

欧州5次排出ガス規制適合 2.0t～3.5t/3.5t～5.5t フォークリフト 向けディーゼルエンジンの開発

Development of Diesel Engines for 2.0t to 3.5t and 3.5t to 5.5t Forklift Trucks Complying
EU StageV Emission Regulation



山田 知秀^{*1}
Tomohide Yamada

山本 高之^{*2}
Takayuki Yamamoto

金井 瑞樹^{*3}
Mizuki Kanai

中村 翔^{*4}
Sho Nakamura

加藤 保雄^{*5}
Yasuo Kato

西澤 和樹^{*6}
Kazuki Nishizawa

欧州5次排出ガス規制 (EU Stage V: European Stage V Non-Road Emission Standards) 適合の D04EG エンジン開発に当たり、燃焼改善を実施するとともに、新たに必要になる DPF (Diesel Particulate Filter: ディーゼル微粒子捕集フィルタ) の制御の開発を行った。市場に合致した DPF 制御とし、DPF への煤 (Soot) 堆積を評価するため、複数のエンジンで市場での実稼働データを取得し、それらに基づいて評価指標を作成した。作成した評価指標で検証を行い、煤 (Soot) 低減により DPF 再生の頻度を大幅に低減できていること、DPF 再生のために作業を中断することなく、車両稼働中に DPF 再生を完了できることを確認した。さらに、フィールドテストを行い、所期の機能が実現できていることを、市場での実車両にて確認した。

1. はじめに

三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 (以下、当社) はこれまで、北米 Tier4 排出ガス規制対応エンジンなどを開発、商品化し、性能と信頼性、環境性能に優れたエンジンをお客様に提供してきた⁽¹⁾。

今回、欧州5次排出ガス規制対応のエンジン D04EG を開発した。欧州5次規制では、従来の排出ガス規制で規制される各項目の低減の他に、新たに排出ガス中の固体粒子数 (PN, Particulate Number) 規制が加わった。PN 規制対応のためには、事実上、DPF が必須となるため、エンジン稼働中に DPF に溜まった Soot を燃焼させる、DPF 再生制御が必要となる。DPF 再生制御の仕様によっては、作業を中断して DPF 再生を行う必要があるため、通常のエンジン稼働中に、的確に機能する DPF 再生制御の実現が、使い勝手の良いエンジンとするための重要なポイントとなる。

2. エンジン諸元

欧州5次規制対応エンジンの諸元を表1に示す。北米 Tier4 排出ガス規制対応エンジンに対して、欧州5次規制として必要となる DPF を新たに搭載した2機種を開発した。欧州5次規制対応のための燃焼改善に加えて、新たに必要になる DPF に関して、より低速低負荷まで含めた任意のエンジン運転条件での DPF 再生を可能とするため、新たに排気スロットルを採用した。DPF 不要

*1 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部技術部 主席技師

*2 三菱重工工業株式会社 総合研究所燃焼研究部 主席研究員

*3 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部技術部

*4 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部技術開発室

*5 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部技術部 主席チーム統括

*6 三菱重工工業株式会社 総合研究所化学研究部 主席研究員

の北米、国内仕様に対して、DPF と DPF 再生に必要な排気スロットルを追加するのみとし、さらに、DPF をエンジンから離れて搭載可能とすることで、搭載時の車両への影響を最小限に抑え、欧州5次規制に対応した。

排ガス規制適合に加えて、自由度の高い DPF 再生制御の実現により、クリーンで使い勝手の良いエンジンを実現したので、紹介する。

表1 エンジン主要諸元

エンジンモデル名		4EG-NA	4EG-T
ボア×ストローク	mm	94×120	94×120
気筒数	—	4	4
排気量	Liter	3.3	3.3
定格出力/回転数	kW/min-1	36/2 250	54/2 250
最大トルク/回転数	N・m/min-1	177/1 800	260/1 800
燃料噴射装置	—	電子制御式コモンレールシステム	電子制御式コモンレールシステム
吸気方式	—	自然吸気	WG 過給機
排ガス再循環	—	外部冷却式 EGR	外部冷却式 EGR
排ガス後処理装置	—	ディーゼル微粒子捕集フィルタ	ディーゼル微粒子捕集フィルタ
備考		北米4次規制対応機種に対し、以下の変更で欧州5次規制に対応 ・排ガス後処理装置をディーゼル微粒子捕集フィルタ(DPF)に変更 ・DPF 再生のための排気スロットルを新規採用。	

3. 欧州5次規制対応の技術

欧州5次規制のためには、PN 規制対応のためにDPF が必要となる。DPF 内部に捕集した Soot が一定量堆積したタイミングで、燃焼除去(DPF 再生)する必要がある、その頻度を減らすことが望ましい。そのため、エンジンからの Soot 排出量低減に取り組むとともに、DPF 再生に関しては、エンジン使用中の任意の稼働状況で再生が可能となるよう設定し、DPF 再生のための作業中断が不要となる制御を実現した。

3.1 DPF 再生頻度低減のための Soot 排出量低減

DPF 再生の頻度を抑えるには堆積速度を下げる必要がある、微粒子の大半を占める Soot を燃焼室で生成させないことが、最も効果的な対策になる。ディーゼルエンジンの燃焼過程において、Soot は着火直後に燃料噴霧中心の低酸素濃度領域で生成を開始し、燃焼中にピークに達した後、燃焼後半には空気と混合して再燃焼が進む。このため、Soot 排出量低減のポイントは、着火前の燃料噴霧中に空気を多く取り込み着火直後の Soot 生成を抑制することと、燃焼後半において混合を促進し Soot の再燃焼を加速させることである。今回は、インジェクタノズル噴孔の小径多噴口化と燃焼室形状の改良によりこれらを実現した。検討には燃焼シミュレーションを用い、シミュレーションによる机上検討で仕様を決定し、試験にて確認するというステップで開発を進めた。図1(a)は燃焼室形状の改良に関するシミュレーション結果であるが、改良前の形状では、燃料が燃焼室内の一部に偏って存在するのに対し、改良後には燃料が燃焼室全体に分布して混合が進んでいる様子が分かる。このシミュレーションにより決定した燃焼室を用いてエンジン試験で確認した結果が図1(b)であり、大幅な Soot 低減を確認することができた。

実際の市場で DPF 再生の頻度を下げるためには、市場で使われる運転パターンの過渡的な挙動を考慮して Soot 排出量を減らす必要がある。今回の開発においては、事前に準備した複数の運転パターンを用いて評価した。図2は評価パターンの一例だが、改良前後で大幅に低減していることが分かる。これにより、通常の使用環境における DPF の再生間隔は、従来比2倍以上を確保している。

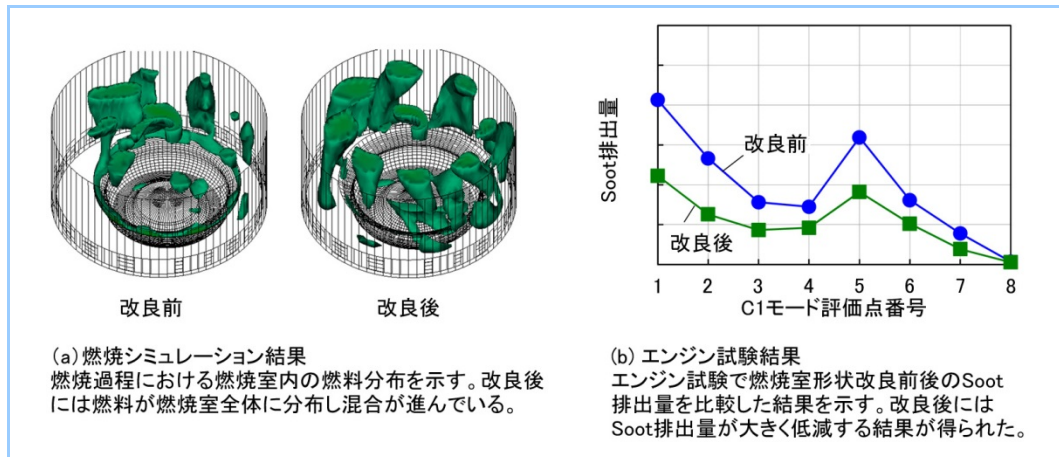


図1 燃焼室形状改良による Soot 排出量の低減

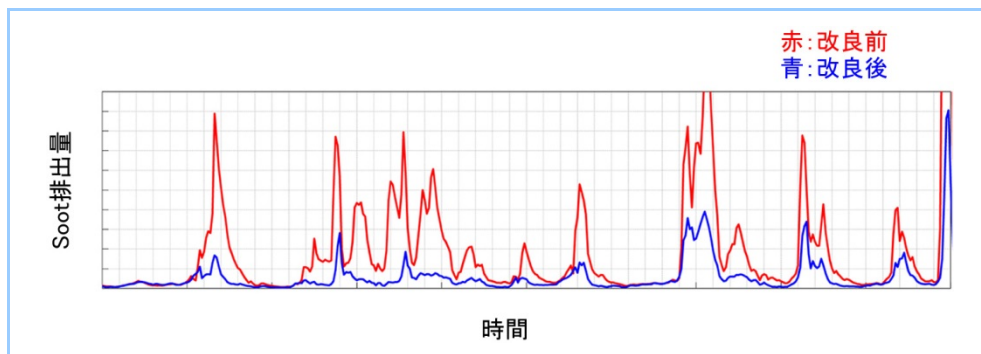


図2 市場の稼働条件における Soot 排出量の評価

3.2 DPF 再生制御

DPF 再生では、DPF 内部に堆積した Soot を燃焼して除去するが、そのためには、適切な燃焼速度となるよう、排気ガスを所定の温度で一定に制御する必要がある。排ガス温度の制御の点では、DPF をエンジンの近くに配置した方が望ましいが、一方で、エンジンと DPF は、離れた位置でも搭載可能である方が、機器のレイアウトに自由度を持たせることができる。今回の開発では、既存の機器、車両へも、欧州5次規制対応エンジンの搭載が容易となるよう、DPF をエンジンから離れた位置にも搭載可能とした。また、任意の運転条件でも、配管長さによる応答遅れの影響なく、良好に温度制御でき、DPF 再生のための燃料が過剰になってそのまま排ガスとして排出されたり、応答遅れにより異常に排ガス温度が上昇したりするなどの問題がないことを確認した。

DPF 再生のための排温制御には、昇温のための筒内への燃料噴射の追加、調整と、排気スロットルによる排気絞りを用いた。エンジンの負荷、回転数の広い範囲で、定常、過渡の運転状態に関わらず、DPF での排温を必要な温度レベルに一定に維持できるよう、調整した。特に、排気スロットルを用いることで、低負荷、低回転の領域も含めて、DPF 再生に必要な排温の維持を可能とした。

以上により、暖機後、エンジン稼働中であれば、ほぼ全ての任意の運転条件で再生ができる設定とし、エンジン使用中に自動的に DPF 再生が完了できる設定とした。

4. 実稼働条件による評価

当社産業用エンジンは、様々なアプリケーションにご利用頂いているため、任意の稼働パターンで DPF 再生が完了できるよう、開発を行った。アプリケーションごとに特徴的な稼働パターンもあるので、今回特に、搭載を予定するフォークリフトの実稼働条件を調査し、エンジンベンチ、及び市場で、DPF 再生に関する評価を行った。

4.1 市場実稼働データによる評価パターンでのエンジン評価

DPF 再生が、通常のエンジン使用に支障なく、任意の条件で完了できることを評価するため、

事前に市場でエンジン稼働状況の調査を行った。今回、特にフォークリフトに搭載するエンジンの開発に当たり、調査に当たっては、三菱ロジスネクスト株式会社に協力頂き、日常業務の中で実際にフォークリフトを使用頂いているお客様に、エンジンデータロガーを搭載した車両を使用頂いて、エンジン稼働状況を計測した。

稼働状況の調査は、複数の車両、お客様にて実施し、エンジン回転数、アクセル開度、燃料噴射量、エンジン水温、外気温などのエンジン稼働条件に関する複数のデータを、ミリ秒(msec)オーダーで計測した。取得したデータの延べ運転時間で、数百時間以上にのぼる。データは、エンジン回転数と燃料噴射量(エンジン負荷)を中心に分析し、特徴的な稼働パターンを同定、抽出した。取得した稼働データを、特徴に応じて、抽出した各稼働パターンに分類し、市場での実稼働時の各稼働パターンの出現頻度を整理した。図3に、実稼働データと稼働パターンへの分類の例を示す。稼働パターンを、出現頻度に合わせた割合で組み合わせることで、市場での稼働状況を反映した DPF 再生評価用パターンを作成し、エンジンベンチ上での評価に用いた。抽出した稼働パターンを組み合わせで作成した DPF 再生評価用パターンを図4に示す。

作成した評価パターンを含む複数の評価パターンで、DPF 再生なしに運転可能なエンジン稼働時間をエンジンベンチ上で評価した。今回実施した Soot 低減の効果により、従来機種と比較して、稼働時間当たり必要となる DPF 再生の回数を、半減以下に大きく低減できていることを確認した。また、同様に、目論見通り低速低負荷を中心とした市場での実稼働パターンを含む複数の評価パターンにて、任意のエンジン運転条件で DPF 再生が完了できることを確認した。図5に、評価パターンにて、排気温度が必要なレベルで一定に維持できていること、DPF 再生が可能であることを確認した例を示す。

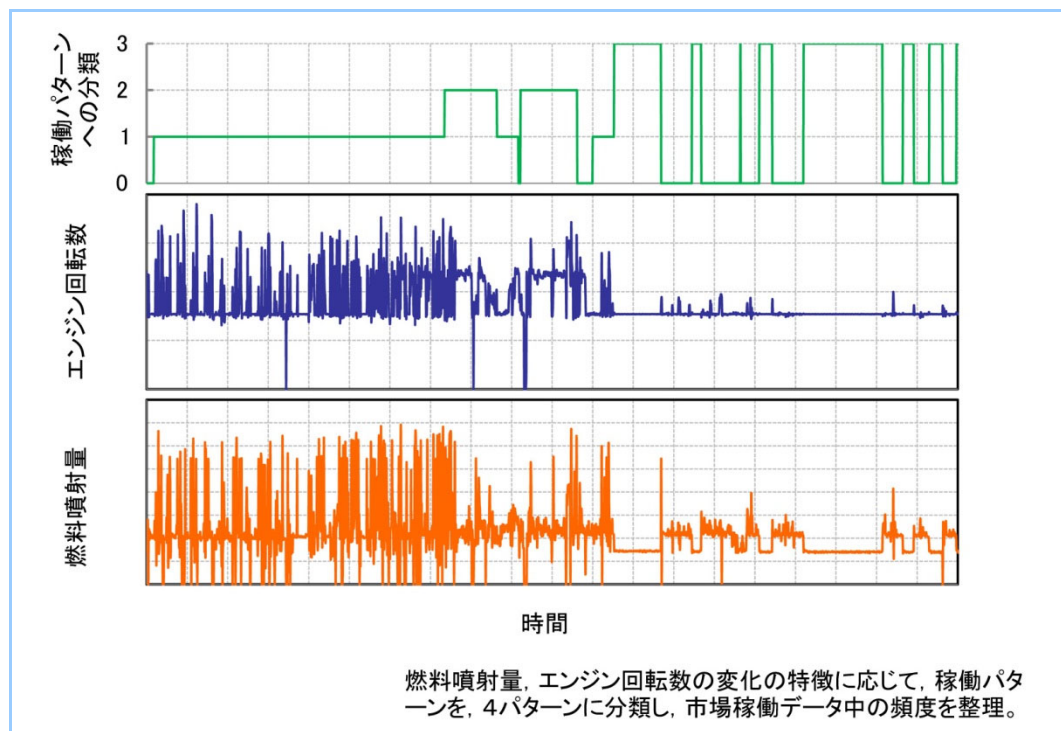


図3 市場稼働データの分析例

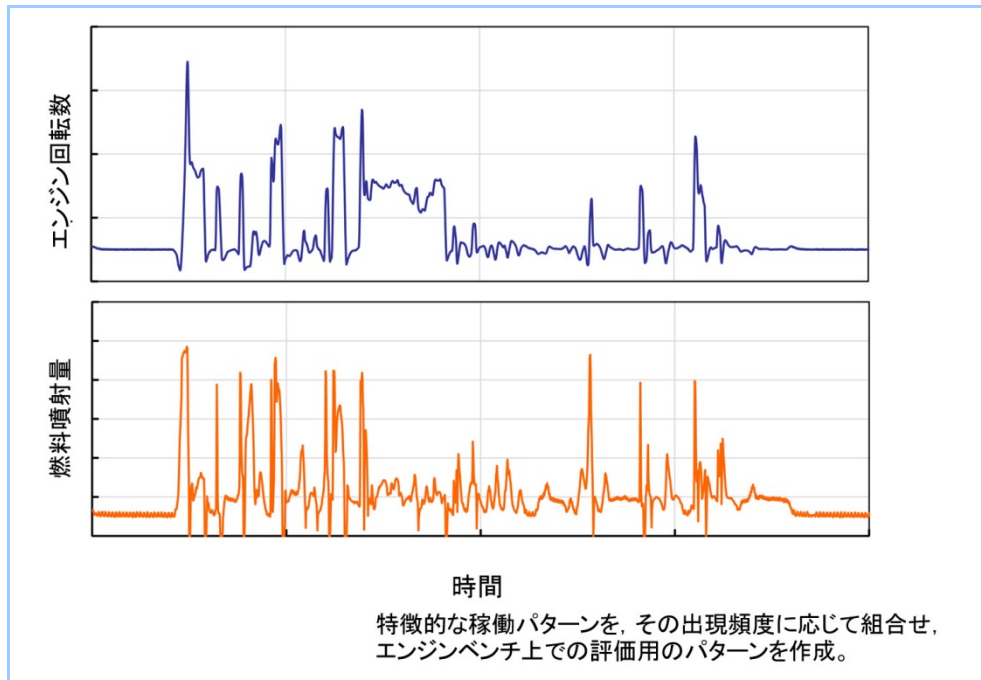


図4 市場稼働データに基づく評価パターンの例

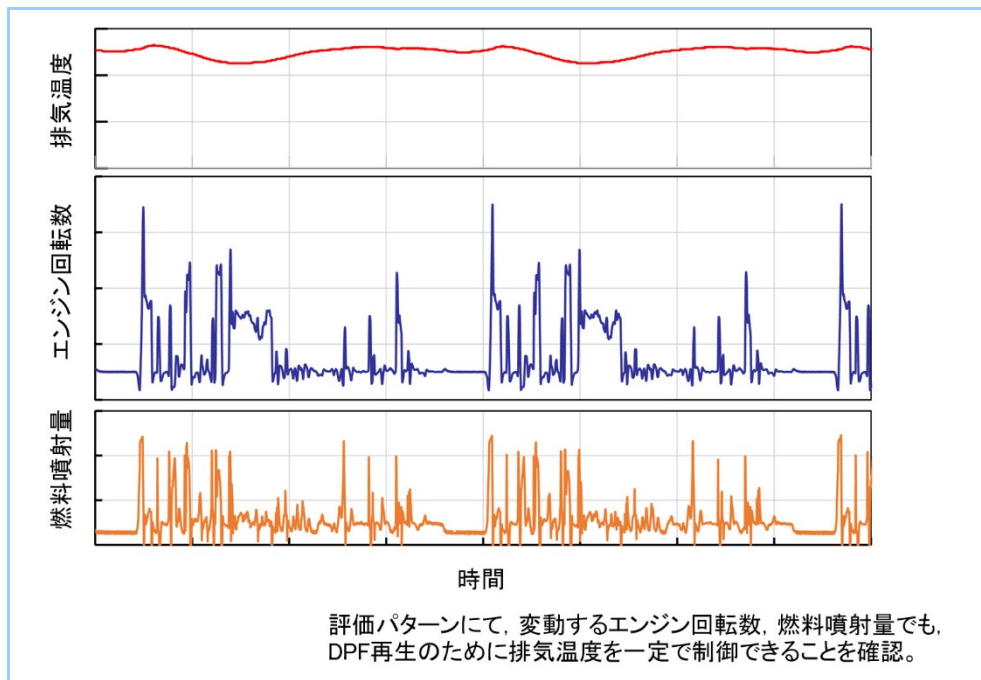


図5 評価パターンによるDPF 再生時の排気温度制御

4.2 フィールドフォローによる検証

三菱ロジスネクスト株式会社に協力頂き、発売前の車両に、同様にエンジンデータロガーを搭載して、現地(欧州)にてお客様に車両を使用頂き、所期の機能が実現できていることを確認した。欧州での長期間の稼働に当たり、データロガーの信号を携帯回線経由でサーバにアップロードし、現地稼働状況を国内机上でモニタできる態勢とした。複数の車両にて、延べ数千時間の稼働状況のデータを確認し、一部の車両では更に稼働を継続中である。

市場での実稼働条件下で、DPF 再生に関して、①任意の稼働条件にて DPF 再生が完了できているか、②DPF 再生間隔が目論見通り長くとれているか、を中心にデータを確認した。

全稼働データを通じて、途中でお客様によるエンジン停止の操作があったとき以外は、DPF 再生は任意の運転条件で継続、完了できており、DPF 再生のための作業中断が発生していないことを実稼働条件でも確認できた。また、DPF 再生中にエンジン停止があった場合も、再起動後に

は、問題なく DPF 再生を再開、完了できていることも確認できた。

各車両の総稼働時間と、DPF 再生の回数を確認し、DPF 再生が必要になるまでの稼働時間も、開発時にエンジンベンチでの評価パターンで確認した稼働時間と同等であり、DPF の再生間隔が市場での実稼働条件でも、従来比2倍以上を確保できていることを確認した。

5. まとめ

欧州5次排ガス規制対応に向けた DPF 採用に当たり、DPF 再生間隔の延長のための Soot 低減、DPF 再生範囲の拡大、を目論んで開発を行った。評価に当たっては、既存の評価方法に加えて、市場で計測した稼働データを元に作成した評価パターンも取り入れ、目標の機能が実現できていることを確認した。さらに、発売開始前にフィールドフォロー試験を実施し、市場での長期的にわたる稼働でも、所期の結果が得られることを、確認した。

当該エンジンは、2020 年より量産を開始している。当社では今後も、市場実態に即したお客様にとって使い勝手の良い、魅力あるエンジンの開発を進めていく。

参考文献

- (1) 平岡ほか, EPA Interim Tier 4 排出ガス規制対応小型ディーゼルエンジンの開発, 三菱重工技報, Vol.50 No.1 (2013) p.60~65