

特集：ロータリエンジン

3

サイド排気ポート方式ロータリエンジンの概要 Side Exhaust Port Rotary Engine

田島 誠司*¹ 清水 律治*² 小藤 秀明*³

Seiji Tashima

Ritsuharu Shimizu

Hideaki Koto

海老野 弘*⁴ 岡崎 俊基*⁵ 植木 信也*⁶

Hiroshi Ebino

Shunki Okazaki

Shinya Ueki

要約

新開発『RENESES』は、ロータリエンジンの最大の魅力である加速フィーリングを最大限に発揮させながら、高性能化だけでなく燃費改善・排出ガスクリーン化を実現するロータリエンジンである。

従来のペリフェラル排気ポート方式から、サイド排気ポート方式⁽¹⁾にすることで、吸気ポート面積の30%拡大による高出力化、排気ポートオープンタイミングの遅角化による熱効率の向上と内部EGRの減少に伴うアイドル燃焼の安定化による燃費改善、そして未燃炭化水素（以下HC）総排出量の低減による排出ガスエミッション性能の改善を実現した。

Summary

By making the most of the rotary engine's great appeal of acceleration feel, the new RENESIS delivers not only high performance but high fuel economy and clean exhaust gas as well.

The peripheral exhaust port of a previous rotary engine has been replaced with a side exhaust port system. This allows an intake port area to increase by 30%, thus producing high power. Exhaust opening timing is retarded to improve thermal efficiency. The side exhaust port also allows the internal EGR to be reduced, stabilizing combustion at idle. The improved thermal efficiency and the stabilized idle combustion improve fuel economy. In addition, the side exhaust port provides the reduction in the HC mass, thereby realizing improved exhaust gas emissionability.

1. はじめに

21世紀を迎え、幅広いお客様の期待に応えるためには、高性能化とともに燃費や排出ガスエミッションの大幅な改善が必要であった。このため、ロータリエンジン（以下RE）で35年間採用してきたペリフェラル排気ポート方式から、サイド排気ポート方式に変更するための開発に取り組み、RX-8搭載のRENESESの基幹技術へと進化させた。本稿では、そのサイド排気ポート方式REの技術概要について述べる。

2. 従来REの課題

従来REは、サイド吸気ポートとペリフェラル排気ポートの組み合わせで燃費・排出ガスエミッション性能改善、出力性能向上に積極的に取り組んできたが、以下に述べる課題があった。

2.1 燃費

従来REでは、低回転軽負荷領域において燃焼安定性を確保するために空燃比を理論空燃比より濃くし、排出ガスエミッションを確保するために、機械式エアポンプを使って、排気へ二次エアを供給していた。また、ペリフェラル排気ポートの構造上、排気オープンのタイミング（以下EO）が早く膨張エネルギーを回収するうえで不利であった。従って熱効率向上のためには、理論空燃比での燃焼安定性向上とEOの遅延化が重要な課題であった。

(1) 熱効率

熱分配と混合気の濃さの関係をFig.1に示す。過濃混合気領域において、HC、CO等の未燃成分化学エネルギーとして持ち去られる量が増加し、熱効率が低下する関係にあることが分かる。

(2) 軽負荷の燃焼安定性

燃焼安定性向上のためにロータリセス（燃焼室）形状最

* 1 ~ 6 第2エンジン開発部
Engine Development Dept. No.2

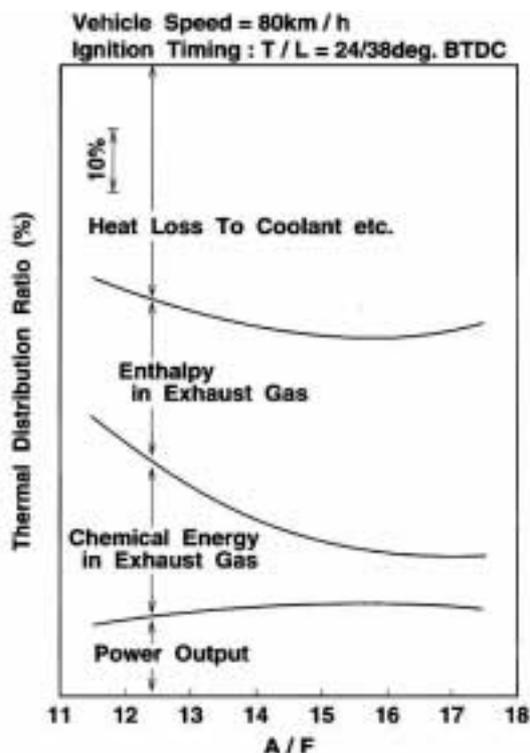


Fig.1 Thermal Distribution of RE

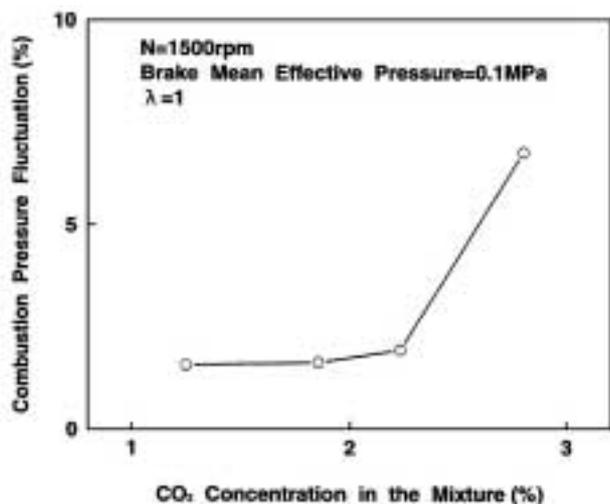


Fig.2 Relationship Between CO₂ Concentration in the Mixture and Combustion Pressure Fluctuation

適化，二次エアによる内部EGR置換，吸・排気ポートタイミング最適化，燃料微粒化，点火能力向上などといった様々な面から取り組んできた。

Fig.2に燃焼室内CO₂濃度（内部EGR割合の代用特性）と燃焼圧力変動の関係を示す。燃焼圧力変動は、各サイクルの最高燃焼圧力の平均に対する圧力のバラツキ割合を標準偏差で表したものである。内部EGRの低減とともに燃焼が安定していることが判る。

排気上死点付近での排気クローズ（以下EC）と，吸・排気のオーバーラップを無くすことで内部EGRを低減し燃焼安定性は改善できる。しかし，ペリフェラル排気ポ-

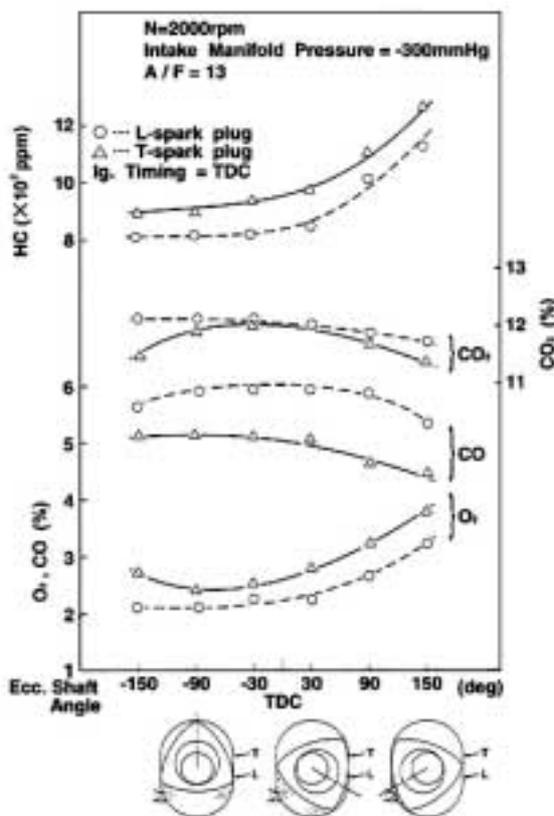


Fig.3 Concentration of Exhaust Composition at Different Rotor Angles

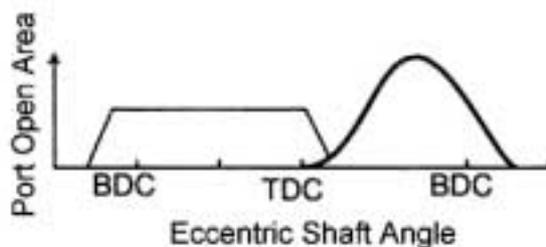


Fig.4 Port-open Area (Peripheral Exhaust Port)

トでは構造上，ECは上死点後にしか設定することが出来ない。

2.2 排気ガスエミッション

REの場合，排気ガス中にNO_xが少なく，HCの排出量が多い特徴がある。Fig.3に各ロータ姿勢に対する各成分の排出量を示す。特に，燃焼室トレーリング側部分が排気ポートに近づいたときにHCの排出量が急増している。同時にO₂量も急増し，CO₂量が減少していることから，排気オープン・クローズのタイミングの最適化で，排出ガスエミッションが改善できることが分かる。

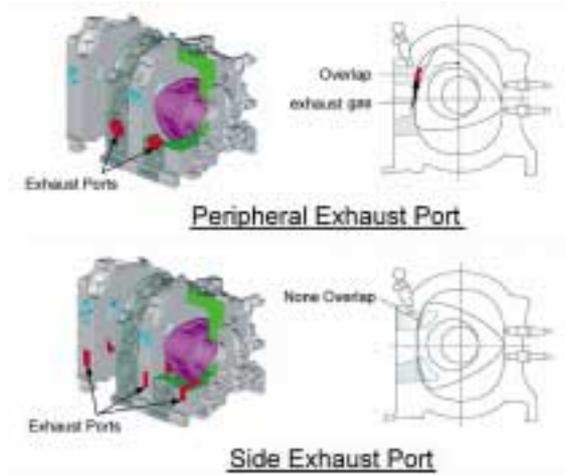


Fig.5 Exhaust Port

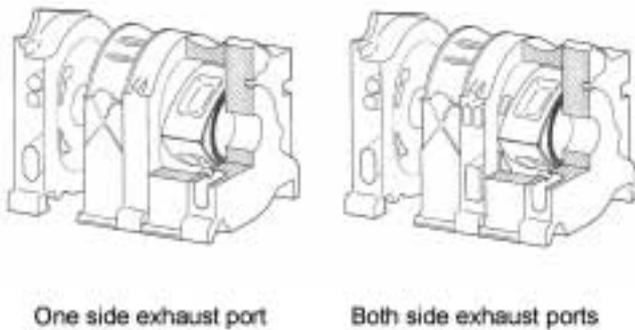


Fig.6 Side Exhaust Port

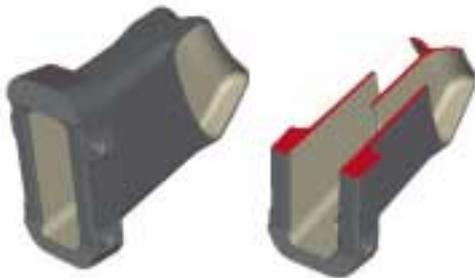


Fig.7 Exhaust Port Insert

2.3 出力

ペリフェラル排気ポートの場合、大幅な出力向上を実現するためには、吸排気ポートのオーバーラップをさらに拡大させる方向に排気ポートを広げざるを得ず、そうなると先述の安定性が悪化し、出力と両立しない。この解決が課題であった (Fig.4)。

3. サイド排気ポートへの転換

3.1 サイド排気ポートの課題

これまで述べたことから、燃費・排出ガスエミッション・高出力・低負荷燃焼安定性の両立を図るためのブ

クスルー技術は、「吸排気ポートタイミングの設定自由度を上げる」ことにあることが分かる。その技術としてサイド排気ポートがあるが、その採用には過去のサイド排気ポート開発での課題を克服しなければならなかった。

3.2 サイド排気の基本概念

Fig.5に示すようにサイド排気ポートは、サイドハウジングに排気ポートが開いているため、排気タイミングの設定時自由度が高く、ECを上死点付近に設定できるため、同じサイドハウジングに設定した吸気ポートとオーバーラップを回避することができる。

4. サイド排気ポートの課題克服

4.1 排気ポート面積の拡大

従来の量産型REは、排気ポートをロータ毎に1個トコイドハウジングに設置していた。一方、サイド排気ポートは、排気ポート面積をさらに拡大するため、排気ポートをロータ毎に1個設けた片排気ポート方式から、ロータ毎に2個という両排気ポート方式に変更した (Fig.6)。その結果、排気ポート面積はペリフェラル排気ポートのほぼ2倍となり、排気抵抗が大幅に低減されている。これは、インターミディエイトハウジングに排気ポートを追加設置するため、小型でしかも2つの通路を仕切る排気ポートインサートの開発の結果である (Fig.7)。

4.2 吸排気ポートの最適化

次に、サイド排気ポートの性能を引き出し、かつ信頼性を高めるために最も重要な役割を果たしたガスシールの開発について述べる (Fig.8)。

(1) サイドシール

サイドシールは1970年頃の二重タイプ以降、シール性能が改善し、一重タイプに変更されていた。その上で、サイドシールをロータ外周部に2mm張り出した位置にすることで、ECを排気上死点付近 (EC = BTDC3°) に設定可能とした。合わせて吸気オープンタイミングを早くできるようになり (IO = ATDC3°), 吸気ポート面積を約30%拡大できた (Fig.9)。また、排気ポートに開口するサイドシールをカーボン付着から回避させるために、キーストーンタイプの断面形状を採用した。

(2) アベックスシール

従来3分割タイプであったアベックスシールは、吸排気ポートが上死点付近まで開口すると、下側のピースが吸排気ポートに脱落するため廃止した。結果としてシール自体の軽量化となり、高速域でのシール挙動が安定しガスシール性が向上した。

(3) コーナシール

コーナシール中央のゴム製のプラグが排気ポートに開口し焼損するため鋳鉄製に変更し、かつ排気ポートでの潤滑切れ対策として、高硬度のコーティングを施した。

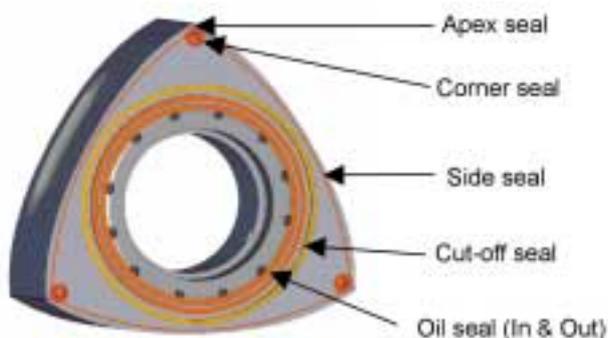


Fig.8 Gas Seal & Oil Seal

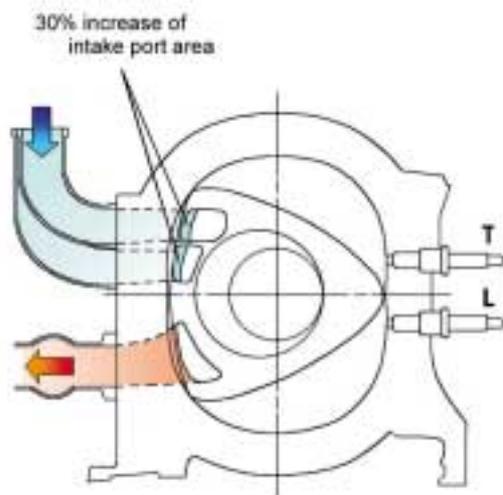


Fig.9 Increase of Intake Port Area

(4) カットオフシール

上記ガスシールの改良により、吸排気ポートタイミングを上死点付近に設定し、オーバーラップも無いタイミングに設定できるようになったが、ロータ側面を介して、吸排気が連通し、内部EGRの低減ができない。そのため、実質的なオーバーラップゼロを実現するためにロータ側面にピストンリング形状のカットオフシールを新設した。

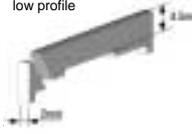
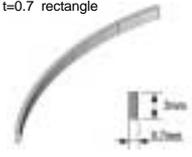
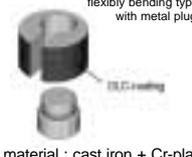
(5) オイルシール

二重オイルシールは、REの高性能化に伴いOut側はシリコンゴムから高耐熱性のフッ素を採用していたが、サイド排気ポートではサイド面の熱負荷の上昇に伴い、In側もフッ素とした。

4.3 排気ポートのカーボン詰まり解消

潤滑用オイルを作動室内に供給するため、1970年当時は吸気ポートからオイルを供給する方式であった。この場合オイルがガスシールのしゅう動面に供給される割合が低く、相対的にオイル供給量が多くなり、排気ポートのカーボン詰まりの原因となっていた。しかし、その後のREは、オイル供給量低減のため、トロコイド面に直接オイルを供給するダイレクト方式を開発し、またオイルポンプをステップモータで制御するなど、大幅な進化をとげ、供給量は

Table1 Specification of Seals

Parts name	Peripheral Exhaust Port	Side Exhaust Port
Apex Seal	Apex seal of 3 pieces  material : chilled cast iron	Apex seal of 2 pieces low profile  material : chilled cast iron
Side Seal	t=0.7 rectangle  material : sintered alloy (iron based)	t=1.2 keystone  material : sintered alloy (iron based)
Corner Seal	flexibly bending type with rubber plug  material : cast iron + Cr-plating	flexibly bending type with metal plug  material : cast iron + Cr-plating + DLC-coating
Cut-Off Seal		Tapered expansion ring  material : spheroidal graphite cast iron
Oil Seal	material : boron cast iron + Cr-plating (internal circumference) with silicon rubber O-ring (inner)	material : boron cast iron + parcel Cr-plating (internal circumference) with fluorocarbon rubber O-ring (inner)

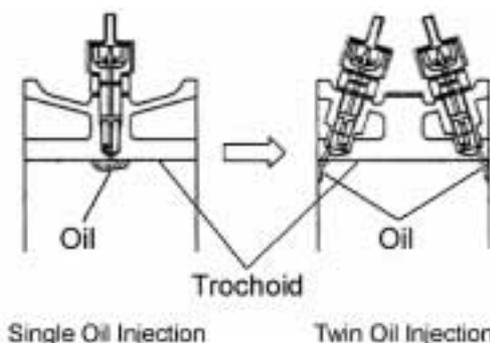


Fig.10 Direct Oil Injection

1/10以下にまでなっていた。また、排気ポート側のサイドシールやコーナシールの潤滑性を高めるため、ツインダイレクト方式を開発した (Fig.10)。これらの技術により、排気ポートのカーボン詰まりは解消された。

5. 基本性能

従来のペリフェラル排気ポートをサイド排気ポートにし、性能の最適バランスをとった結果、次のような性能改善が得られた。

5.1 燃費

EOをペリフェラル排気ポートのBBDC72 °からBBDC

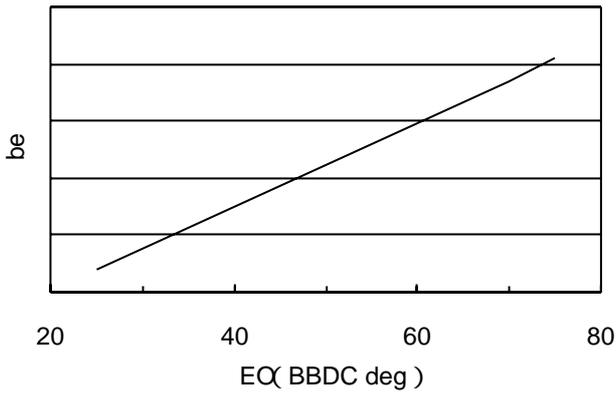


Fig.11 Relation between Exhaust-open and be

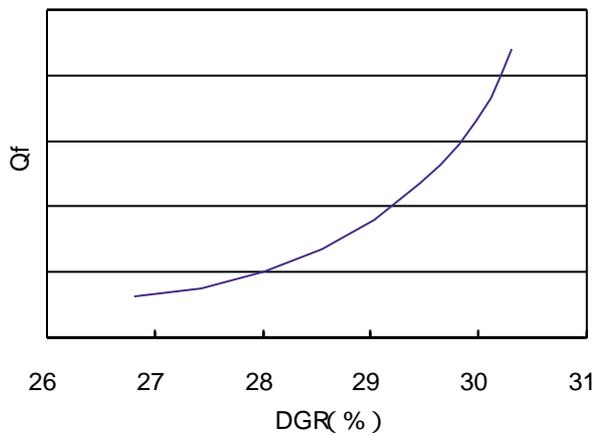


Fig.12 Relation between DGR and Qf

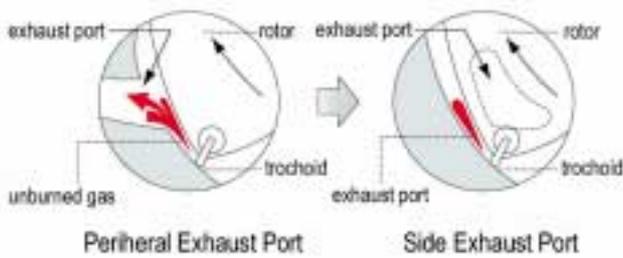


Fig.13 Unburned Gas

ることで、排気行程後半のHC濃度上昇が減少し、HC総量が減少する (Fig.13)。

5.3 出力

セカンダリ吸気側に制御バルブで開閉するオギジュアリポートを設置し、2ロータで計6つの吸気ポートを持つ6ポートインダクションシステムを採用した (Fig.14)。プライマリ+セカンダリ+オギジュアリポートの3つの吸気ポートを開くことで、Fig.15に示す吸気ポート面積プロフィールを実現した。さらに両側排気とすることで排気抵抗を低減し75PSの出力向上を、さらに実排気クローズタイミングを遅らせるため、ロータの排気クローズを行う角度をカットする構造 (フランクカット) で15PSの出力向上を図ることができた (Fig.16)。

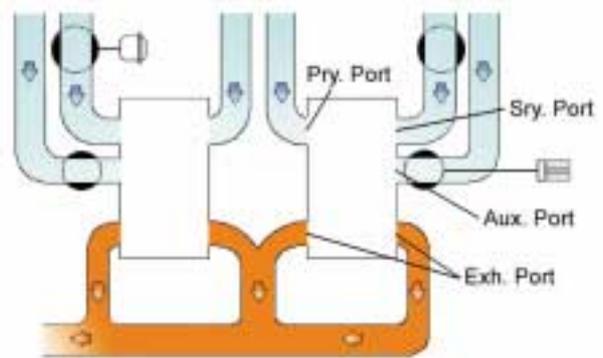


Fig.14 6-Port Induction System

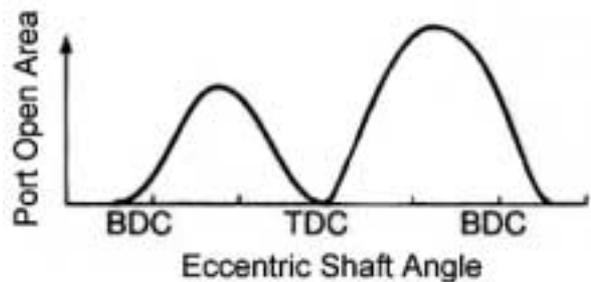


Fig.15 Port Open Area (Side Exhaust Port)

50°にすることで、膨張行程期間が198°から220°まで延びるため、熱効率の向上が図れる (Fig.11)。

また、吸排気ポートのオーバーラップが無くなり内部EGR (吸気への排気持ち込み割合) が減少し、ID燃焼が安定する (Fig.12)。その結果、従来REでは必須であった機械式エアポンプを廃止し、常用運転域で行っていた燃料増量を止め、理論空燃比で運転することで、燃料消費量を大幅に低減することができ、燃料の制御性も向上した。

5.2 排出ガスエミッション

ペリフェラル排気ポートからサイド排気ポートに変更す

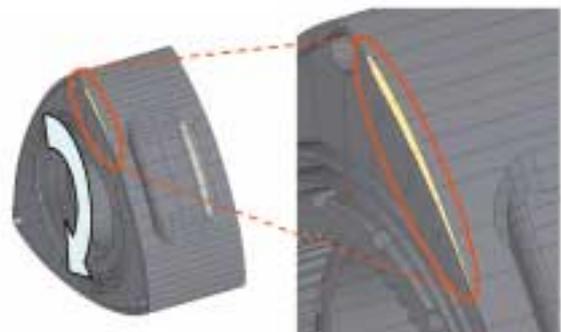


Fig.16 Flunk Cut

5.4 重量・コスト・部品点数

Table 2 に、ペリフェラル排気ポートREとサイド排気ポートREの比較を示す。サイド排気ポートはペリフェラル排気ポートに比べ、自然吸気化による部品点数の減少、部品の軽量化等により、質量で24%、部品数30%の削減を達成している。

Table 2 Comparison of Exhaust Port

	Peripheral Exhaust Port (with Turbocharger)	Side Exhaust Port
Weight	163kg	124kg
Number of Parts (Ratio)	1.0	0.7

6. おわりに

ロータリエンジンは35年間継続して採用してきたペリフェラル排気ポート方式から、全く新しいサイド排気ポート方式に変更することにより、革新的な飛躍を成し遂げ、燃費・排出ガスエミッション・高出力・低負荷燃焼安定性の両立を図ることが出来た。従来の方式を根本から変革したこの開発は、エンジニアにとって大きな挑戦であった。しかし、環境に貢献しつつ走る喜びを提供できる最高のエンジンをお客様に提供するために、あくなき挑戦を続け、実現することができた。

今後も他社に真似ることのできない、独自の魅力あるエンジンを開発することで、お客様に感動を提供し続けていきたい。

参考文献

- (1) Shimizu et al. "The Characteristics of Fuel Consumption And Exhaust Emissions of the Side Exhaust Port Rotary Engine", SAE Technical Paper (1995)
- (2) Muroki, T. et al., "Unburned Hydrocarbon Emissions of Wankel Type Rotary Piston Engines (1st, 2nd Report)" JSME Vol.53 No.485B (1987)

著者



田島誠司



清水律治



小藤秀明



海老野弘



岡崎俊基



植木信也