

技術解説

産業車両用ディーゼルエンジンの将来ビジョン Future Vision of Diesel Engine for Industrial Vehicle

平野 康洋*1
Yasuhiro Hirano

*1 エンジン事業部 技術第一部

要旨 産業車両、いわゆるオフロードの 카테고리において、窒素酸化物の大幅低減や煤の粒子数(Particle number)規制の導入など、年々世界中で排出ガス規制は厳しくなっている。そのような中で、軽油を燃料とする産業車両用エンジンは、その特徴を生かし開発は進んでおり、今も進化を続け、お客様のニーズに応え提供し続けている。本稿では、産業車両用ディーゼルエンジンの将来ビジョンを、業務事例を紹介しながら報告する。

キーワード:ディーゼルエンジン、規制、ビジョン、カーボンニュートラル、1Dシミュレーション

Abstract In the category of industrial vehicles, or so-called off-road vehicles, emission regulations are becoming stricter and stricter all over the world every year, with the introduction of regulations such as the drastic reduction of nitrogen oxides and the particle number of soot. Under such circumstances, the development of engines for industrial vehicles that use light oil as fuel has been progressing, taking advantage of their characteristics, and they continue to evolve and meet the needs of customers. This paper reports on the future vision of diesel engines for industrial vehicles, introducing some examples of business.

Keywords: Diesel engine, regulation, vision, carbon neutral, 1D simulation

1 はじめに

ディーゼルエンジンは窒素酸化物や煤による環境悪化や人体への悪影響などが、都市圏を中心に問題視されてきた。それに対処すべく我々はDPF(Diesel Particulate Filter)の開発や、噴射系・過給機系等の改良によりクリーンなディーゼルエンジンを生み出し、現在は乗用車をはじめ産業車両にも幅広く支持されている。

一方昨今のCO₂削減という世界各国の動きに対し、産業車両では現状CO₂規制は無いものの、動力源の軸を電動化に移行が進みつつある。

そのような流れの中でも、ディーゼルエンジンはさらに進化を続けている。産業車両用ディーゼルエンジンの将来ビジョンを、実業務を交えながら考えてみる。

2 外部環境

近年のオフロード用ディーゼルエンジンの排出ガス規制動向を図1に示す。世界一厳しい欧州規制を筆頭に、中国、ついで日本・北米が追従している状況にある。

欧州は2019年に欧州Stage Vが導入され、産業車両業界にも初めて煤の粒子数規制、いわゆるPN(Particulate Number)規制が導入された。その為フォークリフト用のDPFを開発し、2019年から販売をしている。次期規制STAGE VIに関しては詳細未定だが、PN規制での適用粒子径の小径化や、

NOxを1/10以下とする動きも、各研究機関などから報告されている。中国においても欧州に追従すべく、PN規制が4次規制として2022年12月から37~75kWクラスで適用されることが決まっている。

日本では第4次、北米ではTier4と、2014年にそれぞれ前規制に対しPM1/10以下、出力カテゴリーによってはNOx1/10以下と規制は厳しくなっている。それ以降は未定だが、先行する欧州規制に追従、もしくはさらに厳しい規制になると予測する。このように今後も全世界で規制は厳格化されていくと考える。

出力P(kW)	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
日本	0≦P<19	法規なし(陸内協自主規制)										第5次?		
中国	19≦P<56	第3次	第4次	PM 1/10										STAGE5相当
	56≦P<75	第3次	第4次	NOx 1/10										NOx規制強化
	75≦P<110	第3次	第4次	NOx 1/10										NOx規制強化
米国	0≦P<19	Tier4										Tier5?		
米国	19≦P<56	Tier4 PM 1/10										STAGE5相当		
	56≦P<75	Tier4 NOx 1/10										NOx規制強化		
	75≦P<110	Tier4 NOx 1/10										NOx規制強化		
欧州	0≦P<19	法規なし										StageV	STAGEVI?	
欧州	19≦P<37	StageIII A										StageV	NOx規制強化 PN粒子径範囲拡大	
	37≦P<56	StageIII B PM 1/10										PN規制		
	56≦P<75	StageIV NOx 1/10										StageV		
	75≦P<110	StageIV NOx 1/10										StageV		
中国	0≦P<37	国3										国4		
中国	37≦P<75	国3										国4 PM 1/10, PN規制		

図1 世界のオフロード排出ガス規制動向
Fig.1 Global exhaust gas regulation trend for off-road engines

規制厳格化の中で、フォークリフトの市場動向を、予測も含め図2に示す。電動車の2020年度の市場規模は、エンジン車約60万台に対し約100万台と、はるかに上回る。特に欧州ではその流れは加

速している。一方で中国ではエンジン車ニーズは根強い。中国ではイニシャルコストの安さを重要視し、大型エンジン車を好む傾向があるからである。

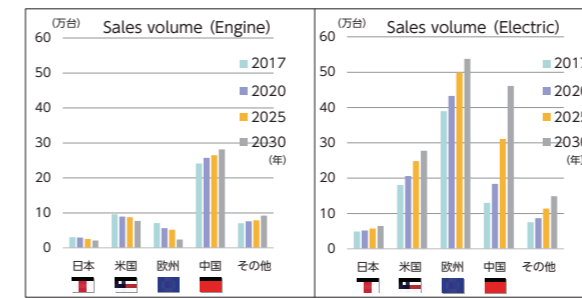


図2 フォークリフトの市場動向予測^[1]
Fig.2 Market trend prediction of the forklift

次にエンジン車と電動車の特徴比較をする(表1)。

表1 動力別特徴
Table.1 Characteristic according to the power

	エンジン車		電動車
	ディーゼル	LPG	
荷役速度	○	○	△
連続稼働(1充填当)	○	○	△
低速トルク	○	○	△
インフラ	○	○	△
イニシャルコスト	○	○	△
排出ガス	○	○	○
ランニングコスト	△	○	○
騒音	△	△	○

排出ガスやランニングコストでは電動車に分があるが、荷役速度ではエンジン車は優位。大型車になるほどその傾向は顕著になる(図3)。

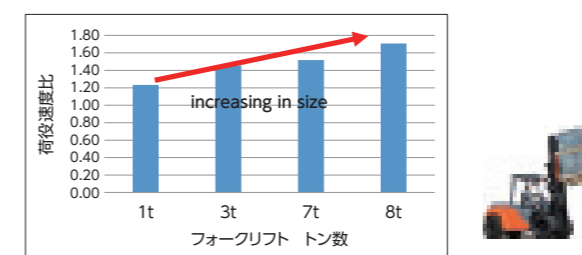


図3 電動車を1とした時のエンジン車の荷役速度比
Fig.3 Cargo work speed ratio when battery car 1

このようにエンジン車の方が優位な点は多々あり、今後もディーゼルエンジンの進化と共に、産業車両の世界でも残り続けると考える。

3 内部状況

豊田自動織機2030年ビジョンとして、“お客様のニーズを先取りする商品・サービスを継続的に提供することにより、世界の産業・社会基盤を支え、住みよい地球と豊かな生活、そして温かい社会づくりに貢献する”がある(図4)。

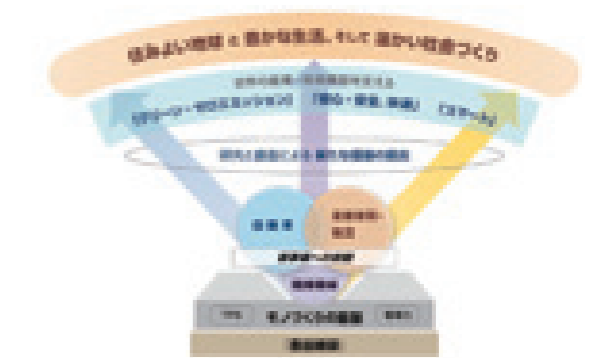


図4 豊田自動織機2030年ビジョン
Fig.4 TICO vision for 2030

大きな柱となるのは自動車と産業車両で、これまでもこの2大柱の技術知見を生かし産業車両用ディーゼルエンジンの開発を進めてきた(図5)。

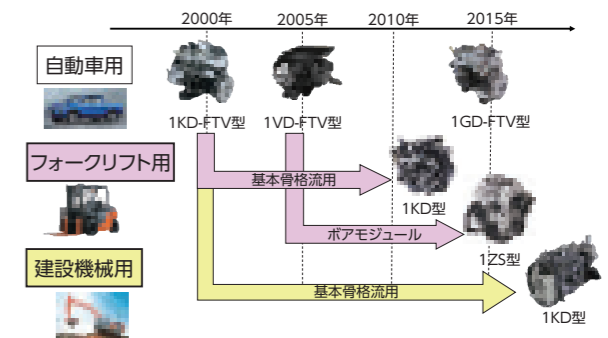


図5 エンジン開発の変遷^{[2][3]}
Fig.5 History of Industrial Engine development

例えばフォークリフト用1KDエンジンは、自動車用1KDエンジンのシリンダヘッド・ブロック等基本骨格はそのまま、過給機や燃焼室等は産業車両用にカスタマイズ、開発の効率化、部品流用による低コスト化を実現した。このように先行する自動車用エンジン技術をキャッチアップし、これまで多くの産業車両用エンジンを世の中に送り出してきた。

4 将来ビジョンと技術動向

我々の使命は、クリーンな産業車両用ディーゼルエンジンを、お客様に持続的に提供し、世界の産

技術解説

業・社会を支えることにある。その為将来ビジョンはこれまで同様、自動車用エンジンで培った設計技術を生かし、産業車両特有の環境条件(高温・多塵・傾斜など)や使用条件(急加減速の連続、ちよいのり)を考慮し、高品質のエンジン開発をしていくことである(図6)。

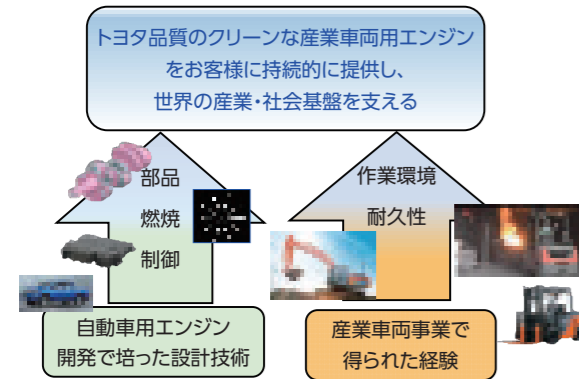


図6 産業車両用エンジン 豊田自動織機ビジョン^{[2][3]}
Fig.6 TICO vision of Industrial engine

続いて産業車両用ディーゼルエンジン技術ロードマップを図7に示す。先述した通り、自動車用エンジンで開発した技術を産業車両用に改良していく、というのが基本の流れである。

技術開発	燃費	排気	信頼性	自動車用エンジン														
				17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27				
基礎技術開発	自動車用オンロード規制	自動車用オフロード規制	燃焼改善	EURO6-1	EURO6-2	EURO7?	D-SPIA (PCCI)						高圧噴射					
	産業車両オフロード規制	メカフリクション低減	冷却損失低減	4次	5次	6次?	シリンダヘッド改良						燃料噴射DLC					
	軽量化	補機負荷低減	軽量化				ステールピストン						薄肉シリンダブロック					
	軽量化	補機負荷低減	軽量化				軽質材料開発						軽質材料開発					
カーボンニュートラル							バイオ燃料						e-fuel					
後処理システム開発							NSR						SCR					
開発効率化							1Dシミュレーション						NVH予測モデル構築					

図7 産業車両用ディーゼルエンジン技術ロードマップ
Fig.7 Diesel Engine Technical roadmap for Industrial Vehicle

その中で今回3項目について技術解説をする。低コスト及びクリーンを主題とする項目である。

- 1) カーボンニュートラル バイオ燃料
- 2) 後処理システム開発 NSR (NOx Storage Reduction Catalyst)
- 3) 開発効率化 1Dシミュレーション

4.1 カーボンニュートラル バイオ燃料

CO₂排出量の削減による地球温暖化防止など、当社も持続可能な社会の実現に向け、「CSR重要課題」を図8のように策定している(一部抜粋)。

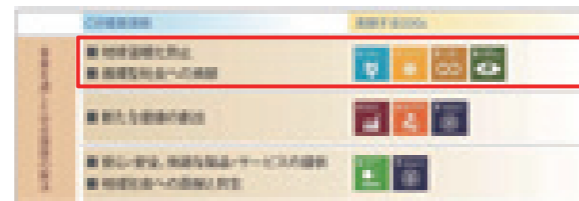


図8 CSR重要課題
Fig.8 CSR Important issue

当社エンジン開発ではCO₂排出量削減の為、カーボンニュートラル燃料に着目している。産業車両を対象にした厳格なCO₂規制は今のところないが、欧州ではRED II (Renewable Energy Directive)-2030として先進型バイオ導入下限量(6.8%)が2016年の欧州委員会で規定、産業車両用ディーゼルエンジンも対象で、代表的なバイオ燃料HVO (Hydro treated Vegetable Oil)の評価を開始している^[4]。HVOは従来のバイオ燃料FAME (Fatty Acid Methyl Ester)に対し酸化安定性が高く、GHG (Green House Gas)削減効果も高い。欧州で注目されているバイオ燃料である(図9)。

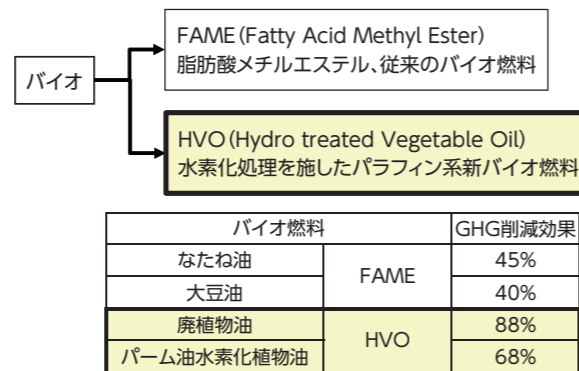


図9 バイオ燃料
Fig.9 Bio fuel

一方背反としてセタン価と燃料密度が上げられる(表2)。

表2 通常軽油との比較
Table.2 Comparison with the normal light oil

		HVO	European marketing light oil
セタン価	規格	70以上	51以上
	評価実物	75.1	52.2
燃料密度 kg/mm ³ @15°C	規格	765	820
	評価実物	778	834

セタン価が高いことは、筒内圧上昇によるNOx悪化、燃料密度が低いことは、トルク低下の懸念がある。我々は建設機械用1KDエンジンを用い、背反検証を実施した。

セタン価が高いことによるNOx悪化については、早期着火は確認されたが、燃料密度が低い為、筒内圧の上昇はなかった。結果燃焼温度の上昇はなく、問題とならなかった(図10)。

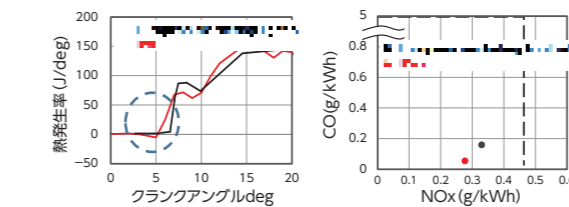


図10 着火タイミングとNOxの結果
Fig.10 Firing timing and NOx Test result

燃料密度が低いことによるトルク低下については、HVOの方が動粘度は低く(HVO 2.95< European marketing light oil 3.04@40°C)、実噴射量は増加した為、問題とならなかった(図11)。

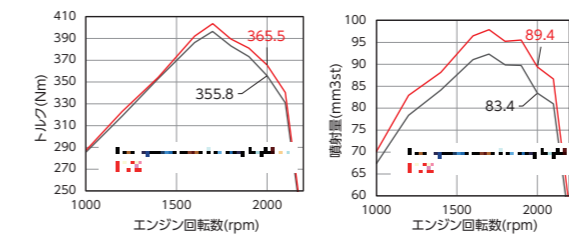


図11 トルクと実噴射量の結果
Fig.11 Torque and actual injection quantity

性能面での確認は終わったが、水素脱硫による潤滑性の悪化等、信頼性等に与える影響を今後検証していく。

4.2 後処理システム開発 NSR

ディーゼルエンジンは後処理システムが複雑で、コストインパクトを与える主要因である。簡素化、いわゆる低コスト化は拡張戦略にとって重要なファクターである。

図12に2017年にラインオフしたパワーショベル用1KDエンジンの欧州規制を例にとった後処理システムとコストを示す。欧州STEGE III→IVにおいて、NOx規制は1/10となり、他社は総じて尿素SCR (Selective Catalytic Reduction) で対応してきた。しかし我々は、EGR (Exhaust Gas

Recirculation) ガスのLPL (Low Pressure Loop) システムを採用、大量EGRを確保しNOxを大幅に下げた。凝縮水の懸念に対しては、外部温度によって従来のHPL (High Pressure Loop) との使い分けや、過給機のインペラ表面処理などの工夫で、部品腐食に対する信頼性を確保した。結果、後処理システムを簡素化し、他社と差別化させることができた。次期規制欧州STAGE VIは、NOx規制強化の可能性もあり、尿素SCRが本命だが、システムコストの安いNSRシステムに現在着目している。

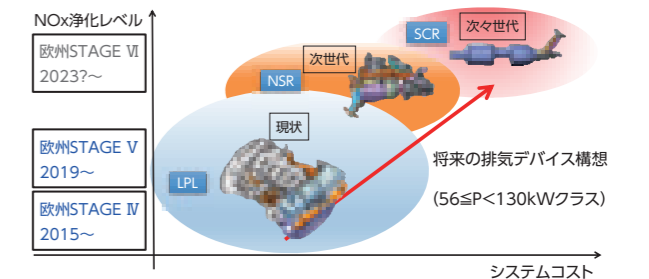


図12 NOx浄化レベルとシステムコスト
Fig.12 NOx purification level and system cost

NSRシステムは、DPFの前にNOxを吸蔵する触媒NSRを配置する。NSRでNOxを貯め、還元剤でN₂やCO₂にして、大気中へ放出する。SCRシステムに対し、①NOx浄化率 ②高温NOx浄化が一般的に不利とされてきた。しかし①に対しては、D-SPIAという、大量EGRと燃料を燃焼前にしっかり混ぜ合わせる事でスモーク限界を下げながらNOxを低減させるという燃焼方式でカバーし、②に対しては、高温時NOxが触媒より離脱する懸念があったが、還元剤である燃料を供給する間隔、噴射率等の工夫により、ポテンシャルは上がってきている(図13)。

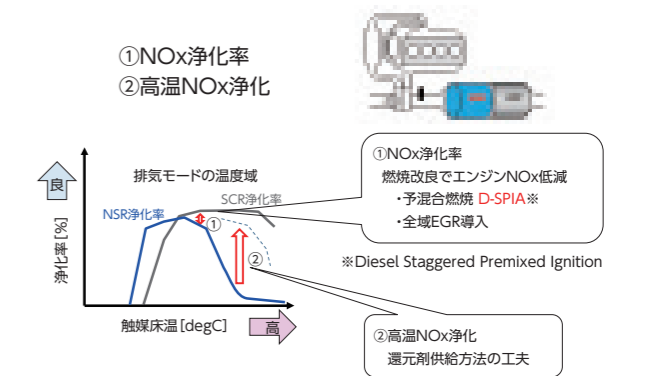


図13 NSR開発
Fig.13 NSR Development

4.3 開発効率化 1Dシミュレーション

開発費を低減することも、製品原価低減に直結する重要なテーマである。MBD (Model Based Development) を用い、開発費を大幅削減できた例を紹介する。

1) プロセスの効率化

従来のV字プロセスに対し、MBDプロセスでは上流側の企画フェーズでシミュレーションを活用、トータルのリソースと開発期間を少なくできる(図14)。

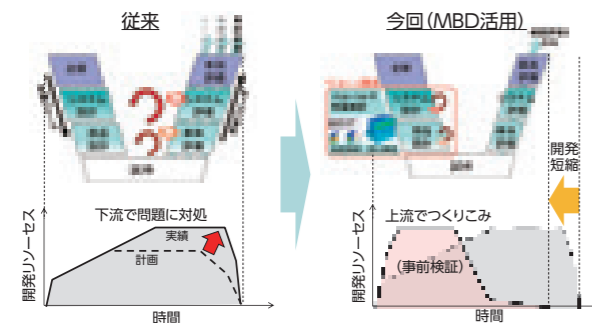


図14 開発プロセスの比較
Fig.14 Comparison of Development process

2) 開発事例 欧州Stage V 要求性能

フォークリフト欧州Stage Vの粒子数規制導入に伴いDOC (Diesel Oxidation Catalyst) + DPFの搭載が必須。MBDにより最適な設計諸元を検討した。要求性能は、DPFの再生の為、-20℃の低外気温下でも220℃以上に達することである。

3) モデル化

搭載要件から図15のようにラフにレイアウトは決定、モデル化し、シミュレーションにかける。

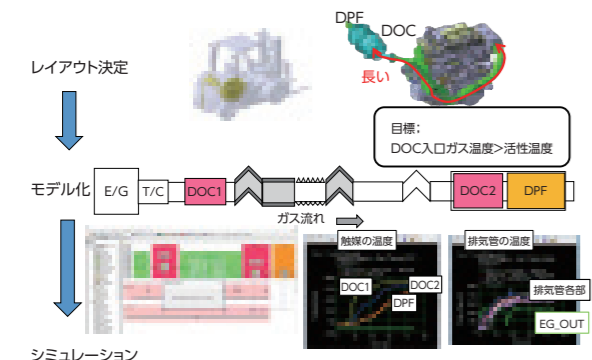


図15 1Dシミュレーションモデル
Fig.15 1D simulation model

4) 合わせ込みと同定評価

シミュレーションと実機では違いが発生する為、仮定した物理定数を実機に合わせ込む。図16に示すように①DOC反応熱量と②排気管放熱量のズレを是正する。

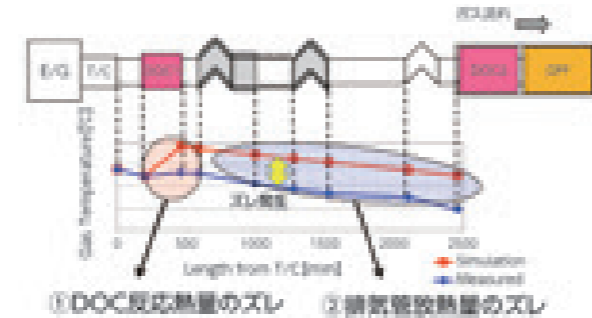


図16 排気ガス温度の推移
Fig.16 Transition of exhaust gas temperature

①DOC反応熱量のズレ

まず触媒添加の軽油燃料の酸化反応式を仮定(式1)。次にDOCのIN/OUTで軽油濃度を測定、反応速度定数kを算出(式2)。反応速度定数が分かるとアレニウス反応式より、頻度因子Aと活性化エネルギーEaを算出できる(式3)。

これらをシミュレーションの触媒反応計算式へ織り込むことで、実機と同等の結果が得られる。



$$k = \frac{v}{[C_{13.5}H_{23.6}]} \dots \text{式2}$$

$$k = Ae^{(-\frac{E_a}{RT})} \dots \text{式3}$$

v	: 反応速度定数
A	: 頻度因子
E _a	: 活性化エネルギー
k	: 反応定数
T	: 温度

②排気管放熱量のズレ

機台で想定される排気管仕様(蛇腹、断熱材)や外部環境(気温、風当たり)を変化させた測定データを基に、ニュートン冷却則(式4)から熱伝達係数hを算出、シミュレーション内の各排気管要素(図17)に織り込む。

$$\frac{q}{A} = h(T_w - T_{\infty}) \dots \text{式4}$$

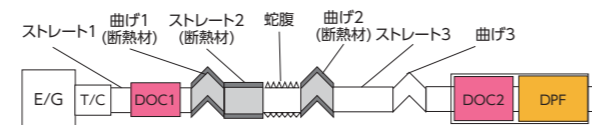


図17 排気管の仕様
Fig.17 Specification of exhaust pipe

5) 結果の確認

触媒反応と放熱量の合わせ込みで、実機同等の結果を得られる(図18)。頻度因子Aはガス流量、温度を変数とする関数式5で、活性化エネルギーEaや熱伝達係数hも式6、式7と関数化。これにより経路や排気ガス中の成分が大きく変化しない限り、このモデルで同定評価が可能となる。

$$A = F_1(Q, T) \dots \text{式5}$$

$$E_a = F_2(T) \dots \text{式6}$$

$$h = F_3(Q, T_w, T_{\infty}) \dots \text{式7}$$

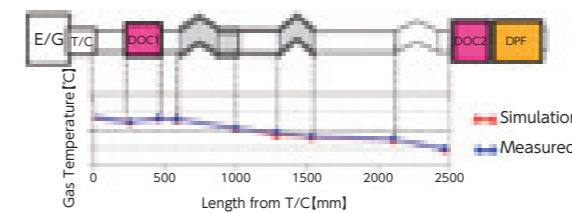


図18 排気ガス温度の比較
Fig.18 Comparison of exhaust gas temperature

6) 最適システムの選定

実験計画法より①アイドル回転数アップ ②貴金属量アップ ③排気管仕様変更(2重管、ウール追加)に感度がある事が分かり、シミュレーションにより最適化。結果、要求性能とコストを満足することができた(図19)。

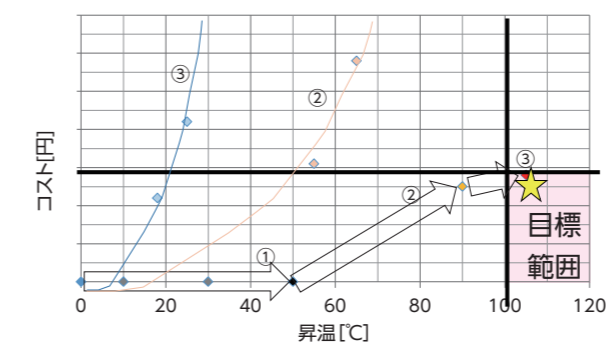
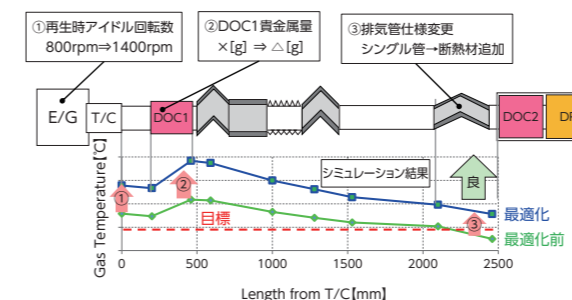


図19 最適システムの選定
Fig.19 Selection of optimal system

以上、1Dシミュレーションの活用により確認評価1回のみでシステム選定は完了。試作費用は従来開発の80%、評価工数は90%削減することができた。

5 まとめ

産業車両業界においても、近年電動化は進んでいる。しかし豊田自動織機の産業車両用ディーゼルエンジンは、今後も進化し、世界の産業・社会基盤を支えていく。

トヨタの自動車用エンジン開発で培われた品質と技術をベースに、産業車両業界及び顧客の求めるニーズに応え、さらに磨きをかけていく。

■ 参考文献

[1] 富士経済 エネルギー・大型二次電池・材料の将来展望2018〈動力・電力貯蔵・家電分野編〉
[2] トヨタ自動車(株): <https://global.toyota.jp/newsroom/toyota/>
[3] 日立建機(株): <https://www.hitachicm.com/global/jp/>
[4] European Commission RED

■ 著者紹介 ■



平野 康洋

開発の経緯と開発者の思い

欧州では2035年あたりから、自動車ではエンジン車の販売を禁止するといった動きがあり、ディーゼルエンジンにとっても逆風。産業車両用エンジンは現時点でそこまで規制する動きはありませんが、電動化の流れは欧州初め、北米・日本でも顕著になりつつあります。自動車に比べ生産台数が圧倒的に少ない産業車両において、システム費、部品費および開発費は、大きなインパクトとして製品価格へ跳ね返ります。またグリーンさをアピールすることも、今後の拡販戦略においては重要な指標と考えます。この状況をむしろ他社との差別化のチャンスと捉え、エンジンサプライヤーとして産業社会に貢献していくため、今以上にコストとスピードを意識し開発していくことが重要であると考えます。