より一層環境温度や使用条件も厳しくなるため、冷却構造の最適化や発熱抑制制御を採用した。スイッチング素子である IGBT は自動車用としての新規開発。温度サイクル寿命等を市販品に対して大幅に向上させた。特に重要な点の一つは素子—絶縁基板—放熱板の積層に使うはんだ付けであり、水素還元リフロー方式により、従来製品の 1/5 以下のボイド率を達成し、熱伝達率

向上と信頼性向上を図った。二つ目は素子と電極をつなぐボンディングワイヤの接合技術。ワイヤ押付力と加振時間、そして接合面積の最適化を図り、ワイヤ寿命を従来の倍近くまで伸長した。

図 1 3 プレーナ型 IGBT

また、新型では小型化と損失低減の目的で、新たにトレンチ型 IGBT を自社開発した。従来から用いられているプレーナ型 IGBT では、図 1 3 に示すようにゲート電極がシリコン表面に平板状に形成されており、コレクタからエミッタに流れる電流はシリコン表面付近で大きく方向を変える必要がある。これに対して、図 1 4 のトレンチ型ではゲート電極が n 層まで溝型に形成されているため、チップ面積当たりの通電面積が大きくとれ、小型でオン電圧降下の低い素子可以实现できる⁽⁵⁾。

図 1 4 トレンチ型 IGBT

(5) バッテリー

HV 用電池はエンジン始動や全開加速時のモータ駆動用電力源であると同時に、車両減速時の回生エネルギーのバッファとしての機能を併せ持つ。HV では基本的にエンジンの動力主体で走行できるような動力配分をしているため、バッテリーのエネルギー容量は EV の 5~20% 程度と言われている⁽⁶⁾。従って HV においては、EV 用と違いエネルギー量は少なくても良いが、高い充電受入性、小型、高出力、そして寿命の確保が重要である。図 1 5 に HV と EV 用電池のパワー密度とエネルギー密度の特性例を示す。現状の HV では、EV に対して約 3 倍の出力密度のバッテリーを使用している。

図 1 5 HV と EV 用電池特性

また必要とする電力を確保するため、バッテリーは多数の

単セル電池を直列に接続して使用することになる。このため、性能・寿命を確保するために、セル間の電池特性のばらつきを抑えることが重要となる。電池特性は、個々のセル温度の違いによる差が大きいため、充放電によって発生した熱を速やかに、均一に放熱する冷却構造が必要となる。更に、寿命確保に重要な内部抵抗上昇抑制のため過充電、過放電、電池温度上昇を防止する電池制御が必要となる。

(6) 回生ブレーキ

制動時には駆動モータの発電機能で運動エネルギーをバッテリーに回収する回生ブレーキシステムを採用している。回生ブレーキと油圧ブレーキを協調制御し、回生を優先的に使用してエネルギーの回収率を高め、一層の低燃費を達成している。アクセルオフ時のエンジンブレーキ分も回生ブレーキにより行っている。回生ブレーキの許容限界は車速やバッテリーの充電状態でも常に変化するため、回生・油圧協調制御により油圧ブレーキ分担分をオイルシリンダ油圧で制御している。

3-1-5. 車両性能

プリウスではエンジン単体の効率向上と、モータ、発電機との併用による運転方法(最適燃費動作点制御、エンジン停止)の改善で 80%, 更に制動時の回生で 20%の効率向上により、概ね従来車比 2 倍の燃費向上を達成している。旧型での、その他の走行モードを含む燃費向上割合を図 16 に示す。エンジン停止の効果も増えるため、大都市渋滞時などでは更なる燃費向上が見込めるが、高速走行時の改善幅は比較的小さい。

(10・15 モードは運輸省審査値、他は社内測定値)

図 16 燃費向上割合 (対カーリーナ比)

これに対して、新型ではエンジン、駆動系、電気系コンポーネントの効率改善、及びハイブリッド制御の見直しにより、ベース仕様には比べ層の燃費向上を得た(表 3)。特に日本のモード走行より平均車速が高速になる北米のモード走行では、顕著な改善結果となっている。

表 3 燃料消費率

走行モード	新型	旧型
10・15 モード(日本)	29.0(km/L)	28.0(km/L)
US Comb モード(北米)	57.6(mpg)	50.0(mpg)*

* 社内データ

また、THS は CO₂ と同様に有害排出ガス成分も大幅に低減しており、日本、北米、欧州それぞれで提案されている最も厳しい排出ガス規制への対応を先取りして実現した。とりわけ、従来の ULEV(Ultra Low Emission Vehicle)に対して HC 1/5, NO_x 1/15 という、厳しい規制である北米

(加州)の SULEV(Super Ultra Low Emission Vehicle)規制に適合している。

動力性能に関しても従来のスムーズでレスポンスの良いドライブフィーリングをレベルアップすると共に、高速走行条件においても優れた動力性能を確保した。更に、プリウスの特徴でもある EV 走行についても、新型では走行可能領域を従来の 45km/h から 65km/h に拡大した。

3-2. ホンダインサイトの

本田技研は'99 年に小型乗用車インサイトにハイブリッドシステムを搭載した。このシステムはエンジンとトランスミッションの間に挟まれた一つのモータで減速エネルギーの回収とエンジンの出力アシストをするシンプルなシステム Integrated Motor Assist(IMA)である。

3-2-1. 開発の狙い

モータアシストシステムの狙いは低燃費性能の実現であり、①減速エネルギーの回収とアシスト、②アイドリングストップ、③エンジンの効率向上、④小型・軽量化の技術を開発した。

このシステムはエンジンを主動力とし、モータを補助動力と考えたパワーユニットであり、低中回転の実用領域はエンジンの希薄燃焼運転や低フリクション化により燃費を向上させ、高回転領域は可変バルブ機構により高出力化を図っている。そして低中速域では、モータが駆動力をアシストすることでトルクを大幅に向上することができエンジン排気量の低減を可能としている。それにより、相対的にエンジン側の負荷割合が上がることで、常用域でのエンジン効率を向上できる。

3-2-2. 薄型 DC ブラシレスモータ

モータアシストとエネルギー回生、エンジン始動の機能を持つモータは、最大 10kW の出力を発生させる高効率な永久磁石式交流同期電動機である。エンジンとトランスミッションの間に挟まれたレイアウト上の制約を薄型化することで克服した。薄型化の技術では、生産性の向上も考慮し、分割ステータと集中配電バスリングの技術を開発した。

3-2-3. 車両性能

「IMA システム」に加えて、車体の軽量化技術「新骨格軽量アルミボディ」などの技術により、量産ガソリン車で世界最高燃費の 35km/L を達成した。また、ホンダ IMA システムは超低燃費に加え、排出ガス中の有機物質を大幅に低減し、平成 12 年度排出ガス規制値を 50%以上下回るクリーン性能を実現した⁽⁶⁾。

3-3. 日産ティーノ HEV⁽⁹⁾

日産自動車では高効率エンジン、高出力小型モータ、高出力リチウムバッテリーと、大容量の無段変速装置 CVT を組み合わせることにより、高性能でコンパクトなハイブリッドユニット(Nissan Hybrid System)を完成し、ティーノ HEV を開発した。

3-3-1. Nissan Hybrid System の構成

本システムのパワートレイン構成を図17に示す。エンジンとモータはどちらもダイレクトにタイヤに動力を伝達する。作動点を任意に選択するという考えから、CVTの上流に配置した。また、モータをCVTの上流におくことは、変速によるトルク増幅を利用できることから、モータの小型化も可能になる。

図17 日産ハイブリッドシステム

3-3-2. 燃費性能の向上

エンジンの運転効率の向上として、①高効率領域での運転頻度の増加、②軽負荷域のモータ走行、③アイドルストップを行い、また、減速エネルギーの回生利用により燃費性能を向上している。

3-3-3. 車両性能

(1) 燃費性能

日本の市街地における代表的走行パターンでの燃費は、同クラス従来車の平均燃費に対して2倍以上の改善を実現している。

(2) 加速性能・排気性能

エンジンは1.8Lでありながら同クラスの2Lエンジン搭載車と同等の加速性能をモータの駆動力を加えることにより達成している。また排気ガスは現行規制値の約1/10レベルに低減した。

3-4. トヨタ THS-C & E-Four の紹介⁽¹⁰⁾

図18に'99年の東京モーターショーでトヨタ自動車が出展したTHS-CとE-Fourの構成図を示す。

図18 THS-C & E-Four

このTHS-Cはガソリンエンジン、モータ、無段変速機(CVT)からなる、比較的大型車用のハイブリッドシステムとして開発された。更に、後輪駆動用モータを組み合わせることで、プロペラシャフトのない軽量4WD(E-Four)を実現し、大幅な燃費向上と、新たな商品性を提案した。

また、排出ガスに関しても、現在日本で最も厳しい排出ガス技術指針の、超低排出ガスレベル(J-ULEV)となる画期的なローエミッションを追求している。

4. おわりに

ハイブリッド車の燃費向上に関する技術動向を中心に紹介した。本文中にも述べたように、ハイブリッド車では燃費向上によるCO₂低減以外に、その他の有害な排出ガスも極めて低いレベルに抑えることができている。また、これらクリーンな環境性能と、動力性能についても高い次元で両立することが可能な、実用性の高いシステムであるといえる。ハイブリッド車の実用化が始まったばかりの現在、最大の課題はコストであり、コスト低減に効果のある技術革新を進めることが、普及への鍵となると思われる。

この分野の技術開発が一層進むことを願うとともに、今後ともその一員として取り組んでいく所存である。

(平成12年8月21日受付)

文 献

- (1)運輸省自動車交通局プレスリリース:「自動車の燃費基準の強化について」, H10.12.17
- (2)伊藤:「電気自動車の駆動機構と動特性」, 平成11年電気学会全国大会, S.22-1
- (3)阿部ほか:「乗用車用量産型ハイブリッドシステムの開発」, 自動車技術会, 学術講演会前刷集975, 76, 25-28, 1997-10
- (4)広瀬ほか:「ハイブリッドシステム用高膨張比ガソリンエンジン」, 自動車技術会, 学術講演会前刷集975, 77, 29-32, 1997-10
- (5)新井ほか:「1200V トレンチ IGBT モジュール」, 三菱電機技報, vol.72, No.12 (1998)
- (6)森下ほか:「EV用・HEV用ニッケル水素蓄電池」, Matsushita Tech. J., vol.44, No4 (1998)
- (7)島田:「モータアシスト式ハイブリッド自動車用パワートレインの開発」, 自動車技術会シンポジウム資料20004178, 2000/3
- (8)HONDA PRESS INFORMATION, 1999年7月6日, 本田技研工業株式会社広報部
- (9)稲田:「日産ティエノ HEV の開発」, 自動車技術会シンポジウム資料20004176, 2000/3
- (10)佐々木:「トヨタハイブリッドシステム」, 自動車技術会シンポジウム資料20004177, 2000/3

神谷 宗宏 (正員)

1967年2月18日生。1990年3月東京理科大学工学部電気学科卒業。同年トヨタ自動車(株)入社。1997年3月豊田工業大学大学院工学研究科修士課程修了。主として、EV, HV用モータの開発及び設計に従事。現在、トヨタ自動車(株)第4開発センターEHV技術部担当員。

久保 馨

1955年11月2日生。1978年3月横浜国立大学工学部機械工学科卒業。同年トヨタ自動車(株)入社。工機部門にて設備、ロボットの開発業務を経て、EV, HV用モータの開発及び設計に従事。現在、トヨタ自動車(株)第4開発センターEHV技術部主査