

講演 1. 重量車におけるカーボンニュートラル化に向けた取組

上席研究員 新国 哲也 鈴木 央一

1. はじめに

商用を主とする重量車の動力源には、主に原油から精製される軽油を燃料とするディーゼルエンジンがこれまで用いられてきた。これは、コスト、効率、利便性、性能（出力、航続力）など、実用上重要な要素について、他の動力源に対して圧倒的に優位性があったためである。これらの要素以外に普及を左右する重要要素としては、環境性能が挙げられる。ディーゼル車による大気汚染問題が深刻だった 2002 年に、国土交通省は「次世代大型車開発・実用化促進プロジェクト」を立ち上げ、ディーゼル車に置き換わりうる技術として、排出ガス性能に関するポテンシャルの高い天然ガス、ジメチルエーテル、水素などを対象に技術指針策定等に向けた技術開発支援なども実施した。それらでは、窒素酸化物（NOx）と粒子状物質（PM）について当時の排出ガス規制値の 1/10 レベルという超低排出ガス性能を達成し、抜本的な大気環境改善に向けた可能性をいち早く提示した。ただし、その後ディーゼル車の排出ガス性能が大きく改善されると、天然ガス等の優位性の主たる部分は失われたため、これらの技術については、大規模な普及には至らない結果となった。近年では、地球温暖化をもたらす CO₂ などの温室効果ガス削減がクローズアップされている。今後は 2050 年カーボンニュートラル実現に向けて、重量車についても電動車や水素燃料自動車の開発・導入等がさらに進められていくと考えられる。

一般に急速に動力源が置き換わる際、例えば帆船から蒸気船、蒸気機関車から電車や気動車、プロペラ機からジェット機などへの移行をみると、置き換わる側が実用面で圧倒的に高いポテンシャルを持っており、公的な普及策などを必要とせずその後の主流となった。環境性能による置き換えの場合は、既述のような自然な流れのみでは難しく、政策的な普及策などを組み合わせながら、置き換えによるメリットがある、あ

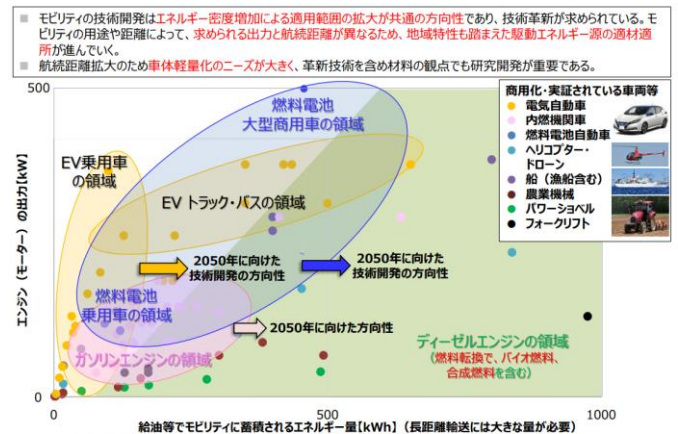


図 1 モビリティに蓄積されるエネルギー量と動力源の出力の関係¹⁾

るいはそれでビジネスモデルが成立するカテゴリから順次進められていくと考えられる。

長距離輸送に使用されることが多い大型トラックでは、上記の実用上の要素のうち、とりわけコストと航続距離（それを決定する因子となるエネルギー密度）が重要となる。様々な動力源を搭載した車両のエネルギー搭載量などについて比較したものを図 1 に示す¹⁾。この図における計算では、現行の長距離トラックは、出力が 300kW 程度である一方、搭載されるエネルギー量は 1000kWh を超えるレベル（図の枠外）となる。現状では EV や燃料電池車で同等なレベルのエネルギー量を搭載することが不可能であるため、代替することは当面困難とみられる。一方、同じ重量車であっても、都市内走行を中心とする小型トラックや路線バス等においては、そこまで搭載エネルギー量が多くないことに加え、多くが毎日同じ拠点に発着するため、新エネルギー車両の導入につきもののインフラ面（例えば EV の場合は充電器の設置など）の課題が少ない。そういった車種では比較的短期間に電動化が進む可能性が高い。したがって、次世代の重量車技術

に関するカーボンニュートラル化について検討していく場合、電動化に加えて内燃機関の活用によるカーボンニュートラルの実現も検討を進めることが重要と考えられる。国土交通省が実施している「産学官連携による高効率次世代大型車両開発促進事業（以下、「次世代事業」という。交通安全環境研究所は中核的研究機関として本事業に参加）」においては、電動化を含む「車両技術」に加えて「内燃機関」「後処理」の3つのワーキンググループ（WG）を設置して、大学、民間企業と共同で調査研究を進めている²⁾。実施体制を図2に示す。

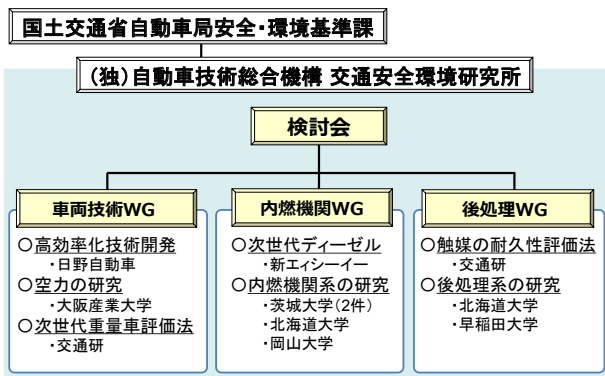


図2 次世代事業の実施体制図

本報告では、交通安全環境研究所における重量車を対象としたカーボンニュートラルに向けた取り組みとして、実施中の次世代事業における成果の一部を紹介するとともに、水素やカーボンニュートラル燃料を対象に今後基準や評価法に関する検討が必要と見込まれる事項について述べていく。

2. 次世代事業で得られつつある成果について

次世代事業は、令和3年度が5年計画の3年目にあたり、最終的な目標達成に向けて引き続き業務を進めている。これまでに得られている成果の一部について紹介する

2. 1. 車両技術関連

車両技術WGでは、4件の調査研究テーマが実施されている。そのうち、本報では「重量車のパワートレイン改良による電費向上効果の検討（実施：横浜国立大学）」で得られている成果について紹介する。本研究は重量EVにおける今後の技術進化による改善しるを予測しようというものである。2020年度にはSiC

インバータの採用による電費向上効果について、シミュレーションを用いた予測を行った。

SiCインバータと、それと比較対象となるIGBTインバータについて、それぞれ単体で50Aレベルの既製品素子を15個並列にした回路を設計し、効率を回路シミュレーションにより求めた。

二つのインバータの効率の差分をマップとして示したものが図3である。SiCインバータ素子の方が電力変換効率が高いものの、大半のエリアにおいては差が小さい。ただし、IGBTインバータでは回生（トルク値マイナス）が困難な低速回転においては、最大20%の差が見られ、回生を多く使用するような状況では電費に差をもたらす可能性がある。

図3の結果に、車両モデル、パワートレインモデル、ドライバモデルなどを合わせて走行燃費への影響について調べた。車両は一般的な4t積載クラスのトラ

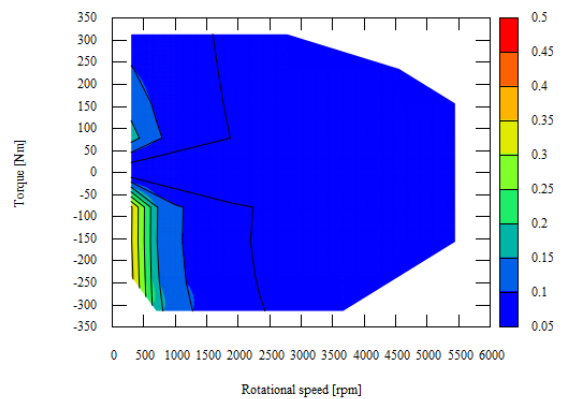


図3 SiCインバータとIGBTインバータの効率の差分

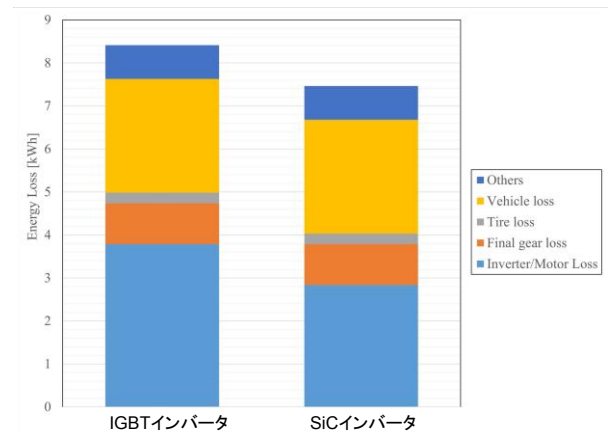


図4 IGBTインバータとSiCインバータ使用時のJE05モード走行時のエネルギー消費の内訳

ック（計算車両重量 7.7t）とし、バッテリーを 47.7kWh 搭載し、駆動には仮定として乗用 EV 用モータを 2 個使用するものとした。

図 4 はその計算結果である。都市内走行を代表する JE05 モードでは、インバータ・モータの損失が全体の半分近くを占めることから、インバータ効率の影響が大きく現れたと考えられ、約 10% の電費改善効果が得られた。なお、同じモータを 4 個持つ総重量 25t の大型トラックを想定して評価したところ、走行仕事に占めるモータ・インバータの損失は大幅に小さい割合になった。一方、低速回転数での回生頻度が増加したため、約 7.6% の改善効果が得られた。このように車両や走行パターンの違いによる改善効果の違いが適切に評価されたと考えており、シミュレーションに使用したモデルは定性的に妥当なものと考えられる。

今年度以降は、可変磁束モータあるいは変速機の導入などによる電費影響調査、さらには一部実機を用いた検証などを行う。

2. 2. 内燃機関関連

内燃機関 WG では、5 件の調査研究テーマが実施されている。その中には、すすやデポジットなどの生成メカニズムに関する研究から、軽油点火の圧縮天然ガスエンジンにおける自着火特性の分析を対象とするものまで、幅広い研究が存在している。本報では、ディーゼル機関の熱効率向上に取り組んでいる「大型ディーゼル機関において画期的熱効率向上を実現するための冷却損失低減技術に関する調査（実施：株式会社新エイシーイー）」における結果のうち、冷却損失低減に関する研究を取り上げる。

冷却損失は、ピストンやシリンダを通して熱エネルギーが失われてしまうことが主であり、それらを断熱化する試みは過去にも行われてきたものの、概ね良好な結果は得られていない。これは、単に断熱をしても燃焼室内の温度上昇により吸入温度が上昇し、サイクル全体でのエネルギー損失が結果的に増加するため、断熱化による効果を相殺してしまうことによる。こうした課題を解決するためには、筒内壁面温度としては燃焼から膨張行程では高温を確保しつつ、吸気から圧縮行程ではむしろ温度を低下させることが望まれる。このような課題に対して、乗用車用ディーゼル機関を対象に、圧縮時と膨張時の壁温の変化幅を増大させる技術が発表されている⁴⁾。ここでは、最大筒内圧力が高く耐久性が要求される大型車用の鍛造鋼製ピスト

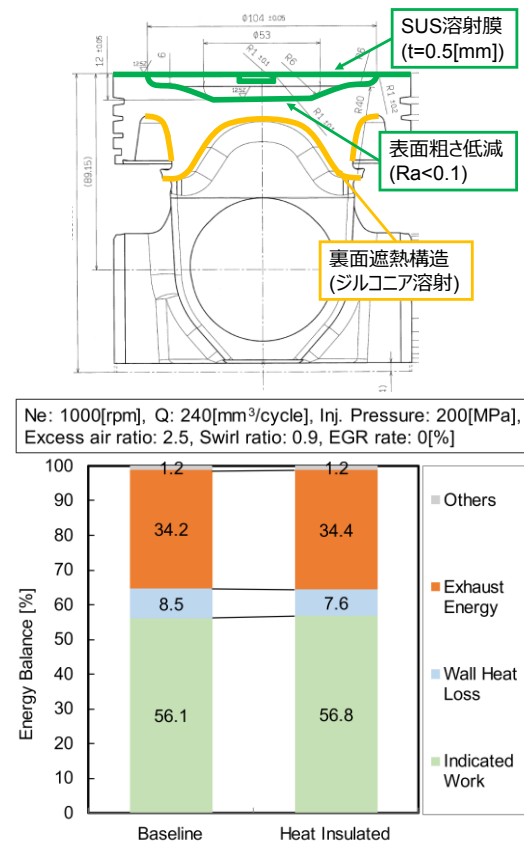


図 5 ピストン表面及び下面の断熱加工（上図）とそれによる正味仕事、各種損失などの変化（下図）

ン等にも適用可能なものとして、ピストン表面を低粗度化（以下、便宜上「鏡面化」という）するなどした結果を見ていくことにする。

まず単にピストン表面を鏡面化するだけでは、冷却損失の有意な低減効果が得られなかったことから、従来の断熱化技術とは異なる構造としてピストン頂面に薄いステンレス（SUS）層を溶射した上でピストン裏面にジルコニア溶射を行った。図 5 に示すとおり 0.9 ポイントの冷却損失の低減が可能となり、その多くを図示仕事の増加につなげることができている。

その改善効果の分析については今年度以降も進めていくことになるが、狙い通り燃焼から膨張行程においては高い圧力を維持できている一方で、圧縮時の圧力が低下していることがわかっている。その理由として壁面温度の不均一性や輻射伝熱の影響が考えられ、表面の瞬時温度計測による熱流束の解析などによりその影響を解析し、さらに断熱構造などを改善する調査を今後行っていく。

2. 3. 後処理関連

後処理 WG では、3 件の調査研究テーマが実施されており、ここでは「還元剤濃度の能動的制御による尿素 SCR 触媒システムの浄化性能向上の調査（実施：早稲田大学）」の研究の成果を取り上げる。本研究では、とくに NO_x 浄化を行う尿素 SCR において還元剤の効果的な添加制御手法に着目している。還元剤である尿素水から加水分解等を経て生成されるアンモニアは、NO_x 還元の有効であるものの有害であり、そのまま排出されることは防がなくてはならない。そのため SCR 触媒後段に酸化触媒が設置されることが多いが、アンモニアが酸化されると温室効果ガスである一酸化二窒素 (N₂O) になる反応プロセスもあり、還元剤を NO_x 還元効果的に使うことの意義は大きい。

図 6 は、還元剤となるアンモニアの間欠的な添加に関するパラメータについて示したものである。定常的に 300ppm で供給し続けた場合と、それより高い濃度のアンモニアを間欠的に供給させ、そのインターバルを変数（図 6 における「dt_{off}」）としている。その際、各条件のアンモニア供給量は定常的にアンモニアを供給する場合と同一である。

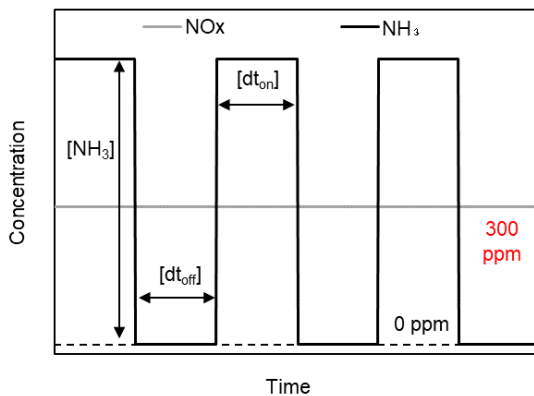


図 6 尿素水の間欠的な添加のイメージ

そのときの浄化率の変化について図 7 に示す。間欠的に供給した場合には NO_x 濃度と同一濃度を連続的に供給した場合（浄化率約 40%）よりも全体的に高い浄化率を示した。とくに 1200ppm など高い濃度を 120 秒程度のインターバルで供給したときに高い浄化率を示した。これは触媒上のアンモニア吸着量は多い方が浄化性能につながる一方で、アンモニアが飽和吸着となった場合に硝酸アンモニウムが生成して触媒活性表面を被覆して NO_x 浄化を阻害するケースが

あるため、最適間隔が存在したと推測された。ただし、この値は温度や触媒の物性により変化するものであり、今後各要素の値を入れた汎用性の高い理論式を求める検討を行う。

本結果は、触媒テストピースを用いたリアクタ試験で実証されたモデルを用いたシミュレーション結果によるものであるが、今後実機を用いた検証を実施していく。

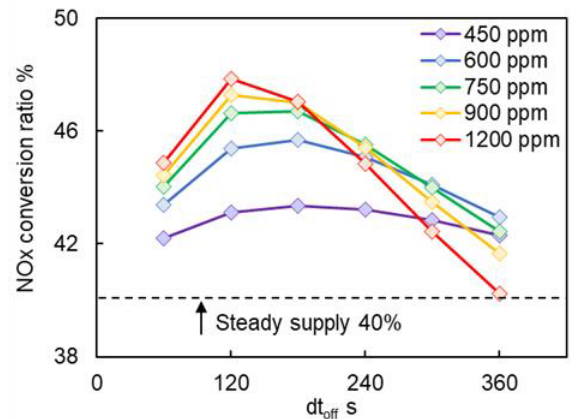


図 7 還元剤の間欠供給の違いによる NO_x 浄化率変化

3. カーボンニュートラル化に向けた評価方法の検討など

今後カーボンニュートラル化に向けて、多様なエネルギー源、具体的には電気、水素、アンモニア、カーボンニュートラルな軽油互換の液体燃料（それを代表するものとして以下、「e-fuel」という）などの利用拡大が見込まれる。このうち水素、アンモニア、e-fuel は、燃焼をさせると NO_x 等の有害成分を生成する可能性がある。電気を用いる場合、使用過程でのバッテリー容量低下など性能変化が課題となり得る。また、水素燃料電池車 (FCV) においては、軽・中量車においてはすでに水素消費率がカタログ等にも記載されている一方で、重量車における水素消費量測定はこれからの課題といえる。

ここでは上記のうち、e-fuel における排出ガスの問題と、FCV における水素消費量測定についてみていくこととしたい。

3. 1. e-fuel について

長距離トラック等においては既述のようにディー

ゼルエンジンが当面必要と見込まれ、それらに e-fuel を用いることが考えられる。

過去に交通安全環境研究所において、バイオ燃料（菜種油メチルエステル：RME）を用いて当時の最新排出ガス低減装置を有する車両にて性能評価を行ったところ、NO_x 排出量が 2 倍以上に増加するなど大きく性能が悪化する例がみられた⁵⁾。これは昨今の制御の高度化が進む車両においては、燃焼、過給機、後処理等の制御において、現行の軽油を前提に高度に最適化されており、それから外れた性状の燃料が使用された結果、排出ガス性能が大きく変化したと考えられる。一方で、RME が分子構造中に酸素を含み、燃焼時の PM 生成が少ない特性を生かして、より積極的に排出ガス再循環（EGR）を行うなど制御を変更することで、軽油使用時よりも NO_x 等を低減することが可能となり、有害排出物抑止のポテンシャルの高さも示された。

また、高濃度バイオ燃料により 2009 年規制適合の重量車用エンジンを運転して評価を行った試験において、未規制成分であるアルデヒド排出量や粒子数（PN）排出が増加したとする例がある⁶⁾。

これらの性能変化は、燃料噴射系や過給器などエンジン技術及び排出ガス後処理装置や、その制御技術の進化により影響度が変化すると見込まれる。そこで、その時々最新の技術における e-fuel 使用時の性能変化について見ていながら、大気環境改善につながる低排出ガス性能を維持していく取り組みを継続していくことが必要と考えられる。

3. 2. 水素消費量評価について

重量車については、FCV 等水素を燃料とする車両の燃料消費率測定法は現時点では定められていない。ただし乗用車等の軽・中量車における水素消費量評価法については、すでに「軽・中量車の世界統一排出ガス測定法に係る協定規則（第 154 号）」でも定められており、WLTC を走行した際の水素消費量を試験前後の水素ボンベの重量差から求める重量法が、主に使用されている。その国際的な検討に際しては交通安全環境研究所において実施した精度検証等の試験調査⁷⁾を報告している。

一方、重量車における燃費評価方法は、モード試験中の燃料消費を直接測定するものではなく、シミュレーション法が用いられ、燃費値自体は計算により求められるもので、軽・中量車とは抜本的に異なる。シミ

エンジン回転数 10点 トルク 5点

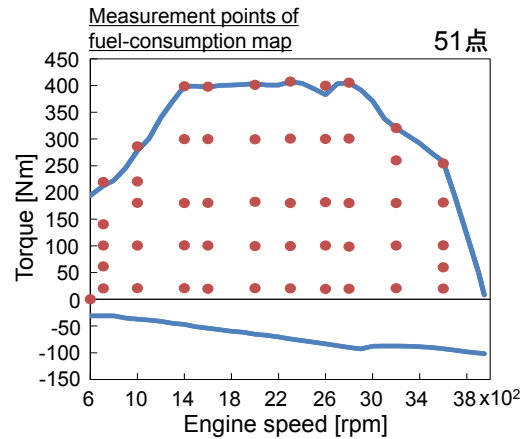


図 8 重量車燃費評価に用いられる燃費マップの測定点（赤丸）の例

ュレーション法に必要な実測データは、エンジン車の場合だとエンジンの回転数と負荷率で定められる多数の条件における燃料消費率を求めたデータ群である燃費マップになる（燃費マップのデータを取得することは FCV でも同様）。燃費マップの計測点の例を図 8 に示す。このような多数点の測定を重量法により測定するとした場合、数十 kg レベルのタンク重量（汎用の 47L ボンベの重量は約 50kg）に対して条件によっては数 g レベルの水素消費を測定することになり、精度確保には長時間の運転が必要になると見込まれることに加え、試験途中でボンベを切り替える場合の処置など、実運用面の課題が多いと考えられる。そのため、軽・中量車の測定でほとんど実績のない流量法や圧力法の適用を考慮した、実用的な試験プロセスを明らかにしていくことが重要であると考えられる。

こうした問題意識で実施した調査結果は、水素内燃機関、水素燃料電池のいずれにも活用できるもので、今後の重量車のカーボンニュートラル化を評価方法の面からアシストできると考える。

4. ま と め

トラック、バスなどの重量車におけるカーボンニュートラル化は、当面内燃機関も含めた広範な技術を用いて進められていくことが重要であると考えられる。国土交通省が進めている「産学官連携による高効率次世代大型車両開発促進事業」では、産学官連携で幅広い技術を対象に取り組んでおり、その一部を紹介し

た。

また、今後カーボンニュートラル化に向けて基準や試験法策定などにおいて課題になり得る要素の例として、e-fuel や水素消費量測定について取り上げた。これらの課題について、それが必要とされる機会を探りつつ、国土交通省が推進する次世代事業の中核的研究機関を担いながら、自らも研究を進めることを目指したい。

参考文献

- 1) NEDO ほか、「モビリティ／水素分野の技術動向について、」 https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/pdf/002_04_01.pdf
- 2) 鈴木央一、奥井伸宜、山本敏朗、柴崎勇一、坂本一郎、「産学官連携による高効率次世代大型車両開発促進事業の概要、」交通研フォーラム 2020、https://www.ntselsel.go.jp/Portals/0/resources/forum/2020files/poster/post_07_s.pdf
- 3) 自動車技術会フォーラム (21FORUM-6) https://www.jsae.or.jp/02event/2021forum/prog_21F-6.php
- 4) 脇坂佳史、稲吉三七二、福井健二、小坂英雅、堀田義博、川口暁生、「壁温スイング遮熱法によるエンジンの熱損失低減 (第 2 報) -単筒エンジンによる遮熱効果の先行検討-」自動車技術会論文集 Vol.46.No.1、p. 39-45、2016
- 5) 川野大輔 石井素 後藤雄一、野田明、青柳友三、「バイオマス燃料対応ディーゼルエンジンの研究開発」、交通研フォーラム 2007、<https://www.ntselsel.go.jp/Portals/0/resources/forum/2007files/07-05k.pdf>
- 6) 北村高明、松浦賢、「バイオディーゼル燃料によるポスト新長期規制適合エンジンの排出ガスへの影響」、JARI Research Journal 20140501
- 7) 小鹿健一郎、新国哲也、「FCV における水素燃料消費率測定方法の国内導入に関する検討、」交通研フォーラム 2017、<https://www.ntselsel.go.jp/Portals/0/resources/forum/2017files/P08.pdf>