

ディーゼルイノベーションの新展開

～人とくるまのテクノロジー展 2017 フォーラムから～

神鋼リサーチ (株) 宮内重明

2017年5月にパシフィコ横浜において「人とくるまのテクノロジー展 2017 横浜」が開催された。本展示会は公益社団法人自動車技術会が主催する春季学会に併設された展示会である。国内自動車メーカーをはじめとする自動車関連企業(550社)が出展しており、自動車関連の技術者・研究者など90,687人(累計)が来場した。今年には自動車技術会創立70周年にあたり、これを記念した特別講演や1950年代以降の名車が特別展示されるなど、例年にもまして盛況であった。

同展示会では自動車関連の技術動向を議論する20件のフォーラム(講演会)が企画された。それらのフォーラムのうち、ディーゼル機関部門委員会が企画した「ディーゼルイノベーションの新展開」フォーラムを聴講した。同フォーラムはディーゼルエンジンの熱効率改善を目指した研究開発動向がテーマとなっている。

米国の総合エネルギー企業: Exxon Mobil Corporation の試算によると、大型車両での全エネルギー消費量は2040年には2010年から65%増加して、小型車両の全エネルギー消費量に匹敵すると予想されている。また、同社からは、輸送機器用燃料全消費量の伸びのうちディーゼル(軽油)の伸び率は70%を占めており、これはアジア・太平洋、北米、ヨーロッパなどの地域において共通の傾向であることも報告された。今後とも物流の担い手はディーゼルエンジンを搭載した大型車である。一方、2020年代には世界的に排気ガス、燃費、騒音に関する規制が大幅に強化される予定であり、自動車用エンジンへの風当たりが強い。排出ガス規制、燃費規制の強化に対応するために、ディーゼルエンジンの熱効率改善は大きな課題といえる。

輸送機器からのCO₂排出量を抑えるためには、エンジン、車両、インフラ面からさまざまな方策が必要とされる。エンジンの研究・開発者の立場からはエンジンの熱効率の改善が急務である。エンジンの熱効率とは、「燃焼によって発生した熱エネルギー」に対する「得られた仕事量」の割合である。ディーゼルエンジンの熱効率は42~45%であり、ガソリンエンジンは30%程度である。これらのエンジンでは熱エネルギーの約半分を捨てていることになる。自動車以外のエンジンを見ると、例えば発電用ガスタービンエンジンはトリプルコンバインドサイクルによって総合効率:70%を実現している。また、大型船用2サイクルエンジンでは正味熱効率:最大55%を実現している。エンジンの研究・開発者の間では、自動車用ディーゼルエンジンにおいても大型船用2サイクルエンジンと同等の正味熱効率(55%)を目標にすることが妥当であると考えられている。

エンジンの熱効率を向上させるためには排気損失、冷却損失、吸排気損失(ポンピングロス)、機械損失を低減する必要がある。これらの損失をすべて考慮した熱効率を正味熱効率、機械損失を考慮から除いた熱効率を図示熱効率と呼ぶ。エンジンを使用する上では、正味熱効率が実際の熱効率になる。これらの損失を低減するために、エンジンの小型化、EGRシステム(排気再循環システム)、摩擦抵抗低減などの対策が施されているが、これらによる損失低減も限界に近づいている。今後はエンジン設計の基本に立ち戻って、図示熱効率を向上させる必要があり、高圧縮比化、燃焼制御(燃焼期間短縮、等容度上昇)、などが指向されている。また、エンジン特性は多くの制御因子によって支配され、制御因子は複雑に関連していることから戦略的な技術開発が求められている。

米国では、1988年~1997年に、熱効率:55%を目標としたLE-55プロジェクトが実施

された。LE-55 プロジェクトでは、「超ロングストロークによる高圧縮比化」、「熱遮断コーティングの適用」など斬新なアイデアが提案されたが、プロジェクトにおいて「詳細な計測」、「数値シミュレーション解析」等による新技術適用効果の検証が不十分であった。また、熱効率：55 %を狙うための戦略が不明確であったため、具体的な成果が得られずに終了した。

日本では、(株)新エイシーイー (NACE)、SIP「革新的燃焼技術」プロジェクトなどで高効率ディーゼルエンジンの研究開発が進められている。NACE は、前身の(株)新燃焼システム研究所 (Advanced Combustion Engineering Institute Co., Ltd. : 1987年2月設立)の基礎研究成果を受け継ぎ、さらに低公害・高効率ディーゼル燃焼システムの実用化研究を進めるために1992年に設立された株式会社である。NACE では、ACCORDIC : Actively Controlled Rate of Diesel Combustion と呼ぶ燃焼コンセプトに従って燃焼効率の向上を図っている。ACCORDIC 燃焼コンセプトを実現するために、1気筒に3基の燃料噴射装置を装備した試験エンジンが試作されている。試験エンジンでは、3基の燃焼噴射装置の噴射率、噴射タイミングを制御して燃料を複数回噴射することが可能であり、気筒内での熱発生形状を任意に制御することができる。NACE は、ピストン上死点付近での燃焼条件を制御することで熱効率を最大化できることを明らかにしている。

SIP「革新的燃焼技術」プロジェクトでは、燃料と空気の高度な混合制御により燃焼の高速化と冷却損失・放射騒音の抑制を両立する新燃焼法を開発している。プロジェクトの目標は正味熱効率：50%である。同プロジェクトでは、燃焼現象を解明してそのモデル化を行うと共に、新燃焼法コンセプトを構築して数値シミュレーション、実機で実証を行うという戦略で研究・開発を進めている。2016年度は「独立二噴射弁による噴射率可変技術」、「噴射・火炎高速度撮影による燃焼解析技術」、「光学計測による後燃え原因の解明」、「TAIZAC (TAndem Injectors Zapping ACTivation) 燃料噴射装置の開発」、「壁面衝突噴霧火炎の熱流速計測」、「冷却損失の数値計算精度向上」などの多大な成果を挙げており、2018年度にはこれらの技術を実証段階まで高度化する予定にある。

マツダは、熱効率が最大となる条件を求めるために計算機シミュレーションを活用している。同社はディーゼルエンジンの熱効率向上のために圧縮比、比熱比、燃焼期間など7つの制御因子を選択し、各制御因子を変化させて燃焼条件の最適化を行っている。最適化には計算機シミュレーションを活用し、ディーゼル燃焼の不均質さを考慮して、2領域モデル(燃焼領域と非燃焼領域を区別した燃焼モデル)を採用している。この2領域モデルは、想定した燃焼状態から熱効率(筒内圧力変化などから算出)を計算する「計算解析」だけでなく、実際の筒内圧力変化から燃焼状態を解析する「実機指圧データ解析」にも活用されている。圧縮比(14→20)、比熱比(吸気温度：80℃→30℃、空気過剰率：1.53→2.0、既燃焼領域での空気過剰率：1.3→2.0)、燃焼期間(38degCA→10degCA)などを変更することにより、ベースエンジンに対して図示熱効率を28%以上改善できることが計算から確認されている。また、これらの最適燃焼条件を実現するために、ピストン形状の工夫、近接多段噴射制御技術の開発を行っており、効果も検証されている。

日野自動車は、ディーゼルエンジンの熱効率向上のために高圧縮比化を指向している。しかし高圧縮比化により熱損失増加(燃焼空間の狭小化)、騒音増加(筒内最高圧力の上昇)、スモーク悪化(燃焼場の高温、高密度化)という課題が発生しており、それぞれの課題に対してピストン形状の改良、燃焼噴射率制御、燃焼の希薄化で対策している。また、同社からは大型車用の高速道路走行に適応したHVシステムが紹介された。高速道路の走行で

は頻繁な発進・停止がないため、減速・停止に伴うエネルギー回収が難しい。このため、下り坂で位置エネルギーを回収することを目的に、走行抵抗を低減すべく車体の空力を改善している。東名高速道路で実路走行試験を行ったところ、非 HV 車に対して 36.9%の燃費低減効果が得られている。また、同社は、排熱回生システムとしてエンジン冷却水や排気ガスの熱エネルギーによって作動流体を気化させてタービン発電機を駆動することにより発電するランキンサイクル (Rankine cycle) を検討している。ランキンサイクルはエンジンで利用できなかった熱エネルギーの回収手段として有効であり、主に運動・位置エネルギーを回収する HV との相性もよい。

物流を担う大型車には長距離走行が求められるため、EV 化が困難である。このため、ディーゼルエンジンの高効率化が急務であり、高圧縮比化をはじめとする、各種制御因子の最適化が戦略的に検討されている。また、エンジンシステムとしての熱効率改善方法として、排熱回生システムの採用や HV 化なども検討されている。将来的には、圧縮比と膨張比を独立して制御するサバテミラーサイクルも研究されており、今後の成果が期待される。

以上