

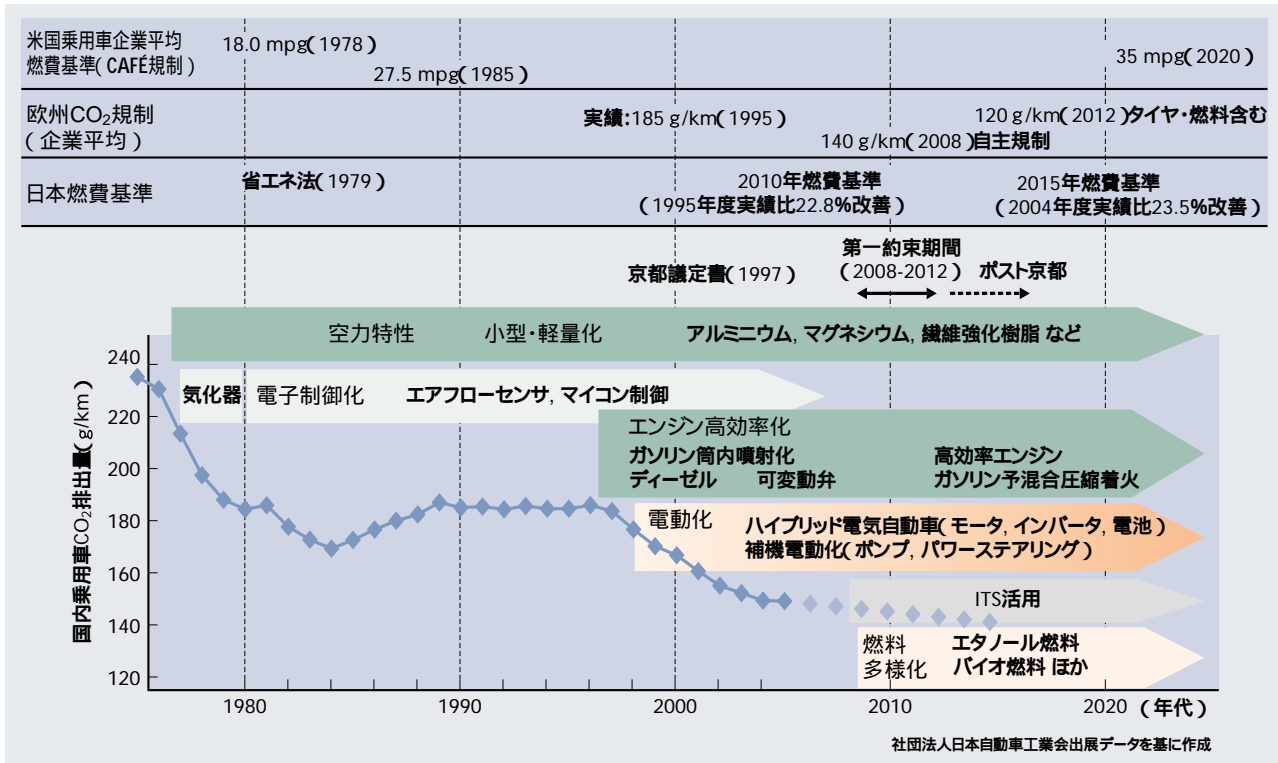
自動車におけるCO₂削減技術

Reduction of CO₂ Emissions for Automotive Systems

石井 潤市 Junichi Ishii
大須賀 稔 Minoru Osuga

岡田 隆 Takashi Okada
宮崎 英樹 Hideki Miyazaki

小関 満 Mitsuru Koseki
谷越 浩一郎 Koichiro Tanikoshi



注:略語説明 CAFÉ(Corporate Average Fuel Economy:米国における企業平均燃費基準),ITS(Intelligent Transport Systems),mpg(Miles per Gallon)

図1 自動車におけるCO₂排出量削減の動向

1975年以降、軽量化技術、電子制御による各種エンジン制御および電動化技術によって、自動車1台当たりの燃費は年々削減されている。地球環境問題を考慮し、世界的な燃費規制はさらに強化されていく傾向にあり、自動車におけるCO₂排出量削減の要求はますます厳しく、CO₂排出量の削減技術はさらに重要となる。今後は、ガソリン筒内噴射化、可変動弁およびディーゼルエンジンなど高効率エンジンによる燃費低減に加え、ハイブリッド電気自動車などの電動化、ITS活用および燃料の多様化によって、CO₂排出量の削減が進められる。

自動車を含む運輸部門からのCO₂排出量は、全排出量の約2割を占めており、地球温暖化防止の観点から、その削減は重要な課題である。自動車のCO₂排出量に関して、世界的に燃費規制が強化されており、自動車の燃費性能の向上が望まれている。今後、エンジンの高効率化やハイブリッド(電動化)による燃費性能の向上がさらに進展すると考えられる。また、運転操作の改善や交通流の円滑化による燃費性能の向上も重要になってくる。

このような状況において、日立グループは、環境への配慮、中でもCO₂削減、排気低減の観点から、自動車のCO₂排出量を削減するための技術開発を総合的かつ多面的に推進している。

1.はじめに

地球環境問題を考慮し、日本、欧州、北米など世界的規模で自動車の排気や燃費の規制が導入されている。国内における乗用車の平均燃費は1990年前後のバブル期に一時増加するものの、1975年以降はマイコンによる電子制御の導入や軽量化、ガソリンの筒内噴射化、可変動弁の導入などにより自動車の燃費削減が進められ、その結果、CO₂排出量は削減されている(図1参照)。

しかし、自動車台数の増加に伴いCO₂排出量は増加傾向にあり、日本では2015年度新燃費基準、欧州では2012年以降のCO₂排出量120 g/km(企業平均)、米国では新エネルギー法の乗用車企業平均燃費基準(CAFÉ(Corporate Average Fuel Economy)規制)など、各国でCO₂排出量の削減

が強化されている。また、CO₂を含む温室効果ガスの削減を義務づけた京都議定書の第一約束期間が、2008年から開始され、2013年以降にもさらなるCO₂排出量の削減が必須となる。特に、自動車を含む運輸部門のCO₂排出量は、全排出量の約2割を占めており、自動車メーカーは、重要な課題としてCO₂排出量削減の技術開発を進めている。

日立グループは、環境への配慮、特にCO₂削減および排気低減の観点から、自動車低燃費化技術の開発に取り組んでいる。自動車分野の対策としては、エンジンの高効率化やハイブリッド・電動化による自動車CO₂排出量の削減、ITS (Intelligent Transport Systems) を活用した交通流円滑化によるCO₂排出量削減などが挙げられる。

ここでは、自動車CO₂排出量削減に向けた日立グループの取り組み、およびソリューション技術について述べる。

2. エンジンにおけるCO₂削減技術

2.1 ガソリンエンジンにおけるCO₂削減アプローチ

自動車のCO₂排出量削減には、自動車の燃費性能向上が必要である。これは、自動車に供給する燃料エネルギーから、むだなく運動エネルギーを取り出すことにある。自動車におけるエネルギーフローを図2に示す。エネルギーを効率よく利用するためには、エンジンの損失低減、補機類の損失低減、車両走行時における抵抗低減、熱エネルギーや走行中の運動エネルギーの回収が重要となる¹⁾。

エンジン損失低減の一つとして、高圧縮比化やポンプ損失

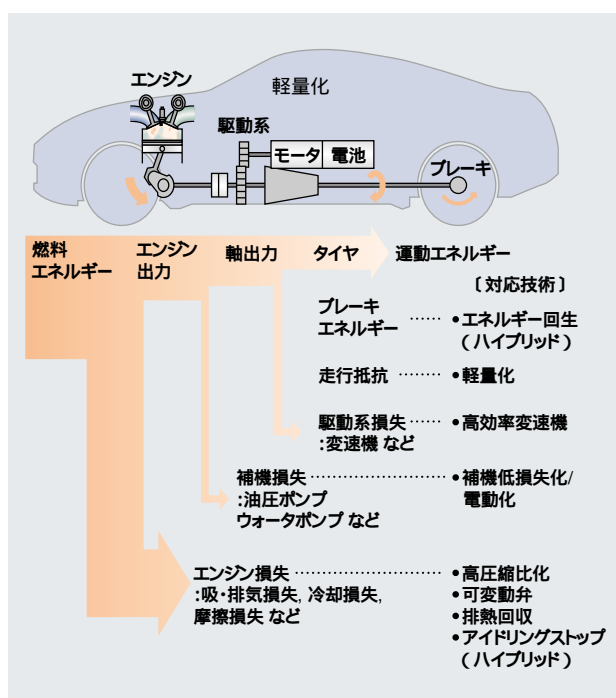


図2 自動車におけるエネルギーフロー

エネルギーを効率よく利用するためには、エンジンの効率向上、補機類の損失低減、車両走行時における抵抗低減、熱エネルギーや運動エネルギーの回収が重要となる。

低減が挙げられる。このようなアプローチに対して、日立グループでは、シリンダ(筒)内に直接燃料を噴射する筒内噴射エンジンシステムとポンプ損失を低減する可変動弁システムに注力して開発を進めている。筒内噴射エンジンシステムは、エンジンの筒内に直接燃料を噴射することから、噴射のタイミングやシリンダ内での混合分布が自由に制御でき、高圧縮比化による燃費向上および高出力化が可能である。また、制御自由度が高いことから、エンジン耐ノック性、リーンバーン、大量EGR(Exhaust Gas Recirculation)などの特性改善が期待できる。一方、可変動弁システムは、弁の開閉タイミング(位相)、開く量(リフト量)や開く期間(作動角)などを可変してポンプ損失を低減でき、筒内噴射エンジンシステムとの融合により、エンジン効率のさらなる向上が可能となる。

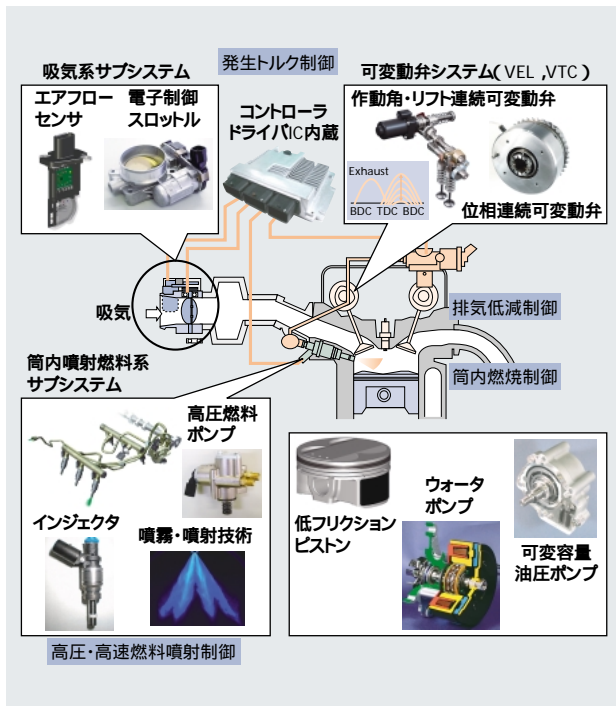
2.2 エンジンシステムとコンポーネント技術

筒内噴射エンジンシステムや可変動弁システムの優れた性能を引き出すには、システムを構成するキーコンポーネントとその制御技術が必要である。筒内噴射エンジンシステム、可変動弁システムなどのエンジンシステムにおいて、日立グループが製品開発を進めているキーコンポーネントのサブシステムおよびエンジン制御技術について以下に述べる。

筒内噴射エンジンシステムは、エンジンの燃焼を高精度に制御するため、筒内の混合分布が重要となる。日立グループは、さまざまなエンジンの燃焼室形状、燃焼方式に応じた噴霧形成を実現するインジェクタ、高圧燃料ポンプおよびそれらの性能を引き出す駆動回路・コントロールユニットから成る燃料系サブシステムを提供している。さらに、これまで培ってきたシミュレーション・解析技術により、インジェクタ噴霧、筒内空気流動、ピストン冠面仕様などのソリューションを提案している²⁾。

可変動弁システムにおいては、リフト量と作動角を連続的に変更できるVEL(Variable Valve Event and Lift Control)³⁾と位相を連続的に変更できるVTC(Valve Timing Control)をキーコンポーネントとして提供している。VELは、駆動フリクションが低いうえに、スロットル絞りのない運転(ポンプ損失大幅低減)ができるため、燃費削減の効果が大きい。VTCは位相のみ変化可能だが、従来の油圧型に加え、電動化することで低回転・低油温からの作動を可能とし、燃費効果を高めた独自機構VTCの開発を進めている。また、エンジンへの吸入空気量を正確に検出するエアフローセンサ、電子制御スロットルと可変動弁による吸入空気量制御によって燃費を抑え、運転者の要求に応じてエンジントルクを実現する制御技術の開発を進めている。

さらに、エンジン潤滑用オイルの吐出量を可変に制御する可変容量ポンプや電動ポンプなど、補機損失低減を図ったコンポーネントの開発を進めている(図3参照)。



注:略語説明 VEL(Variable Valve Event and Lift Control)
 VTC(Valve Timing Control), IC(Integrated Circuit)
 BDC(Bottom Dead Center), TDC(Top Dead Center)

図3 エンジンシステムとその主要コンポーネント

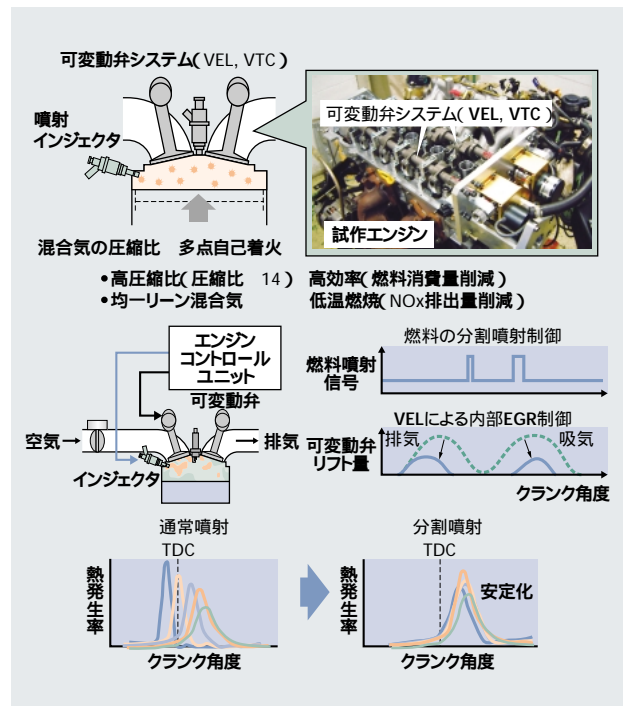
筒内噴射エンジンの燃料、吸気に関するコンポーネント/サブシステム、可変動弁システム、低損失コンポーネントの製品に加え、さまざまなシステム制御技術を開発している。

2.3 ガソリン圧縮着火エンジンへの取り組み

ガソリンエンジンのさらなる低燃費化として、予混合圧縮着火(HCCI:Homogeneous Charge Compression Ignition)エンジンシステムの技術開発を進めている。予混合圧縮着火エンジンの燃焼は、従来の点火プラグによる強制着火を用いずに、可変動弁による筒内温度(内部EGR)制御や有効圧縮比制御によって、予混合の均質混合気を多点自己着火させるため、従来エンジンより熱効率が高く、低温燃焼であり、NOx(窒素酸化物)排出量が低く、低燃費と低排気が両立できる。予混合圧縮着火エンジンの実用化には、安定した燃焼の実現が課題となる。これに対応するため、筒内噴射用燃料系サブシステムと可変動弁(VEL, VTC)を用いたエンジンを試作し、予混合圧縮着火エンジンの筒内燃焼を総合的に制御する技術開発を進めている⁵⁾。試作エンジンでは、燃料の精密な分割噴射制御と可変動弁による内部EGR制御で、安定した燃焼を実証している。また、試作エンジン試験データとシミュレーションにより、従来エンジンと比較し、燃費20%削減の見通しを得ている⁶⁾(図4参照)。

2.4 シミュレーション解析技術

現在、進めている筒内噴射用インジェクタ、可変動弁、圧縮着火の開発では、シミュレーションを駆使した解析技術を適用している。エンジン燃焼シミュレーション技術は、原子力プラ



注:略語説明 EGR(Exhaust Gas Recirculation)

図4 ガソリン予混合圧縮着火燃焼コンセプトと試作エンジン

高圧縮比化と均一かつリーン混合気の多点自己着火燃焼により、低燃費と低排気を両立する。試作エンジンは、直列4気筒の筒内噴射システムと可変動弁システムから構成され、可変動弁と噴射制御によって安定化を実現している。

ントの配管内の気液二層流を解析する非定常・圧縮性流体解析プログラムを基にしている。燃焼シミュレーション技術は、TAT(Turn Around Time)の短縮化、筒内現象の正確な再現に着目して開発している。TATに関しては、三次元CAD(Computer-aided Design)図から直接メッシュを作成できるボクセル法を開発し、メッシュ作成工数を低減した。筒内現象の再現に関しては、乱流を直接シミュレートする技法の開発により、噴霧形成や燃焼に大きく影響する空気流動の再現の精度向上を図った³⁾。

このシミュレーションを筒内噴射エンジンシステム開発に適用した例を図5に示す。筒内の空気と燃料の流れによって、形成される混合気とその燃焼火炎を計算することができる。筒内噴射エンジンでは、着火性確保の観点から混合気分布が重要である。このようなシミュレーション解析技術を用いることで、最適な混合気を形成するインジェクタ仕様から、燃焼室や吸気管形状、さらには燃焼コンセプトを提案している。

シミュレーション解析技術を駆使し、筒内噴射用燃料サブシステムと可変動弁システムをコアとした高効率化、補機の低損失化、各種機器を最適駆動するシステム制御、将来に向けた圧縮着火システムなど、CO₂排出量削減に対するソリューションを引き続き提案していく。



注:略語説明 CAD(Computer-aided Design)

図5 シミュレーション解析技術

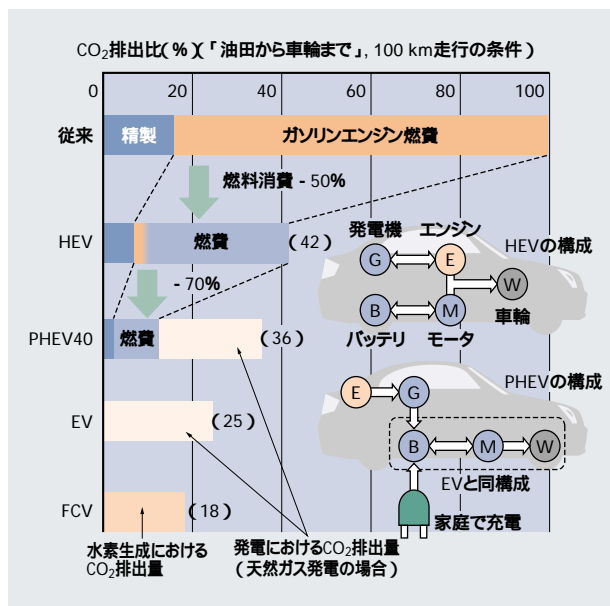
エンジン燃焼シミュレーション解析技術では、ボクセル法によるメッシュ作成高速化と非定常乱流モデルによる精度向上を図っている。この解析技術に基づき、製品コンポーネントの仕様決定および燃焼コンセプトを提案している。

3. ハイブリッド電気自動車によるCO₂削減技術

3.1 ハイブリッド電気自動車の動向

自動車単体のCO₂排出量削減では、エンジンの燃費低減に加え、HEV(Hybrid Electric Vehicle:ハイブリッド電気自動車)への期待が高まっている。さらに、家庭でバッテリー充電可能なPHEV(Plug-in HEV:プラグインハイブリッド電気自動車)の実用化をめざし、開発が進められている。図6に、HEV、将来のPHEV、EV(Electric Vehicle:電気自動車)、FCV(Fuel Cell Vehicle:燃料電池車)のCO₂排出量比をまとめて示す。なお、CO₂排出量比の試算は各種機関が公表しているWell to Wheel(油田から車輪まで)総合効率を用いている^{7)~9)}。HEVは国内の10-15モード燃費を用い、PHEV40(40マイル=約64kmをバッテリーで走行)は米政府機関の公表値を、EV、FCVは文献⁹⁾の数値をそれぞれ参考にする。100km走行した場合を条件としている。また、PHEVやEVの発電は天然ガスの効率を用いた。同図中にはシステムの構成例として、HEVはシリーズ・パラレル方式を、PHEVはエンジンを発電用に用いるシリーズ・ハイブリッド方式をそれぞれ示す。各矢印はパワーの流れを表している。

CO₂排出量は、従来エンジンからHEVへの置き換えで約50%削減され、さらにHEVをPHEVにすることにより、バッテリー走行の効果で約70%低減される結果が出た。総合すると、



注:略語説明 HEV(Hybrid Electric Vehicle)、PHEV(Plug-in HEV) EV(Electric Vehicle)、FCV(Fuel Cell Vehicle)

図6 CO₂排出削減をめざすHEVの動向

PHEV、EVなどの電動化によって大幅なCO₂削減の可能性がある。

HEVに対するPHEVのCO₂排出比は約6%の差であるが、これは天然ガスという化石燃料での発電を想定しており、原子力、風力などの発電を考慮すると、その差はさらに大きくなる。このように、HEVからPHEV、EVへの電動化によってCO₂排出量の大幅な削減が可能と考えられる。

上述のことから、HEVから持続的な電動走行を可能にするPHEV、EVに対応するために重要なキー技術として、バッテリーの高容量化、モータやインバータの高パワー化、高耐熱化に関する研究開発を進めている。

3.2 HEV用電池技術

HEV用電池として高エネルギー密度、高パワー密度(入力性能)と長寿命が得られるLIB(Lithium-ion Battery:リチウムイオン二次電池)が今後の主力として注目されている¹¹⁾。日立グループは、1990年代の初頭から大型LIBの研究開発を推進してきた。そこでは、電池の性能を最大限に引き出し、かつ安全に動作させるためのセルコントローラも同時に開発しており、EV(四輪向け、二輪向け)やHEV用途で世界に先駆けて市販車両に採用されるなど、実績を上げている。

日立グループのHEV用LIBのロードマップを図7に示す。2000年に、出力1.8 kW/kgレベルの第一世代LIBを市場投入し、実用化を開始した。その後、2005年には性能を1.5倍向上させた3 kW/kgの第二世代LIBを開発し、用途拡大を果たした。現在、配送用ハイブリッド小型トラックやハイブリッド鉄道車両などに採用されている。

パワー密度の向上では、車両走行時のエネルギー回生とパワーアシスト性能向上に直結し、燃費性能改善およびCO₂

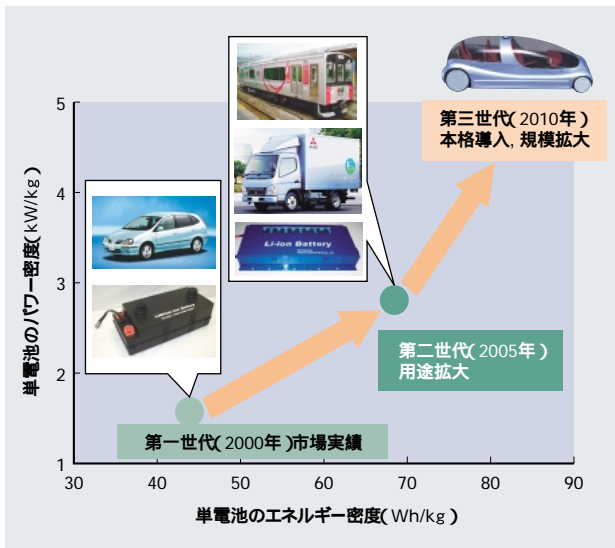


図7 HEV用リチウムイオン二次電池のロードマップ
 パワー密度の向上は、車両走行時のエネルギー回生とパワーアシスト性能向上に直結するため、燃費改善に貢献し、CO₂削減に有効である。

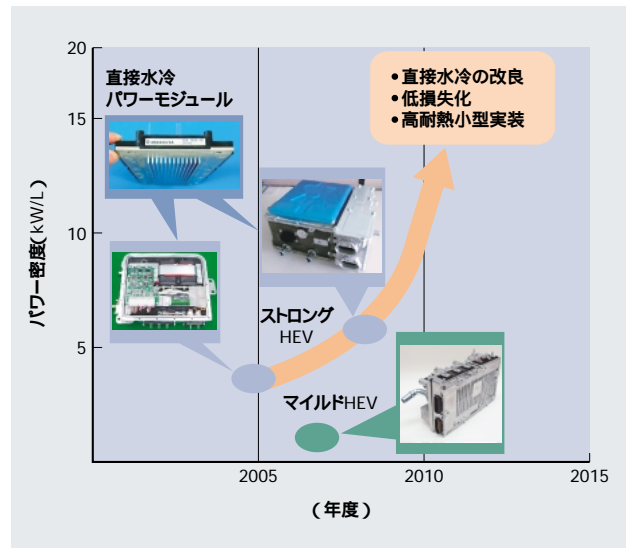


図8 HEV用インバータのロードマップ
 ストロングHEV:300 V級のモータを使用し、加速アシストが可能であり、マイルドHEV:42 V級モータで主に始動と回生制動に用いる。

排出量削減に有効であると考えられる。そこで、現在、電池の抵抗損失を大幅に低減することでパワー密度のさらなる向上を実現する技術開発に取り組んでいる。今後は、2010年以降のHEVの本格導入をめざして、第三世代としてLIBの素材開発から電池の制御技術まで幅広い開発を推進し、HEVに最適なLIBシステムを提案していく。

3.3 HEV用インバータ技術

HEV用インバータでは、産業用とは異なり、定格負荷で定常運転することがほとんどなく、自動車の運転状況に応じて出力は随時変化する。そのために、インバータの心臓部に相当するパワーデバイスは熱的な条件で電流定格が決定する。出力が数十キロワットを超える高電圧HEV(ストロングHEV)の場合、パワーデバイス冷却に水冷方式を用いるが、日立グループでは、直接水冷¹¹⁾という独自方式を開発している。日立グループのHEV用インバータのロードマップを図8に示す。ここで言うパワー密度とは、瞬時最大出力の総量をインバータ装置体積で割った値である。図中に示す直接水冷は、パワーモジュール底部(銅ベース)に水冷フィンを形成することが特徴であり、モジュールと冷却フィンを別体にした間接水冷に比べて、放熱グリスを使用しないため、熱抵抗が約25%低減する。冷却水温度は75℃を上限としている。低電圧(42 V級) HEV(マイルドHEV)用¹²⁾では、エンジン冷却水を用いた間接水冷が特徴である。

今後、日立グループは、将来的な高パワー化と耐熱化に対する技術として、直接水冷をさらに改良するとともに、パワーデバイスの低損失化とインバータ全体の高耐熱・小型実装を開発し、ハイブリッドにおけるソリューションを提案していく。特に、低損失化はデバイスの特性向上やバスバー配線のインダ

クタンス低減により、大電流スイッチング時の過渡的な損失を減少させる技術開発を進めていく。

4 .ITS活用によるCO₂削減技術

自動車本体の性能向上に加えて最近注目されているのが、ITSによるCO₂排出量削減技術である。燃費に影響を与える要因と、その改善技術の概要を図9に示す。ITSで対応可能な要因には、運転操作と道路状況があり、これらに対応した技術について以下に述べる。

4.1 運転操作の改善によるCO₂削減

自動車の燃費性能は、運転操作によって変化する。急発進をせず、ゆっくりアクセルを踏む運転操作によって、燃費性

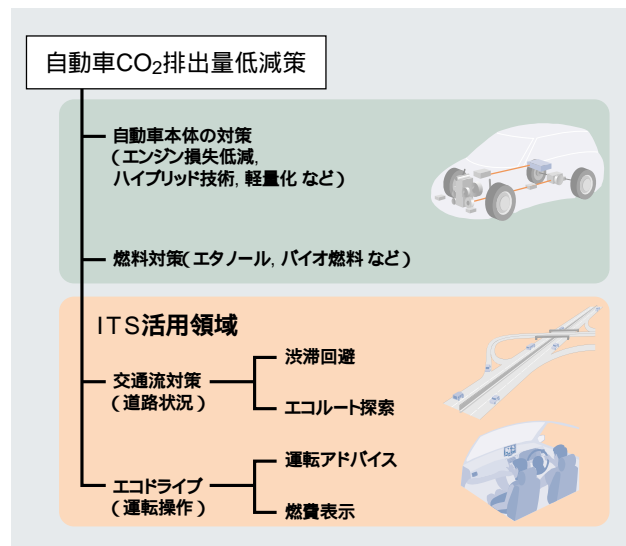


図9 燃費に影響を与える要因とその改善技術
 自動車本体の性能向上に加えて、運転アドバイス、燃費表示やエコルート探索のようなITSによってCO₂削減を図る。

能は、最大20%の差が出る事が報告されている¹³⁾。ドライバーの運転傾向を分析したうえで適切な運転アドバイスを行い、燃費を抑えた運転を促す車載情報端末も開発されている¹⁴⁾。

4.2 運転ルートの適切な選択によるCO₂削減

道路状況に応じて適切な道案内を行うことで、燃費を抑制する試みが行われている。日立グループは、統計技術やブローカーを活用し、高精度に旅行時間を予測する技術を開発している。これによって、渋滞を避けて最も早く目的地に到着する経路をドライバーへ提示することができる。この技術は、日産自動車株式会社へ提供しており、実サービスとして運用されている¹⁵⁾。将来的には、地形の影響(高低差など)を考慮したCO₂排出量予測技術によって、さらに燃費の少ない経路案内へ発展すると考えられる。米国では、地方政府と自動車メーカーで、これに向けた取り組みが始まっている¹⁶⁾。

日立グループは、交通情報技術を発展させ、CO₂排出量削減に寄与する技術開発を引き続き推進する。

5. おわりに

ここでは、自動車のCO₂排出量を低減に向けて、日立グループが取り組んでいるエンジンの高効率化、ハイブリッド・電動化技術、ITS活用技術について述べた。

自動車業界では、CO₂削減に向けて、エンジンの高効率化、ハイブリッド・電動化技術、ITS活用技術に加えて、変速機を含めた動力を伝える駆動系の高効率化や、車両本体の軽量化、シャーシ部品による燃費向上など¹⁷⁾、総合的に取り組んでおり、さまざまな新技術の導入が今後も進展するものと予想される。

日立グループは、今後も、自動車のCO₂排出量を低減するための技術開発を総合的かつ多面的に推進していく考えである。

参考文献など

- 1) 高間, 外: 車両のCO₂低減策, 自動車技術, Vol.58, No.3, p.51~56 (2004.3)
- 2) 大須賀, 外: 低燃費・低排気の筒内噴射エンジン制御システム, 日立評論, 86, 5, 356~361 (2004.5)
- 3) M. Nakamura, et al.: A Continuous Variable Valve Event and Lift Control Device (VEL) for Automotive Engines, SAE Paper No.2001-01-0244 (2001.3)
- 4) A. Fuerhapter, et al.: The New Avl Csi Engine-Hcci Operation on a Multicylinder Gasoline Engine, SAE Paper No.2004-01-0551 (2004.3)
- 5) 角谷, 外: ガソリンHCCI制御システムの開発(第2報) 気筒別燃料制御による多気筒エンジンのHCCI燃焼安定化, 自動車技術会論文集, Vol.37, No.4, p.75~80 (2006.7)
- 6) 渡辺, 外: CO₂排出量を削減するエネルギー利用技術, 日立評論, 88, 12, 974~979 (2006.12)
- 7) 寺谷: 自動車を取り巻く環境変化と将来展望, 平成19年電気学会産業応用部門大会, 2-S5-1, -21~-32 (2007)
- 8) National Renewable Energy Laboratory (NREL), <http://www.nrel.gov/docs/fy07osti/40609.pdf>
- 9) IEEE-USA, <http://www.ieeeusa.org/policy/phev/presentations/Panel%201%20Wiegman.pdf>
- 10) 増野, 外: HEVサブシステムの制御技術と今後の展望, 自動車技術, Vol.59, No.2, p.91~94 (2005.2)
- 11) 経済産業省 次世代自動車用電池の将来に向けた提言, <http://www.meti.go.jp/policy/automobile/LEV/battery-report.pdf>
- 12) 志賀, 外: ゼネラルモーターズ(GM)社向けBASハイブリッドシステムの開発, 日立評論, 89, 1, 45 (2007.1)
- 13) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO) 平成16年度事業原簿, 事業評価書, http://www.nedo.go.jp/informations/other/170930_1/24i.pdf
- 14) 株式会社ピボット, <http://pivotjp.com/product/frame-e-drive.html>
- 15) 古賀, 外: 最速ルート探索システムの開発, 日産技報, No.61, p.51~54 (2007.9)
- 16) PATH Projects, <http://www.path.berkeley.edu/>
- 17) 特集: 燃費向上への挑戦, 自動車技術, Vol.62, No.3, p.4~91, (2008.3)

執筆者紹介



石井 潤市
1978年日立製作所入社, オートモティブシステムグループ
オートモティブシステム開発研究所 開発戦略室 所属
現在, 自動車システムの研究開発戦略に従事
電気学会会員, 自動車技術会会員, SAE会員



宮崎 英樹
1983年日立製作所入社, 日立研究所 情報制御研究センター
インバータイノベーションセンター 所属
現在, 自動車用インバータの研究開発に従事
電気学会会員, 電子情報通信学会会員



大須賀 稔
1979年日立製作所入社, オートモティブシステムグループ
パワートレイン事業部 パワートレイン設計本部 制御システム設計部 所属
現在, 筒内噴射などエンジンシステムの開発に従事
日本機械学会会員, 自動車技術会会員



小関 満
1976年新神戸電機株式会社入社, 日立ピークルエナジー株式会社 設計開発本部 所属
現在, 車載用リチウムイオン電池の開発に従事
電気化学会会員



岡田 隆
1990年日立製作所入社, 日立研究所 情報制御研究センター
情報制御第三研究部 所属
現在, 自動車パワートレインの研究開発に従事
日本機械学会会員, 自動車技術会会員, 計測自動制御学会会員



谷越 浩一郎
1987年日立製作所入社, 研究開発本部 研究戦略統括センター 所属
現在, 研究戦略・マネジメントの業務に従事
情報処理学会会員, ACM会員