

特集：ロータリエンジン

6

RENESIS生産ラインの紹介
RENESIS Production Line金 徳 祐 二*¹ 増 田 雅 彦*² 藤 崎 周 二*³

Yuji Kanetoku

Masahiko Masuda

Shuji Fujisaki

有 見 幸 夫*⁴ 椎 野 和 幸*⁵

Yukio Arimi

Kazuyuki Shiino

要 約

ロータリエンジン（以下RE）は、自動車メーカーの中でマツダだけが実用化に成功し現在も唯一生産を続けている。それに伴うREの生産技術、設備についても全て独自に開発を進めてきた。

マツダはこのたび、新世代RE「RENESIS」を完成させたが、この実用化には新たな生産技術、設備の開発が不可欠であり、マツダグループの技術者の総力をあげて実用化に取り組んできた。RE製造におけるマツダ独自の経験と技術、TPM活動に象徴される卓越した技能、そしてMDI（マツダデジタルイノベーション）に基づく新技術開発・工法の革新、伝統と先進性を融合させて構築したエンジン生産ラインを紹介する。

Summary

Rotary engines (hereafter called RE) are the automotive engines being produced by Mazda Motor Corporation, or the first and only company to have succeeded in putting them into commercial production among all automakers in the world.

Mazda has just completed a new-generation RE “ RENESIS ”, which had required the development of new technologies and facilities with all Mazda engineers’ energies focussed on practical use of RENESIS. This paper introduces Mazda’s own experiences and technologies about RE production, technical excellence symbolized by TPM activities, new technology development & production method innovation based on MDI (Mazda Digital Innovation), and our RENESIS engine plant built by unifying our tradition of technical excellence and advanced technology.

1 . はじめに

1967年コスモスポーツの発表からRX-7にいたるRE生産技術の変遷は、レシプロエンジンとは全く異なるトロコイドフォームを基本としたガスシールの構造をもつエンジンを世界で初めて製造することに始まった。そしてそれは設備を独力で造り上げていく技術開発、そして実用化、まさに創造の歴史でもあった。

今回「RENESIS」へと進化をとげたエンジン生産の実用化に際しても商品開発と併行して生産方式、工法の開発を行い品質のレベルアップも含めた生産システムを実現した。

2 . REの生産工場

REの生産は、1967年のコスモスポーツ発売開始時の試作時工程と設備での少量生産工場時代、1970年の3,000台/月の規模の工場時代を経て、1973年に広島本社宇品西

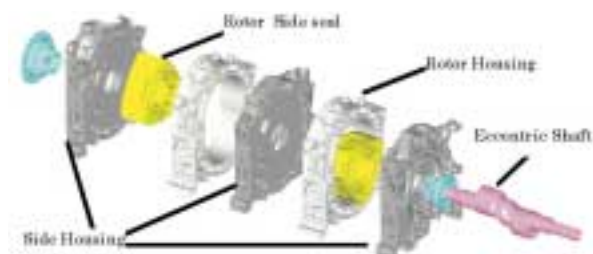


Fig.1 Basic Structure

* 1 ~ 5 パワートレイン技術部
Powertrain Production Engineering Dept.

地区に建設された当時としては最新鋭全自動ラインでの大量生産工場へと移行し、その後のREは、常にこの工場での生産が続いている。生産部品は、ロータ・インターナルギア・ロータハウジング・3種のサイドハウジングの全加工、エキセントリックシャフト・サイドシールの仕上げ加工、及びエンジン組立である (Fig.1)。

RENESISの生産もこの工場の生産ラインを改造して行っている。この工場は(財)日本プラントメンテナンス協会が推進するTPM活動において2001年にトップレベルのTPM特別賞を受賞した、卓越した製造技術力を誇る工場である。加えてMDIで磨き上げたデジタル解析を駆使した生産技術力をベースに、RENESISを量産に結び付けてきた。

3. RENESIS生産の技術課題

RENESISの生産を成功させるためには、2つの技術課題を解決する必要があった。一つはペリフェラル排気からサイド排気という構造変更 (Fig.2) による生産上の課題の克服、もう一つは生産品質をグレードアップしIQS向上を狙った品質の強化である。

4. サイド排気化に伴う構造上の課題

サイド排気の採用により、ロータ側面に関わる機能が大きく変化した。従来のペリフェラル排気ではロータ側面は吸気のみさらされていたが、サイド排気では、吸気・排気両方にさらされる構造になった。この結果いくつかの構造上の課題が発生したが、特に(1)サイドシールの耐カーボン性の向上(2)ロータ側面のデッドボリュウムの低減という新技術開発により課題を解決した。

4.1 サイドシールスティックの抑制

RENESISのサイド排気化により、サイドシールの溝が排出ガスに直接さらされる構造になり、カーボンが溝内に堆積して短時間の運転でサイドシールがスティックする現象が発生した。この課題に対応するため溝及びシールをテーパ化し、シールの挙動を利用してカーボンを掻き出す構造 (ディーゼルエンジンのピストンリングに採用されているキーストンテーパ形状) を採用した。

サイドシールの溝加工は、現形状でも難しい加工であるが、形状変更により切削工具の刃先にかかる抵抗が左右不均等 (Fig.3) となり、溝巾精度のばらつきが大きくなるのがテスト加工により確認された。この結果、圧縮圧力

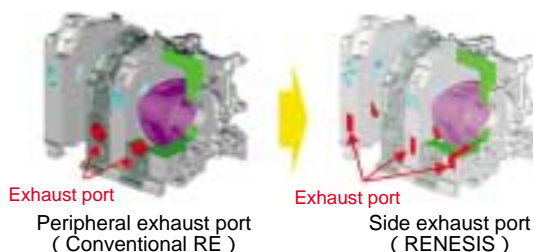


Fig.2 Side Exhaust Port

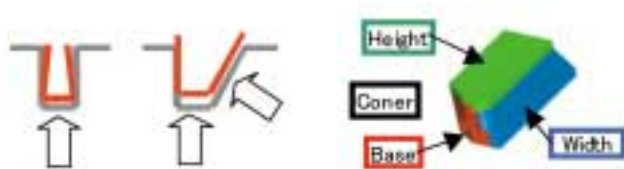


Fig.3 Cutting Force Fig.4 Simulate Tool Rigidity

の低下、ブローパイガス量の増加など、機能要求を満足できる製品精度を保証できないという課題が発生したが(1)刃具剛性の最適化・(2)切削条件の最適化・(3)設備剛性の最適化の3つの方向からアプローチした結果2倍の高精度を実現し機能要求を確保することができた。

(1) 刃具剛性の最適化

刃具剛性の向上を行うに当たり、CAE解析を用いた剛性評価 (Fig.4) を行い、より剛性の高い刃具形状を追求した。製品形状部分を除くツールの中、高さ、コーナR、材質を変化させ、CAE上では初期テストツール比4.7倍の剛性向上を図れるツールを設計できた。製作した実物の刃具においても、予測されるスラスト方向荷重では変形量が測定できないほどの剛性を1回で確保することができた。

(2) 切削条件の最適化

切削条件の最適化には、実験用NC旋盤に衝撃荷重を加味できるテストピースを取付け、実験計画法によるテストを繰返した。計測項目には溝幅精度に加え、切削荷重・衝撃力を取り上げた。その結果、切削力を半減、衝撃力を3分の1に低減する切削条件を見出すことができた。

(3) 設備剛性の最適化

サイドシールの溝加工は、入口及び出口がコーナシール穴 11に制限されるため、ギアトレインの複雑な組み合わせによる、特殊な専用機で行ってきた。しかしこの構造ではギアのバックラッシュ、刃物台のガタ等切削抵抗の偏りに対し脆弱 (前述(2)から求められた切削荷重でのコンプライアンスが要求精度の4倍弱) であり根本的な構造の変更が必要であった。そこでマツダグループの工作機械メーカーであるトーヨーエイテック(株)と協同して、新規加工ユニットを導入した。最低限の駆動部のガタで加工できるよう、前後駆動を全て1軸のNCで制御し、切削軸と同期させる構造とした (Fig.5)。最大の懸案事項は 11穴に刃具を挿入した後約 5mmの短距離で切削速度75m/minにまで上げることの可能な高剛性と低イナーシャを両立できるツールヘッドの設計であったが、FEM解析を活用し最適化し

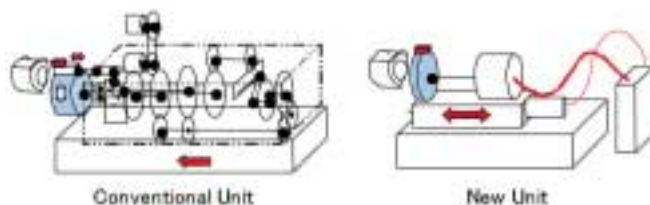


Fig.5 Develop High-rigid Machine

たことが、成功に結びついた最大の要因である。

4.2 ロータ側面のデッドボリュームの低減

従来のREの構造でサイド排気化すると、吸気と排気がロータ側面で混ざり合い、吸気の一部が燃焼されないまま排出されてしまう。それはロータの側面にはエンジン振動の低減のため単体バランス調整用の穴がけられており、これがデッドボリュームとなって出力・排出ガス・燃費性能への大きな弊害となることがわかった。従ってサイド排気構造成立のためにはデッドボリュームなしで低振動を成立させる技術の開発が必要となった。この課題解決のためにアンバランス発生要因を素材・加工・エンジン組立までを通して分析し、寄与度を明確化し、各領域の目標値を設定し、これを確実に達成することで静粛性を損なうことなくバランス調整穴加工を廃止することが可能となった。

(1) 素材バランスの安定化

素材アンバランス=素材寸法精度のばらつきである。その要因として鋳型から製品への寸法転写性が上げられるが、鋳型のキャビティ内への溶湯充填性が悪いと鋳型寸法どおり転写されない。そこでまず溶湯充填性について実態とCAE解析により分析を行った。その結果、今までのロータの頂点から注湯する鋳造法案では、ロータの3頂点部での溶湯到達温度差・溶湯充填タイミング差が大きく鋳型寸法精度をいくら高めても製品寸法にばらつきが発生することがわかった。そのため溶湯充填性が安定し、鋳造条件に口バストな鋳造法案にすべくFig.6に示すような各頂点へ均等に溶湯を充填させるセンタ堰方案に変更した。この法案をベースに湯道破断性、鋳型成型寸法精度の向上、金型のヒートバランスの最適化について、MDIプロジェクトで構築したI-DEAS, MAGMA, Pro-CAST等のCAE解析を実施することにより、金型-鋳型間の寸法転写性を向上させた。

(2) 加工バランスの安定化

加工アンバランスの最も大きな要因は、約4kgの重量を持った素材芯と加工芯のずれであり、このずれを低減することがアンバランスの大きな低減につながる。そこで、素材を位置決めする基準面の見直し、加工基準を作り上げるまでの工程トレランスの見直しを行った上で、素材芯と加工芯のずれ量の管理方式を決定した。また、加工精度を10分の数ミリの管理から100分台の管理にまで向上させるため、中間工程でアンバランス量を常時監視し傾向値管理

することで素材金型と加工基準金の劣化を総合的に管理できるようにした。更に、最終工程では全数完成アンバランス量を保証すると同時に、ロータには後述する方向規制用のアンバランス方向のマーキングを行っている。

(3) エンジン組立でのアンバランスの低減

エンジン組立においても、このアンバランス起因の振動低減に寄与する手法を導入している。REに組み込まれる2つのロータを前述のアンバランス方向のマーキングを確認しアンバランスを打ち消し合う方向に組み込むことで、荷重で40%・振動で6dBの振動を低減している。組付け方向ミスを排除する工夫も、ロータAssy治具を改良して織り込んでいる。

5. 製造品質のグレードアップ

RENESIS生産に当たっては、変更箇所の技術開発だけではなく、全ての品質をグレードアップすべく改善を織り込んでいる。TPM特別賞を受賞した卓越した製造技術力、及び新技術開発の積極的導入を背景に製造品質を上げた。

5.1 流用設備の完全リニューアル化

“自分で使う設備は自分で整備する”というTPM思想に基づき、全設備のメンテナンスを実施し全加工工程の工程能力を確保した。その過程ではもちろん設備をただ復元するだけではなく、改良保全という視点で積極的に内製エンジニアリングを活用している。

5.2 トロコイドフォームの精度向上

REの構造の中で燃焼室の形成に最も影響する部位がロータハウジングのトロコイドフォームである。RENESISの生産を機に、この加工にも精度向上の対策を織り込むべく従来のギアトレイン創生ギヤボックス+テンプレート倣い方式の研削ではなく、CNC方式の研削盤を導入している(Fig.7)。トーヨーエイテック(株)が従来得意としている5軸同時制御のCNCプロフィール研削の技術を基盤にロータハウジングに適合させるため、回転テーブルのイナーシャ低減と高剛性の両立、大容量主軸モータの採用に耐え得る高剛性スピンドルの設計、テーブルの高回転化に伴うトロコイドフォーム専用同期制御方式開発等の課題を克服した結果、従来比2倍の高精度と3倍の高効率を実現した。

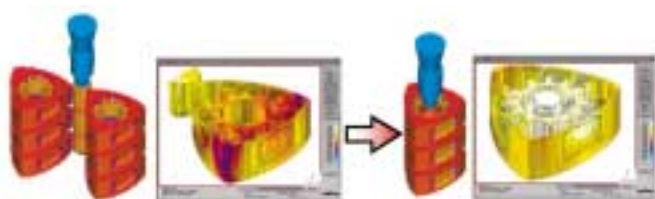


Fig.6 Precise Casting Method

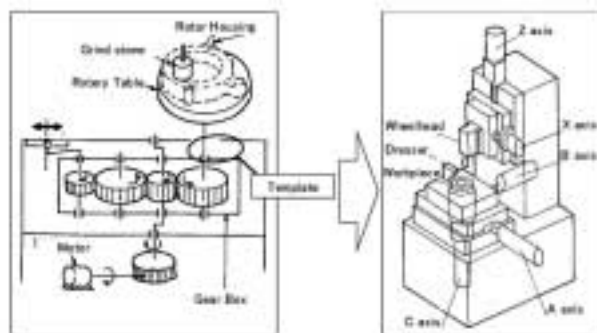


Fig.7 Make Trochoid Form Machine

5.3 アベックスシール溝焼入れの精度向上

ロータリエンジンの構成部品のひとつであるロータのアベックスシール溝には、溝内部のへたりによるシールの折損防止のため、従来よりレーザー熱処理法により局部硬化処理が行われていた。レーザーは、局部熱処理が容易で熱処理変形が小さいという利点があるものの、レーザー照射による加熱処理の前に塗布する熱吸収剤の管理の難しさとコストが高いという欠点があった。そのため、管理が容易で処理コストが安い高周波焼入れの工法を開発した。

高周波焼入れ工法の開発に当たっては、機能要求 (HV200以上) を満足すること、熱処理変形をレーザーで変形よりも極小化すること、熱処理後の加工性を確保するために硬さをコントロールし上限 (HV500) 以下に抑えること、更にはコストをレーザー焼準に比べ50%低減できる革新的な手法を確立することに取り組んだ。考え方としては「コア工程の1工程のみで製品機能を満たすこと、すなわちシングルヒート化の実現」を目指した。

熱処理変形を極小化する手段として、一般的に用いられる円形コイルではなくロータ頂点部の必要箇所のみを熱処理することを目的とした局部コイルを採用した。これにより、磁束分布が狭くなり加熱範囲が極小化され変形をレーザー同等に抑えた。また、上限硬さをコントロールした上でシングルヒートによるコスト低減を実現するため、2段加熱パターンでの熱処理を考案した。第一段階で黒鉛からの炭素の固溶拡散を促進させた後、自己冷却により焼入組織を生成させ、引き続き第二段加熱により焼入組織を焼き戻し処理することにより微細なパーライト組織とし硬さ安定化を図ったものである。狙いの硬さを得るための温度条件 (T1・T2・T3) を決定するため、実験計画によるテストを行い、工程パラメータとして高周波出力電流値、加熱時間及びコイル~ワーク間クリアランスを求め、量産条件を決定した。

以上の取り組みにより、硬度・変形量を狙い値を確保した上で、生産コストをレーザー焼準比50%以下を達成することができた。

5.4 エンジン組立ラインでの機能保証

「生産する我々にとっては、数千・数万台に1台でも、お客様にとっては全部である」、マツダの中ではこの言葉がよく語られる。この言葉の意味を実践するために、NewI4エンジンより品質保証・機能保証を強化してきた。RENEISISの生産もこの思想を受け継ぎ、エンジン組立ラインには、多くの機能保証工程を配している。レシプロエンジンで培った機能保証の技術を、構造の異なるREの生産にも適応すべく対応した。REの機能を保証する上で最重要ポイントは、燃烧室のシール性を保証することである。そして、このポイントがレシプロエンジンと比較して最も異なるポイントである。このため我々は、開発初期から量産工場で作成エンジン組立て、シール性を保証するための生産システムを模索してきた。

その結果から、ショートエンジン状態・組立完成時点・

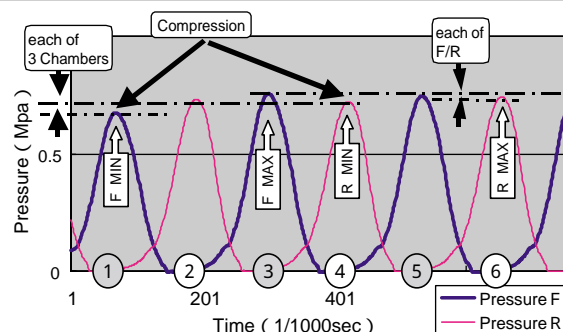


Fig.8 Compression Test

着火テスト終了後の3つの関所を設け、各々で圧縮圧力を確認する工程を設けた。確認する項目は絶対圧・3室差 (3つの燃烧室の圧力差)・FR差 (F室R室の差) で、各々出力・1/3次振動・1次振動の保証を目的としている。Fig.8に示すのは測定結果の例で、絶対圧のみならず、圧力波形についても評価するシステムを織り込んでいる。

圧縮圧力以外にも、燃料系・油系・水系の漏れ、ねじ締め付けのトルク、クランクトルク、アクチュエーターの動作、ハーネス類の導通など、多くの機能保証の工程を設けている。組付けられた部品や状態が万が一異常であった場合も、組付け直後の工程で発見・原因追求され、即座にそれ以降のエンジンに反映される。

6. おわりに

ロータリエンジンは、自動車メーカーの中でマツダだけが持っている固有の技術であり、課題解決への取り組みはマツダグループ独自で行うべき生みの苦しみであった。その過程で幾度も高い壁に直面したが、その都度 開発陣・工場・設備メーカーの協力を得て 現在にいたることができた。この世界に誇れるエンジンの生産に携わる機会を与えられたことは、我々にとっても大きな誇りである。

著者



金徳祐二



増田雅彦



藤崎周二



有見幸夫



椎野和幸