

特集：MAZDA MX-30 Rotary-EV

11

新型ロータリーエンジン 8C 型の開発 — 軽量で低燃費，高信頼性を両立した構造系技術 — Development of the New Rotary Engine — Technology of Structural Parts that Achieved Lightweight, Low Fuel Consumption and High Reliability —

横尾 健志^{*1} 新井 栄治^{*2} 坂井 隆則^{*3} 緒方 佳典^{*4}
Takeshi Yokoo Eiji Arai Takanori Sakai Yoshinori Ogata
橋本 真憲^{*5} 森永 裕太^{*6} 宮田 晋輔^{*7}
Masanori Hashimoto Yuta Morinaga Shinsuke Miyata

要 約

マツダは、約 11 年ぶりに復活となる新型ロータリーエンジン 8C 型を開発した。小型高出力な本エンジンを発電機として、シリーズハイブリッドで活用するものであり、地球環境を守るための施策として掲げているマルチソリューション戦略の 1 つである。本エンジンの開発でも「飽くなき挑戦」の精神を継承し、内燃機関の進化ビジョンを実現する熱効率改善技術、構造技術の進化と最適化に取り組んだ。ロータリーエンジンで課題となる冷却損失は、基本諸元を見直し最適化した。従来鋳鉄製であったサイドハウジングは材料をアルミに置換し軽量化した。また、燃焼進化にあわせて適宜レシプロエンジン構成技術の活用と高負荷燃焼に耐えうる構造強化を行った。レシプロエンジンと比べ、求められる出力性能をよりコンパクトなユニットで実現できる特長を活かし、サイズの大きな高出力モーター、ジェネレーターと組み合わせて同軸上に配置しながらも、MX-30 の車体フレームへの搭載を可能とした。

Abstract

Mazda has developed an 8C rotary engine, making a comeback after approximately 11 years. This compact and high-output engine is intended to be utilized as a generator in a series hybrid system, and it is one of the strategies in our multi-solution approach aimed at preserving the Earth's environment. The development of this engine also carried forward "the spirit of Never-Stop Challenging" focusing on improving thermal efficiency and evolving and optimizing structural technology to realize the vision of advancement in internal combustion engines. The challenge of cooling loss in rotary engines was addressed by reevaluating and optimizing basic specifications. The previously cast iron-made side housings were replaced with aluminum to reduce weight. Additionally, in line with the evolution of combustion, enhancements were made to leverage reciprocating engine enablement and strengthen the structure to withstand high-load combustion. Unlike reciprocating engines, the unique advantage of the rotary engine lies in achieving the required output performance with a more compact unit. This allowed for integration with larger, high-output motors and generators, positioned coaxially, while still enabling installation within the chassis frame of the MX-30 model.

Key words : Heat Engine, Rotary Engine, Design, Thermal Efficiency, Low Friction Loss

1. はじめに

クルマの電動化への移行期において、将来的なカーボンニュートラル液体燃料の選択肢を考慮し、マツダは内

燃機関の理想を追求し続け、どのような時代でも、走る喜びと環境性能の進化を両立するマルチソリューションの提供を目指している。この度、シリーズハイブリッドで活用するために、求められる出力性能をよりコンパクト

*1～7 エンジン設計部
Engine Design Engineering Dept.

トなユニットで実現した新型ロータリーエンジン 8C 型 (以下、8C 型) を開発した。本稿では、その実現に向けて導入した技術について紹介する。

2. 開発コンセプトと主要諸元

8C 型エンジンの外観を Fig. 1 に、技術コンセプトを Fig. 2 に、及び主要諸元を Table 1 に示す。8C 型エンジンは構造課題である冷却損失の低減のため、ロータリーエンジンの基本諸元である創成半径・偏心量を見直し低 S/V 化し、燃焼改善による熱効率改善を実現した。これに加えて Fig. 3 に示す走行負荷によらない発電機の運転マップ設定によりポンプ損失を低減し燃費改善を得た。

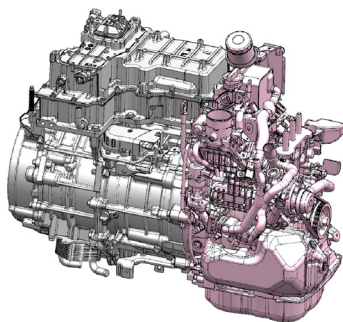


Fig. 1 Engine General View

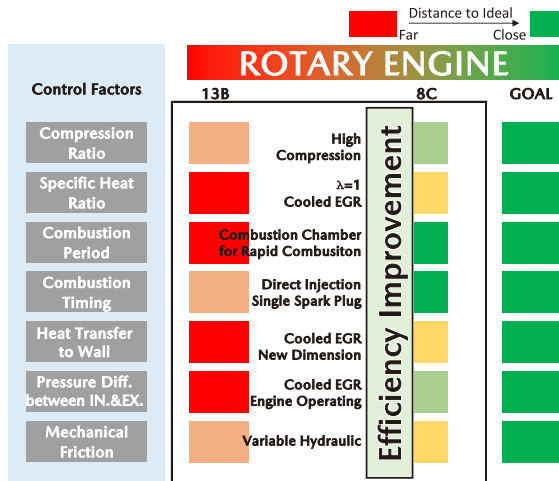


Fig. 2 Technology Concept

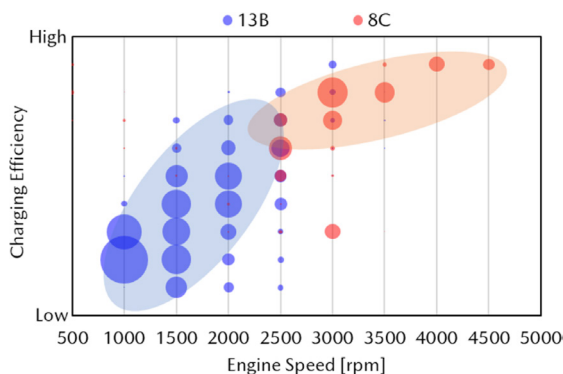


Fig. 3 Time Frequency Bubble Chart @WLTC Mode

Table 1 Specifications

Engine	13B RENESIS (Japan)	8C (Japan)
Number of Rotor	2 Rotor	1 Rotor
Basic Specifications e: Eccentricity R: Generating Radius b: Width	【B Dimension】 e=15 R=105 b=80	【C Dimension】 e=17.5 R=120 b=76
Displacement	654×2	830×1
Compression Ratio	10.0 : 1	11.9 : 1
Side Housing Material	Cast Iron+Gas Carbonitriding	Aluminum+ Cermet Thermal Spraying
Intake Type	Side/2port	Side/2port
Exhaust Type	Side/2port	Side/2port
Apex Seal Type	W=2.0 2 pieces Chilled Cast Iron	W=2.5 2 pieces Chilled Cast Iron
Fuel Injection System	Port Injection	Direct Injection
Max. Injection Pressure	0.4MPa	30MPa
EGR System	w/o	w/
Max. Power /rpm	158kW/7450rpm (Std.)	53kW/4500rpm
Fuel Type	Premium Gasoline	Regular Gasoline

加えて、出力高密度化に伴い、最大燃焼圧の上昇による構造系への荷重増加が課題となった。ロータリーエンジンの燃焼室はサンドウィッチ構造をしており、ローターハウジングのずれによる燃焼室保形性の改善が必要となる。また、マルチ電動技術コンセプトを実現するためには、発電機の軽量化と限られたスペースへの搭載性が必要となる。これらを解決する構造系の具体的な機能進化について紹介する。

2.1 熱効率の改善

(1) 諸元の適正化

基本諸元 (e: 偏心量, R: 創成半径) について示した図を Fig. 4 に示す。また、ロータリーエンジンのトロコイド係数は固定し、基本諸元 (e: 偏心量, R: 創成半径) の変更による機能影響を抽出した結果を Fig. 5 に示す。

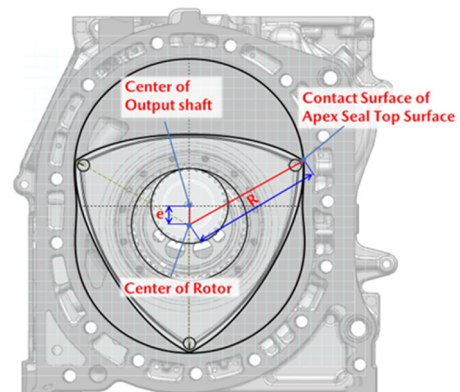


Fig. 4 Basic Trochoid Specifications (e, R)

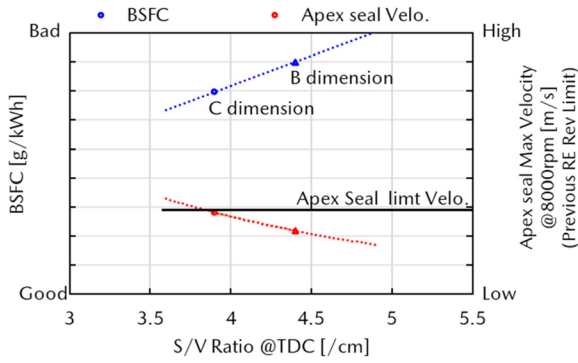


Fig. 5 Dimensions and S/V Ratio

燃焼室 S/V 比と機械抵抗による悪化及びアペックスシール周速限界から Table 1 に示す C ディメンションを選定し、熱効率改善を図った。

(2) 構造系の強化

Fig. 6 に示すようにロータリーエンジンは並んだハウジングをチューブラピンで位置決めし、テンションボルトで押さえつける構造となっている。燃焼圧による変形感度の高い制御因子は、チューブラ周り・短軸燃焼室側・袴部の剛性が挙げられる。ずれははじめの制御因子はテンションボルト総軸力と部品同士の合わせ面摩擦係数に依存する。

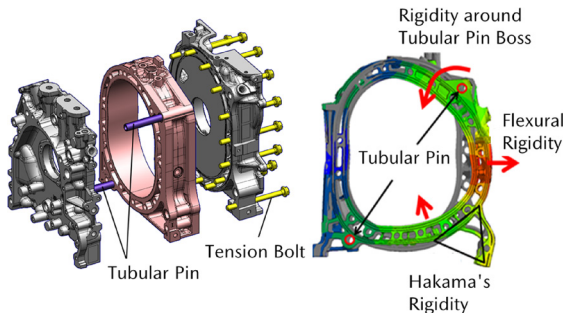


Fig. 6 Housing General View and CAE Analysis

燃焼改善に伴う最大燃焼圧増加は構造上、燃焼室変形を引き起こし、圧縮比の低下をもたらす。この対策として、生産制約を踏まえた各部剛性の最大化とテンションボルト総軸力の最適化を図り、変形量を半減させた (Fig. 7, 8)。

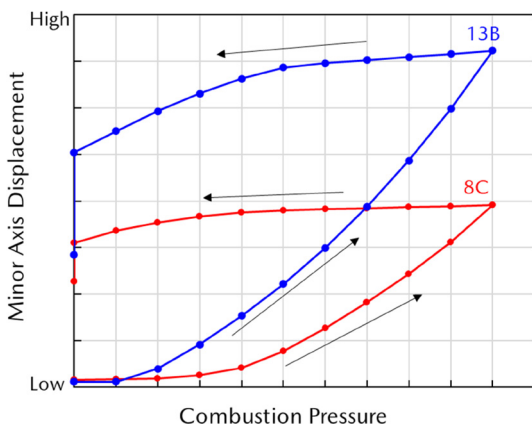


Fig. 7 Minor Axis Displacement @Combustion Cycle

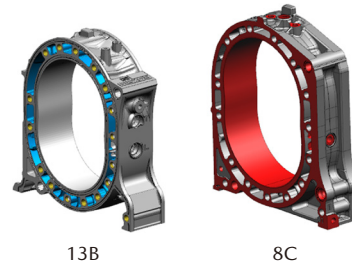


Fig. 8 Rotor Housing

2.2 重量の最小化

電動化に伴うパワートレイン総重量の増加から、発電機重量の最小化が求められ、排気量当たりの重量が軽量のロータリーエンジンにおいても更なる軽量化が必要となった。サイドハウジングを従来の鋳鉄からアルミに材料置換するため摺動面の強化を図った。

サイドハウジングの摺動面はサイドシール軌跡と燃焼圧による押付力で短軸部に負荷が集中し段付き摩耗が発生する (Fig. 9)。そこで、摺動面の耐摩耗性強化のため、レースエンジンで実績のあるサーメット溶射 (Cr3C2-NiCr) を高速フレイム溶射法にて量産化し解決した⁽¹⁾。

サイドハウジングのアルミ化により 8C 型で 15kg 以上の軽量化を実現している。

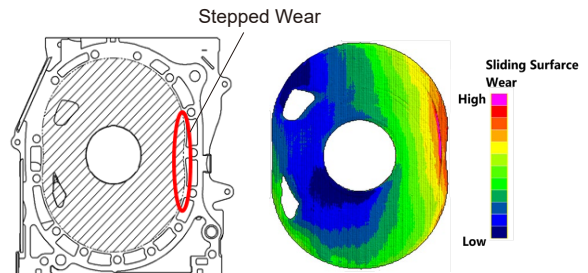


Fig. 9 Thermal Spraying Area and Wearing

2.3 搭載性

従来内燃車と電動車のパッケージを共通化するために、サスフレイム間のスペースにコンパクトな 8C 型をモーター・ジェネレーターと同軸上に配置し、車両前後方向 (Fig. 10) の最小化を図っている。これにより室内空間を犠牲にすることなく従来の内燃機関モデルと共通のエンジンルームに搭載を可能としている。

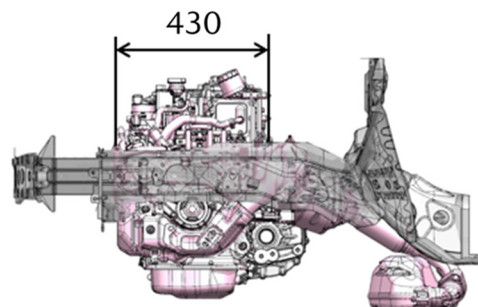


Fig. 10 Transverse Line Frame Direction Layout

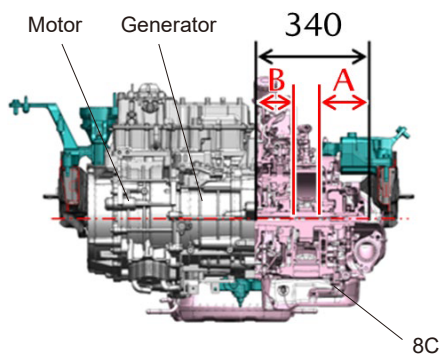


Fig. 11 Buttock Line Frame Direction Layout

8C型エンジン／ユニットとしては、回転系部品の構造を見直してエンジン軸端部長さを従来の13B型エンジン並みに抑えることで、上記のレイアウトへ収めた (Fig. 12)。

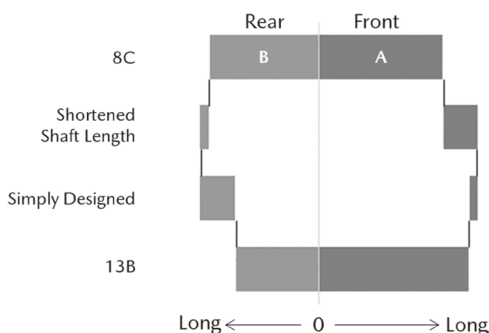


Fig. 12 Comparison of Shaft Lengths

(1) エンジンフロント側軸長 (Fig. 11 A 区間)

ロータリーエンジンでは、ローターの偏心質量に起因した不釣り合い慣性力を解消するために、ローターを挟んだエキセントリックシャフトの前後に釣り合いおもり (フロント側はバランスウェイト) を配置している。従来の2ローター・エンジンの場合、前後のローターの位相を180°ずらすことで、この不釣り合い慣性力をキャンセルすることが可能であるが、1ローター・エンジンの場合は、この不釣り合い慣性力を前後の釣り合いおもりで解消する必要があるため、8C型エンジンのバランスウェイト軸長は13B型比で1.5倍に拡大している。

そこで、エキセントリックシャフト内にあるローター冷却用のオイルジェット的位置をローターのリア側配置とすることでシャフト内油路をエンジン中心へ押し込み、フロントノーズ長を約15%短縮した。

(2) エンジンリア側軸長 (Fig. 11 B 区間)

8C型エンジンでは燃料の供給方式として直噴式を採用したため、エキセントリックシャフトのリア側に新たに燃料ポンプをチェーン駆動するためのスプロケットが追加となり、リア軸長の延長課題があった。

従来の13B型エンジンのシャフトリア側にはテーパ勘合でフライホイールを締結していたが、8C型エンジンでは、テーパ勘合部とはずみ車部を分離し、テーパ勘合部とスプロケットを一体化、はずみ車部はスプ

ロケットとの間にダイヤモンドワッシャーを挟み込むこと (Fig. 13) で必要なトルク容量を確保した上で軸方向に短縮でき、リア軸長の延長を約40%から30%へ抑えた。

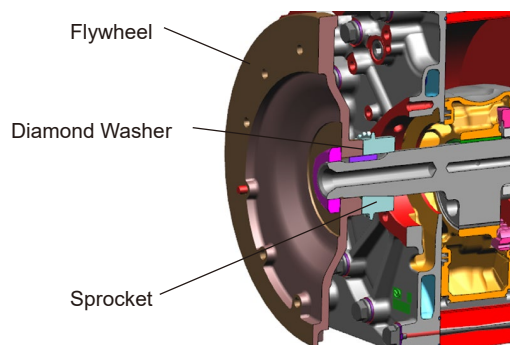


Fig. 13 Shortened Shaft Length (B Section)

3. 織り込み技術

3.1 ロータリーエンジン構成技術の改善

(1) オイルシール内圧低減

Fig. 14にローター断面及びオイル輸送経路を示す。ローターの側面には、ローター内部を冷却しているオイルの燃焼室への漏れに起因するオイル消費を抑制するため、リング状のオイルシールを設けている。ローターが大きくなったことにより、オイルシール径が拡大しシール長が増加した。加えて、偏心して回転するオイルシール内側のオイルに作用する遠心力の増加や、オイルのかき込み時に生じる動圧による圧力上昇により、オイル漏れ量の改善が課題となる。この対策として、オイルシール溝底からローター内部へオイルを排出するリリーフホールを設けた。穴位置はローター内部の冷却オイル循環の主経路を外して選定することで、オイルシール内部の圧力低下とオイル漏れ低減効果を得た (Fig. 15)。

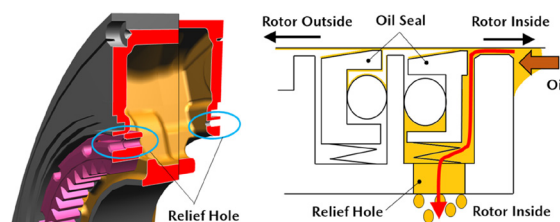


Fig. 14 Rotor and Oil Transport

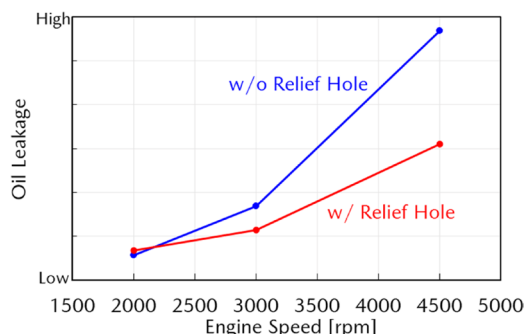


Fig. 15 Oil Leakage vs Engine Speed

(2) トロコイドめっき

Fig. 16 にトロコイドめっき部を示す。ローターハウジング摺動部のトロコイド面には、めっき浴へ触媒を添加する高速 Cr-Mo めっきを新たに開発し、低摩擦化を図った⁽²⁾。

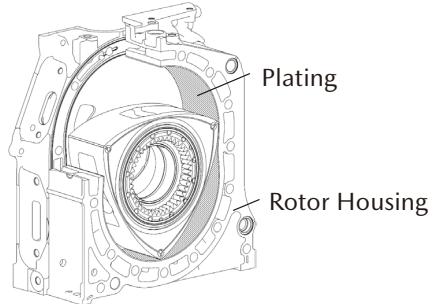


Fig. 16 Trochoid Plating

めっき被膜の低摩擦化により、従来から行っているトロコイド表面の油溜まり形成工程の簡素化や低摩擦コーティングの廃止ができ、生産性の向上にも寄与している。

(3) アベックスシール

アベックスシールとは、ローターの各頂点部に設けたガスシール部品であり、摺動面（トロコイド面）との接触面を第 1 次気密面、シール溝壁との接触面を第 2 次気密面と呼び、この 2 つの気密面を確保することがガスシール機能の基本となる。

この各気密面を確保するための押付力は主にガス圧力によって得ている。シリーズハイブリッドの発電用ユニットである 8C 型エンジンは、ガス圧力の大きな高負荷運転頻度が増えるため、押付力増加によるアベックスシールの摩耗抑制が課題となった。そこで、3.1. (2) のトロコイドめっきの採用に加えて、アベックスシール摺動面の揺動範囲 L を拡大することで耐摩耗性の向上を図った。Fig. 17 に示す様に、アベックスシールとトロコイド面との接触線（第 1 次気密面）は $\pm\phi$ の範囲で揺動し、この ϕ を揺動角と呼ぶ。揺動角 ϕ は基本諸元（Table 1）から決定されるため、アベックスシール摺動面の曲率を拡大することで揺動範囲 L を拡大した。しかし、揺動範囲 L を拡大するとアベックスシールの幅寸法も拡大してしまうため、摺動面への押付力増加によって潤滑状態の悪化を招いてしまう懸念があった。

そこで、アベックスシール摺動面の曲率（幅寸法）だけでなく、高さ寸法も含めた断面形状を見直す（Fig. 18）ことで各気密面の押付力/面圧を制御し、摺動面の潤滑状態を向上させた（Fig. 19）。また、第 2 次気密面のガスシール性向上を狙って、アベックスシール倒れ挙動も同時に抑制した（Fig. 20）。これは、アベックスシールがシール溝内で倒れ姿勢となった場合、第 2 次気密面は面接触から線接触へと変化するため、ガスシール機能の低下を招いてしまうことを防止する目的からである。

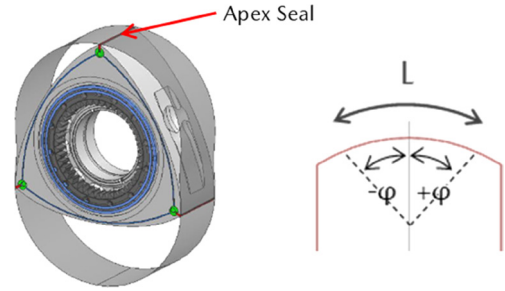


Fig. 17 Apex Seal

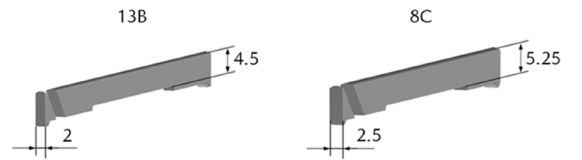


Fig. 18 Apex Seal Major Specification

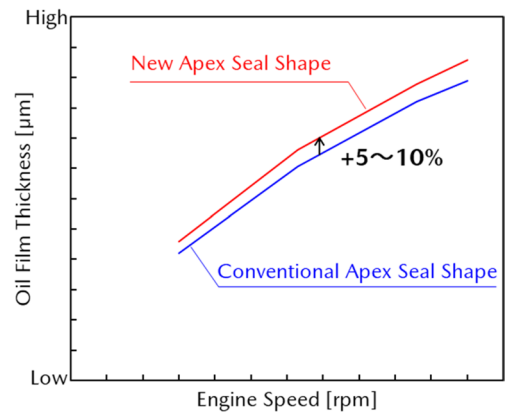


Fig. 19 Oil Film Thickness of Apex Seal

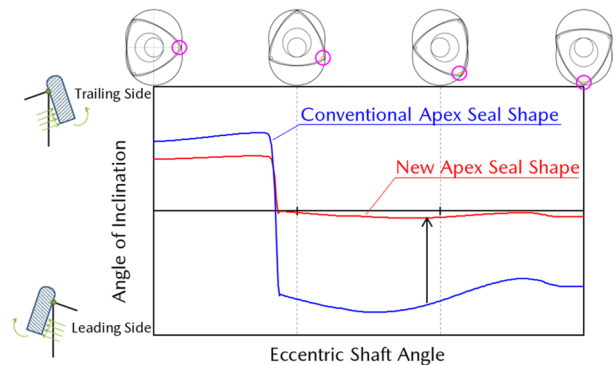


Fig. 20 Kinetic Analysis of Apex Seal at Low Speed

3.2 レシプロエンジン構成技術の展開

8C 型エンジンでは、既に確立された技術であるレシプロエンジン構成技術を水平展開することで開発期間を短縮した。以下にその技術を紹介する。

(1) DI ポンプ駆動

Fig. 21 に燃料ポンプ駆動システムを示す。排気ガス温と未燃 HC の低減、燃費改善を目的として、8C 型では従来のポート噴射 (PI) から直噴 (DI) に変更した。

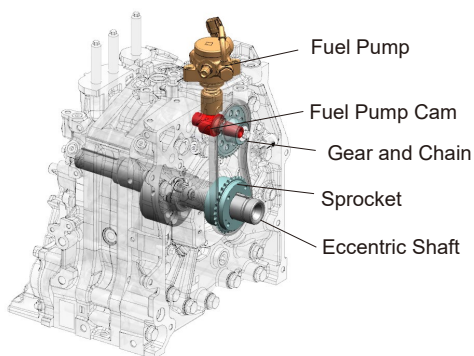


Fig. 21 DI Pump Drive System

一般にレシプロエンジンで使用される燃料ポンプシステムをロータリーエンジンで駆動するため、燃料ポンプカムハウジングをリアハウジングに搭載した。エキセントリックシャフト後端にドライブスプロケットを追加し、チェーン駆動するシステムとした。

(2) 可変油圧制御

Fig. 22 に油圧システム回路を示す。シリーズハイブリッド化により高負荷領域を主としたエンジン運転条件となっている。ローター冷却性の強化（クーリングオイルジェット流量増大）と水冷オイルクーラーでの放熱量強化のため、従来より多くの供給流量が必要となった。高負荷領域で増加する要求流量は確保し、実用低速領域における燃費を向上させるため、OCV（Oil Control Valve）を用いた可変油圧コントロールを行っている。OCV 採用により低回転域の機械抵抗を 14%低減した（Fig. 23）。

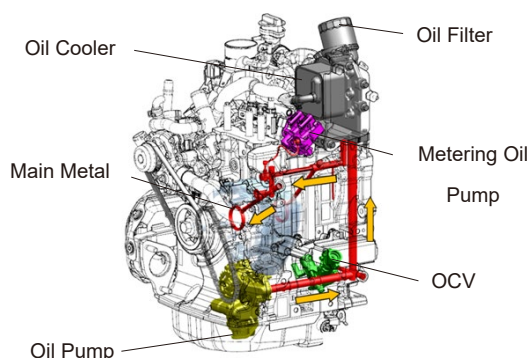


Fig. 22 Oil Circuit

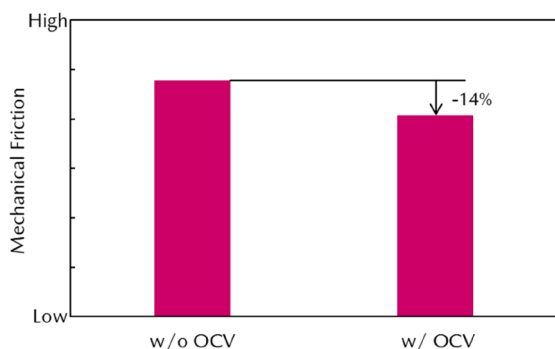


Fig. 23 Mechanical Friction @2500rpm Oil Temp.95°C

(3) Cooled EGR システム

Fig. 24 に EGR システムを示す。ロータリーエンジンの理想燃焼へ近づけるため高圧縮比化しているがノッキングが発生しやすくなる。ノッキング抑制手段として、排気ガスを吸気へ再循環する Cooled EGR システムを採用した。

Cooled EGR を導入することで、比熱比の向上、冷却損失の低減、ポンプロスの低減により燃費改善効果が得られる。

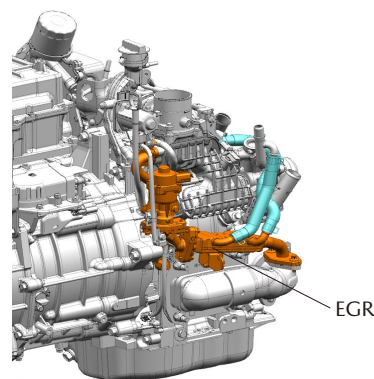


Fig. 24 EGR System

4. おわりに

8C 型エンジンは基本諸元の最適化と構造系進化により、RE 基盤技術の底上げを図った。マツダ初のマルチ電動化技術のエンジン開発となったが、レシプロエンジンの構成技術も活用し、コンパクトなロータリーエンジンの特長を活かしたパワートレインを量産化できた。手の内化した技術を今後の開発にも順次適用し、マルチソリューションによる環境貢献につなげていく。

参考文献

- (1) 小田ほか：溶射技術によるアルミニウム合金鋳物の耐摩耗性向上, [マツダ技報, No.29, pp.110-114 \(2011\)](#)
- (2) 谷田ほか：エンジン摺動部材の低摩擦表面処理の開発, [マツダ技報, No.27, pp.148-152 \(2009\)](#)

■著者■



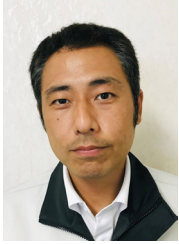
横尾 健志



新井 栄治



坂井 隆則



緒方 佳典



橋本 真憲



森永 裕太



宮田 晋輔