

技術論文

3D95エンジンの開発

Development of 3D95 Engine

松岡良祐
Ryosuke Matsuoka
三木章弘
Akihiro Miki
長坂昇平
Shouhei Nagasaka

37～56kWの出力レンジをカバーし、欧州の第5次排出ガス規制に適合する排気量2.4LのディーゼルエンジンSAA3D95E-1を開発、市場導入した。排出ガス規制だけでなく、社会的要求から燃費改善もエンジン開発の重要な命題であり、新しい技術を織込んだSAA3D95E-1は、コマツエンジンの特長である耐久性を落とすことなく環境に配慮したエンジンに仕上がった。本稿ではその開発の経緯と技術的特長について報告する。

SAA3D95E-1 diesel engine, which has a displacement of 2.4 L and covers the range from 37 kW to 56 kW as well as complies with the European Union's Stage V emission regulations, was developed and introduced to the market. The improvement of fuel economy is an important issue in the aspect of not only the emission regulations but also the social demand. SAA3D95E-1 is incorporated with new technologies and has been developed in consideration of the environment without compromising the durability that is a strength of Komatsu engines. This paper reports on the background of its development and technical features.

Key Words: 建設機械, ディーゼルエンジン, 排出ガス規制, 燃費改善

1. はじめに

ディーゼルエンジンは、信頼性・耐久性が高く、小型から大型まで広い範囲で出力が得られることや高い機関の熱効率から産業界において動力源として使用されているが、環境や生体に及ぼす影響も指摘されているように、ディーゼルエンジンをとりまく環境は大きな転換期にあるといえる。その中において、建設機械用ディーゼルエンジンについても年々その排出ガス規制が世界各国において強化されつつあり、特に欧州EUによる第5次排出ガス規制(Stage V)が建設・鉱山機械用ディーゼルエンジン排出ガス規制を牽引している。また近年の世界的なカーボンニュートラルの推進に合わせて、ディーゼルエンジンの熱効率の改善は必達の課題となっている。

コマツではこれまで排気量3.3Lから78Lまでの産業用ディーゼルエンジンを開発・製造・販売してきたが、今般新たに37～56kWの出力レンジをカバーし、Stage V規制に適合する2.4LのエンジンSAA3D95E-1を新規開発した。コマツエンジンのラインナップに新モデルが加わったのは約30年ぶりのことである。本稿では、SAA3D95E-1の開発の経緯ならびにその技術的特長について紹介する。

2. 建設機械用ディーゼルエンジンの排出ガス規制動向と本エンジンの出力レンジ

前述したように、建設機械用ディーゼルエンジンにかかる排出ガス規制としては、2019年からはStage Vと称される規制が導入されて新しい段階を迎えている。図1に現時点における日本・北米・欧州における排出ガス規制動向を年次毎にまとめたものを掲げる。

図2は、EU規制を代表例に37～56kWにおけるこれまでのStage I ⇒ Stage II ⇒ Stage III A ⇒ Stage III B ⇒ Stage V (※1) 規制の動きを、窒素酸化物(NOx)と粒子状物質(PM)の排出ガス規制値を軸に推移として示したものである。マクロ的に、各規制段階は3～5年毎に厳しくなっており、NOx、PMといった主たる規制値は、約30%レベルずつの低減が要求されてきている。さらにStage VからPMに加えて粒子数(PN)の規制が追加された。

(※1) : 37～56kWの出力レンジには、Stage IVは適用されていない。

赤枠内が今回開発したエンジンの対象規制

CY	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Q	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4	1 2 3 4
日本	37 ≤ kW < 56	H18規制							
	56 ≤ kW < 130		H23規制						
	130 ≤ kW < 560							H26規制	
北米	37 ≤ kW < 56								
	56 ≤ kW < 130	Tier4i							
	130 ≤ kW < 560							Tier4F	
欧州	37 ≤ kW < 56								
	56 ≤ kW < 130	Stage III b							
	130 ≤ kW < 560							Stage V	

図1 日本・米国・欧州における排出ガス規制動向

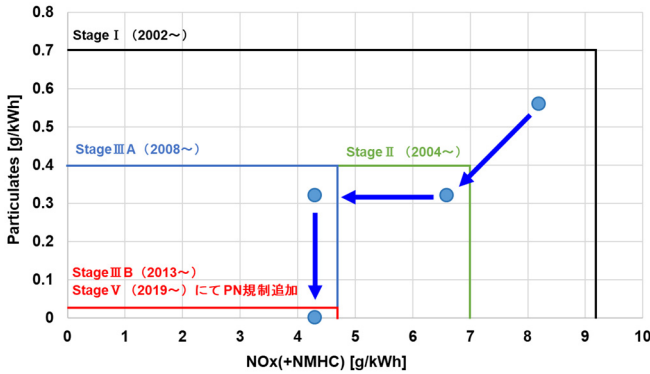


図2 EU排出ガス規制の変遷 (37~56kW)

3. 3D95エンジン開発の経緯とねらい

これまでコマツでは、排気量3.3Lから78Lまでの産業用ディーゼルエンジンを開発・製造・販売してきた。図3に示す通り、コマツ3.3LエンジンSAA4D95LE-6は出力43~90kWまで広くカバーしており、37~56kWの出力レンジにとっては排気量が多い。そのため競合エンジンと比較して燃費やコストの面で競争力が乏しい。かつ3.3Lエンジンは、ベースエンジンの量産から30年以上が経ち、これまでの規制対応に合わせて機能部品が追加されてきたことから整備性の面でも最適ではない。また、前述したように37~56kWの出力レンジにおいて2019年からEUにおいてStage V 排出ガス規制が施行されるため、この規制の施行にあわせてDiesel Particulate Filter (DPF) を装着する必要がある。上記を受けて当社で新規開発した、37~56kWの出力レンジをカバーする2.4LエンジンSAA3D95E-1について紹介する。

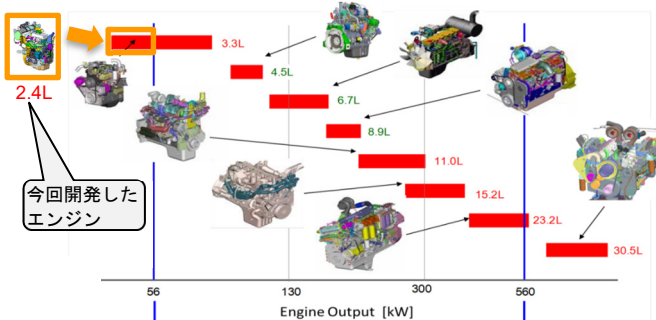


図3 コマツエンジンシリーズの排気量と出力

本エンジンは、2020年11月発売のコマツ7トンショベルPC78US-11への搭載に合わせて開発を行った。車両全体として競争力のあるものにするため、車両コンセプトの策定段階からエンジン設計者が参画し、油圧ポンプ等のパワーライン含めた車両設計、エンジン設計の双方にフィードバックを行うことで最適化を図った。また、前述の通り本エンジンは約30年ぶりの新モデルの開発であり、吸排気システムやパワーシリンダも含めてゼロからの新設計であった。新設計にあたって30歳前後の若手設計者主体のチームを結成し、従来の延長線上に捉われない自由な発想でコンセプトを作り込んだ。さらに、エンジン設計初期から、生産部門との意見交換を深めて従来以上にサイクル活動を推進することでエンジンコストについても改善を図った。

以下に本エンジンの開発のねらいを掲げる。

- (1) 燃費改善
- (2) EUのStage V 排出ガス規制に適合
- (3) エンジンコスト低減および整備性改善

表1にコマツ7トンショベルの開発機および従来機に搭載されているエンジンの主要諸元を記す。また、図4に7トンショベル用のStage V 規制対応エンジンSAA3D95E-1の外観を示す。

表1 コマツ7トンショベル搭載エンジンの主要諸元

	開発機	従来機
エンジン型式	SAA3D95E-1	SAA4D95LE-6
排気量	L	
気筒数	3	4
ボア径	mm	95
ストローク	mm	115
圧縮比		17.3
燃焼方式	直接噴射式	
過給方式	固定ターボ (空冷アフタークーラ付)	可変ターボ (空冷アフタークーラ付)
排気ガス浄化装置	日・米: KDOC (※2) 欧: KDPF (※3)	KDOC
燃料噴射装置	電子制御コモンレール	
バルブ数	個/気筒	
吸入	2	2
排気	1	2
動弁方式	OHV	
最大出力	kW/min ⁻¹	
最大トルク	kW/min ⁻¹	
対応する排ガス規制	日本	平成26年規制
	北米	Tier4Final
	欧州	Stage V

(※2) : Komatsu Diesel Oxidation Catalyst

(※3) : Komatsu Diesel Particulate Filter

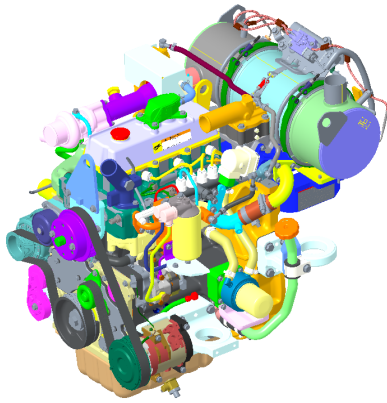


図4 Stage V規制対応エンジンSAA3D95E-1の外観

4. 3D95エンジン技術

4.1 燃費改善

SAA4D95LE-6に対して大幅な燃費改善を実現するため、小排気量化、低速化、燃焼改善および摩擦損失低減など様々な技術を織込んだ。図5に示す通り、エンジン燃費改善により車両サイクル燃費(※4)は従来機に対して約13%の低減を実現した。7トンショベル全体では従来機に対して約28%燃費改善しており、本エンジン燃費改善が大きく貢献している。以下にキーとなる技術を紹介する。

(※4)：日本建設機械施工協会規格(JCMAS)が定める試験方法に則して計測する燃料消費率

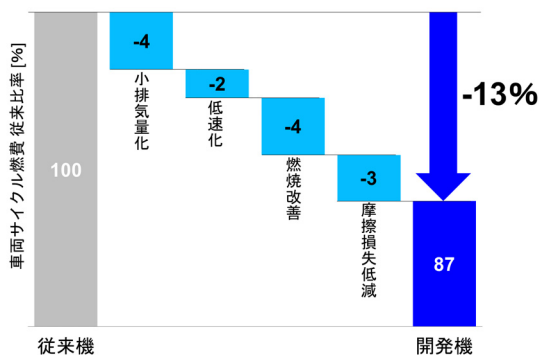


図5 3D95エンジンの燃費改善

4.1.1 小排気量化と低速化

同一出力の大排気量エンジンと小排気量エンジンを比較した場合には、後者の方が比出力が高く、排気量が小さいため、燃焼室を取り囲むピストン、シリンダブロック、シリンダヘッド等の部品サイズが小さくなり、放熱面積の低減により、冷却損失が低減する。また機械損失についても同傾向にある。高Pme(※5)化、高過給化することによりエンジンの排気量を小さくして損失低減による燃費低減を図る手法があり、この手法はダウンサイジングと呼ばれる。

SAA3D95E-1の開発においてもこのダウンサイジングを用いており、SAA4D95LE-6に対して排気量は3/4にしながら、7トンショベルの定格点においては過給圧を約1.4倍にすることでSAA4D95LE-6と同一出力を保持している。ダウンサイジングにより車両サイクル燃費はSAA4D95LE-6に対して約4%の低減を実現した。また、新しい7トンショベルにおいては、エンジン回転を低速でマッチングさせることでエンジン全体の損失低減も図っており、これによりさらに約2%の低減を実現した。

(※5)：Pme(平均有効圧力、内燃機関の熱的、機械的辛さなどを示す指標。)

4.1.2 燃焼改善

SAA4D95LE-6で開発した技術である高圧噴射システムやExhaust Gas Recirculation (EGR)システムを継承しつつ、SAA4D95LE-6に対して最大筒内圧(Pmax)を約30%増大させ、熱効率の向上を図った。一般的には噴射時期を進角することによって燃焼温度が高くなりNOxが増加するが、高回転・高負荷の領域においてEGR率を約10%上げることでNOx増加を抑制した。EGR率を上げるとPMの悪化が避けられないが、コモンレール圧を約25%増加させることでPM排出についてもSAA4D95LE-6と同等レベルに留めることを実現した。一方でPmaxの増加に伴い、耐圧性のために部品強度を高くする必要があった。SAA3D95E-1ではピストンピン径を約17%増加、コンロッドは高強度材への材質変更で対応し、シリンダブロックおよびシリンダヘッドは構造の最適化を行うことで高強度かつ低重量の形状のものを実現した。

またインジェクタの噴口数、噴口径を燃焼室と合わせて最適化することにより、燃料と空気の混合促進を図っている。この最適化により、吸気のスワール(筒内空気旋回流)比はSAA4D95LE-6に対して約2/3に低減させている。スワール比を低減させることで吸入空気を筒内に取り込む時の流入抵抗を低減し、ポンピングロス(吸排気行程で発生するエネルギー損失)を低減させている。吸気ポートの空気の入り易さを示す平均流量特性($\mu\sigma$)はスワール比の低減で改善されるが、図6に示すように吸気ポート形状の最適化を行うことによってスワール比低減分以上に $\mu\sigma$ を改善した。結果として、SAA4D95LE-6に対して $\mu\sigma$ は約20%の改善を実現した。

これらの燃焼改善技術により、SAA4D95LE-6に対して車両サイクル燃費はトータルで約4%の低減を実現した。

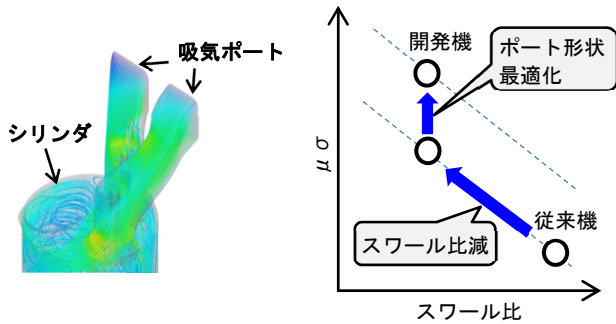


図6 吸気ポート形状の最適化

4.1.3 摩擦損失低減

SAA3D95E-1では、4気筒エンジンから1気筒減らした分の摩擦損失低減を図っているが、そのみならず摩擦損失を極小にするために以下に示す技術を織込んだ。これらの摩擦損失低減技術により、SAA4D95LE-6に対して車両サイクル燃費はトータルで約3%の低減を実現した。

(1) 連かん比増

コンロッドの大端部の中心から小端部の中心までの距離(L)を、クランク回転半径(r)で割った値を連かん比と呼ぶ。図7に示す通り、この値を大きくするとコンロッドの揺動角(ϕ)が小さくなり、ピストンの側圧(F)が減少するため、摩擦損失を低減できる。一方、大きくし過ぎるとコンロッドの長さに合わせてシリンダブロックの全高も大きくする必要があり、重量およびコスト増やエンジン全高増という背反がある。SAA3D95E-1においては、上記背反の影響を吸収できる最大長さのコンロッドを採用し、SAA4D95LE-6に対して連かん比8%増とした。

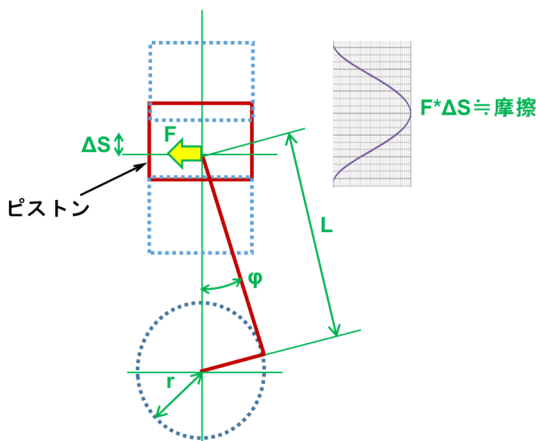


図7 連かん比とピストンの側圧

(2) ピストンスカートコーティング

SAA3D95E-1のピストンには、図8に示すようなスカート部にエボグライドコーティング(ポリアミドイミド樹脂にグラファイトと基盤樹脂を強化するための添加剤を加えたコーティング)を施している。これにより、スカート部の表面粗さが低減され、摩擦係数が小さくなる。また初期なじみ性が向上するため信頼性向上にも貢献している。

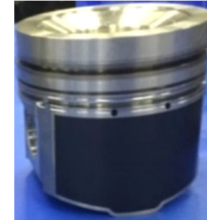


図8 ピストンスカートコーティング

(3) 補機容量の低減

SAA3D95E-1では冷却系、潤滑系の設計に、熱流体解析を用いて最適化を行うことにより耐久性を落とすことなく損失低減を実現した。図9にエンジン内部ウォータジャケットの水流れ解析の一例を示す。また補機容量低減に合わせたベルトレイアウトの最適設計も実施した。これらの最適化により、SAA4D95LE-6に対して冷却水流量、エンジン油圧、ベルト張力をそれぞれ2~3割低減した。結果として、ウォータポンプ駆動馬力、およびオイルポンプ駆動馬力はSAA4D95LE-6に対して約半減、ベルト駆動による摩擦損失は3割減を実現した。

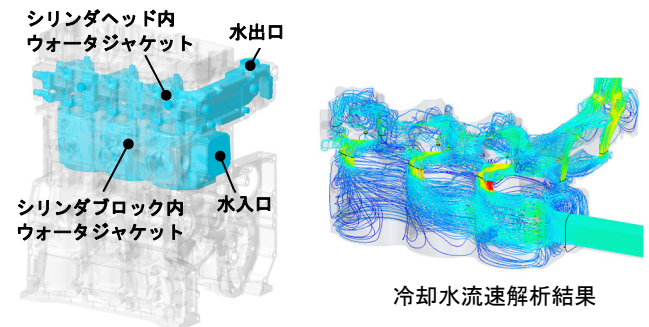


図9 エンジン内部ウォータジャケット水流れ解析例

(4) リークレスインジェクタ

SAA3D95E-1では、SAA4D95LE-6で採用しているインジェクタに対して燃料リーク量を大幅に低減したインジェクタを採用した。ここで言う燃料リーク量とは、高圧燃料が微小隙間を通じて燃料リターン経路に流出するもので、燃料の昇圧に用いた仕事の損失になる。燃料リーク量を少なくしたことでエネルギーロスを減らし、サプライポンプの駆動馬力低減を実現した。

4.2 排出ガス規制対応

4.2.1 KDOC仕様とKDPF仕様

排気ガス浄化装置は、日本および北米向けにおいて、従来機同様に必要十分な排気ガス浄化性能を持ったKDOCマフラを採用した。図10に示す通り、KDOCマフラはフィルタレスであるため車両全体のライフサイクルコストを抑えるメリットがある。欧州仕様は、Stage Vで追加されたPN規制に適合するために、特別に本エンジン専用のKDPFを開発、採用した。コマツではこれまでに56kW以上のエンジンにおいて多種のサイズのKDPFの開発を行っており、SAA3D95E-1においてはこれまでの技術は継承しながら改善点を余すところなく織込んだ新小型のKDPFとした。図11にKDPFの構造を示す。

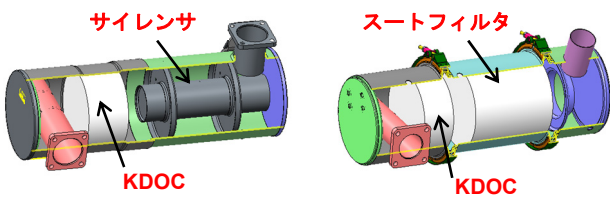


図10 KDOCマフラの構造 図11 KDPFの構造

4.2.2 オイル消費低減

SAA3D95E-1では、シリンダブロックのシリンダ部の円筒度、表面粗さを改善し、ピストンリングとの組み合わせを最適化することで筒内のオイル消費低減を図った。シリンダヘッドを取り付けた時にシリンダ内面形状が変形することを考慮し、ダミーヘッドを取り付けた状態で加工を行うことで円筒度の改善を実現した。図12に加工後のシリンダ内面の外観を示す。この結果、SAA3D95E-1はSAA4D95LE-6に対して約1/2のオイル消費率を達成した。筒内でのオイルの未燃焼分は排出ガスの中でPMとしてカウントされるため、オイル消費を低減することはPM低減に大きく貢献している。

また、オイルに含まれる金属成分が筒内で燃焼することでアッシュを生成してKDPF中に蓄積されていくため、KDPFは定期的な交換が必要になる。これまでのコマツエンジンでのKDPF交換インターバル4500hに対して、SAA3D95E-1ではオイル消費低減によりKDPF交換インターバルを6000hに延長し、ランニングコスト低減にも寄与している。

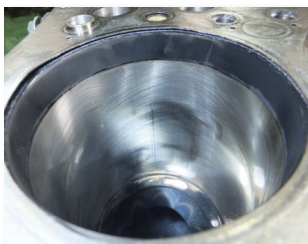


図12 シリンダ内面の外観

4.2.3 高効率ブリーザ採用のOCVシステム

SAA3D95E-1では、システムの簡素化およびコスト低減をねらいとして、ブローバイガス出口を大気へ開放するOpen Crankcase Ventilation (OCV) システムを採用した。ブローバイガスも排気ガスの一部として排出ガス規制の対象になるため、OCVシステム採用に当たっては排出ガス規制を満足させることが必達の課題であったが、高効率ブリーザの採用によりこの課題を解決した。図13に高効率ブリーザの概略図を示す。発生したブローバイガスの流速を上げて不織布に衝突させることでオイル分を分離させる機構となっている。不織布は定期交換を必要とせず、目詰まりを検出する圧力センサも必要としないので、メンテナンスフリー化およびランニングコスト低減にも貢献している。

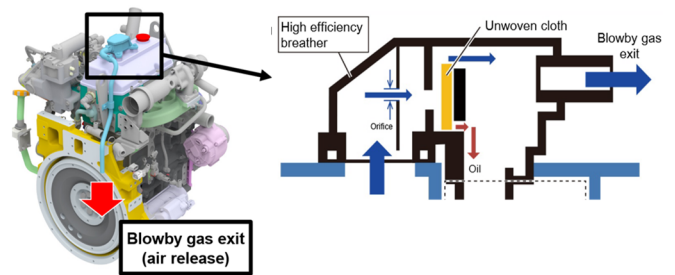


図13 高効率ブリーザの構造

4.3 整備性改善

7トンショベル用SAA3D95E-1において、図14に示す通り、日常点検および定期点検に使用されるオイルフィルタ、オイルゲージ、オイルフィルラ、燃料フィルタをワンサイドに配置することにより車両上でのアクセス性が大幅に改善した。

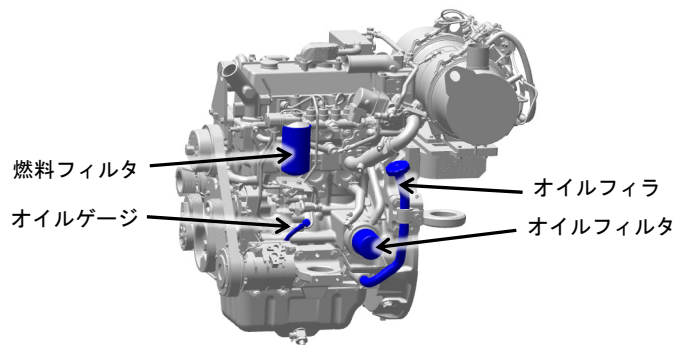


図14 フィルタ類の配置

またエンジン本体においても、部品集約によってSAA4D95LE-6に対して部品点数を大幅に削減し、整備性および組立性の改善を図っている。図15は部品集約の一例であり、SAA4D95LE-6では個々の部品である吸気マニホールド、ロッカーケース、EGRガス流路の機能をシリンダヘッドに持たせており、ギヤケース、ウォータポンプケースはシリンダブロックに持たせている。

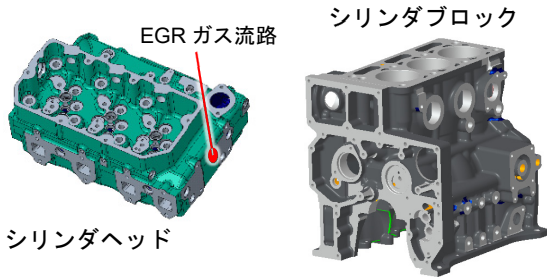


図15 シリンダヘッドおよびシリンダブロックの外観

4.4 コスト低減

これまでに述べてきた通り、SAA3D95E-1ではSAA4D95LE-6に対して、最適化による補機容量の低減や部品集約による部品点数削減、システムの簡素化等によりコスト低減を図っている。この他にも、固定ターボの採用、排気バルブ数の削減、排ガス浄化装置の貴金属量低減といったチャレンジングな変更も行っている。いずれも背反を伴うが、設計的な改良を加えると共に、十分な性能確認と品質確認を行った上で採用を実現した。これらにより購買品や社内加工費等の変動費 (SVC) は、SAA4D95LE-6に対して30%低減 (※6) を実現した。

(※6) : KDOCマフラ仕様。償却費および環境変動を除く。

4.5 振動対策

3気筒エンジンは主運動系の非対称配置により図16に示すような、クランクシャフトを横から見た時にクランクシャフト両端を上下方向に揺さぶる力 (偶力) の発生が不可避である。バランスシャフトを付けることで対策可能であるが、バランスシャフトの駆動力がエネルギーロスになって燃費を悪化させてしまう。SAA3D95E-1では図17に示すように、クランクシャフトだけでなくクランクプーリとフライホイールにバランスマスを持たせることで対応した。バランスマスを持たせることにより、上下方向の偶力をマウントで吸収しやすい水平方向の偶力に変換することが可能となる。バランスマスの付加は体積および重量を増加させるので、付加にあたっては物理的な制約がある。SAA3D95E-1ではエンジン体積および重量を鑑みて、オーバーバランス率を50%として上下方向と水平方向の偶力が等しくなるように設計した。

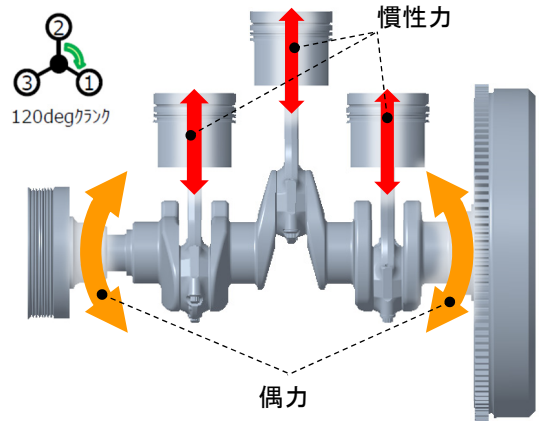


図16 3気筒エンジンの振動

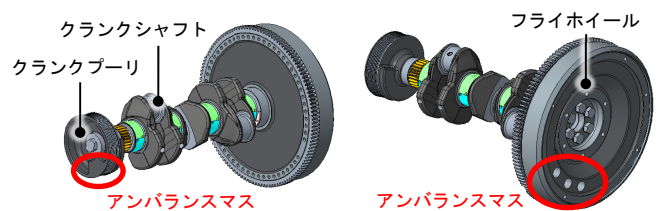


図17 バランスマスの外観

エンジンマウント設計においてエンジン開発部門は車両開発部門と連携を取りながら、図18に示すように耐久性と性能を両立させるよう最適化を行った。この最適化により、エンジンマウント部におけるオーバーオール加速度はSAA4D95LE-6と同等以下に抑えることを実現した。

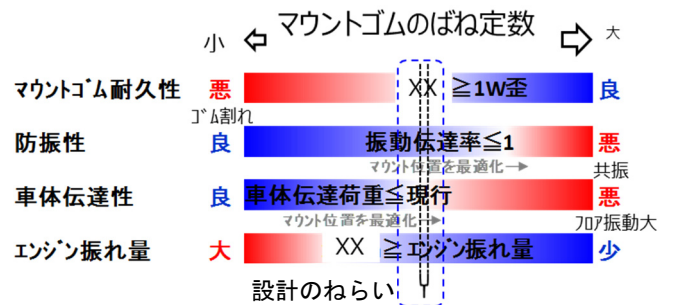


図18 エンジンマウントの最適化

5. 信頼性・耐久性

本エンジンの開発にあたって、従来から培われてきたコマツの産業用エンジンの品質確認コードを全て満足することはもちろんのこと、他サイズエンジンでの経験を踏まえて評価テストコードを改良しながら、十分な信頼性・耐久性の確認テストを実施した。建設機械の使われ方を模擬したサイクルでの耐久試験も行うことで、車両全体としての信頼性向上を図った。結果として、エンジン台上ベンチ耐久試験を合計10,000時間以上実施し、かつ車両試験を2,000時間以上実施し、そこで検出された問題点に対しては確実な対策を織り込み、十分な品質確認に合格した上で量産へと移行した。

6. おわりに

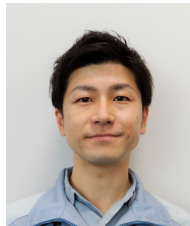
新たに開発したEU Stage V 排出ガス規制対応の37～56kWの出力レンジをカバーする2.4LエンジンSAA3D95E-1について、その開発の経緯と技術に関して紹介した。キーコンポーネントのほとんどを自社開発で行い、またその多くを自社生産とすることで、建設機械に要求される市場ニーズに合わせるだけでなく、競合他社との差別化をも図った新しいエンジンを導入することができたものと考えている。また、車両全体としても、コマツ7トンショベルの特長である力強さだけでなく、低燃費や整備性改善などのセールスフィーチャを織込んだ製品に仕上げることができたと考えている。

開発のフロントローディングが要求される中、本エンジンの開発においても、モデルベース開発として、物を作る前に必ずと言ってよいほどシミュレーションを行った。本稿では書ききれないほど、構造系、主運動系、動弁系、吸排気系、冷却系、潤滑系、燃焼噴射系、電気制御系の全てにおいて数多くのシミュレーションを行うことで、開発の初期段階での検討レベルが向上し、結果として開発工数についてはほぼ当初計画通りとすることができた。一方で、全てが想定通りではなく、開発完了に至るまでには多くの問題と課題を乗り越えなければならなかった。この開発を通して得られた経験は、次にフィードバックされ、より良いものづくりに繋がっていくコマツの財産になった。

参考文献

- 【1】 “小型建設機械用新2.4Lディーゼルエンジンの開発”，日本陸用内燃機関協会第20回技術フォーラム講演資料

筆者紹介



Ryosuke Matsuoka
まつおか りょうすけ
松岡 良祐 2011年、コマツ入社。
開発本部 エンジン開発センタ
株式会社アイ・ピー・エー所属



Akihiro Miki
みき あきひろ
三木 肇弘 2005年、コマツ入社。
開発本部 エンジン開発センタ
株式会社アイ・ピー・エー所属



Shouhei Nagasaka
ながさか しゅうへい
長坂 昇平 1996年、コマツ入社。
開発本部 エンジン開発センタ
株式会社アイ・ピー・エー所属

【筆者からひと言】

世界中で広がりを見せている脱炭素化への動きの中、化石燃料を扱う内燃機関への風当たりはより一層強くなっているが、軽油の持つエネルギー密度の高さやディーゼルエンジンが持つ耐久性、信頼性、耐環境性の高さを鑑みると産業用機械の動力源をディーゼルエンジンから他のものにすぐに置き換えることは現実的ではない。耐久性、信頼性、耐環境性を確保しながら、低燃費を実現した本エンジンが、社会のニーズに合致し、かつお客さまに満足してご使用いただけるエンジンとなっているものと確信している。