

特集：MAZDA MX-30 Rotary-EV

14 ロータリーエンジンの鋳鉄製ローターのアンバランス改良 Improvement of Imbalance in Cast Iron Rotor for Rotary Engine

坪井 涼介^{*1} 刀祢 英男^{*2} 曾根 雅治^{*3}
 Ryosuke Tsuboi Hideo Tone Masaharu Sone
 小島 仁志^{*4} 山光 一央^{*5} 高垣 真人^{*6}
 Hitoshi Kojima Kazuhiro Yamamitsu Masato Takagaki

要約

e-SKYACTIV R-EVの発電用動力として採用した新型ロータリーエンジン8C型（以下、8C型）は、バッテリーEVのような快適な室内空間の実現を目指して静粛性の向上を図っており、それにはローターのアンバランスが大きく影響する。ローターサイズが従来モデルの約1.3倍に大型化された8C型は、その分素材の出来栄の影響も増大するため、より厳しい目標に挑戦した。鋳型から机上でアンバランスを求める解析ツールを開発し、改善効果を定量的に予測することで目標を達成する確度の高い対策を講じ、そのツールを応用することでタイムリーな金型の維持管理を実現した。これにより既存アセットを有効活用しつつ、鋳造ばらつきの極小化を究めた鋳造工程を確立した。

Abstract

The new 8C type rotary engine (RE) adopted as the power source for the e-Skyactiv R-EV's generator aims to improve quietness to achieve a comfortable interior space like a battery EV, and rotor imbalance has a major impact on this. The 8C type RE, which has a rotor size about 1.3 times larger than the previous model, has a greater impact on the quality of the formed material due to its larger size, so it has taken on more challenging goals. An analysis tool was developed to obtain the imbalance from the sand mold, and by quantitatively predicting the improvement effect, highly reliable measures to achieve the goal were taken, and by applying this tool, timely maintenance management of metallic pattern was achieved. As a result, a casting process that minimizes casting variations while effectively utilizing existing assets has been established.

Key words : Production, Casting, Rotary engine, Dynamic balance

1. はじめに

e-SKYACTIV R-EVは静粛で快適な室内空間を目指し、往復機構や動弁系のないREを発電用動力として採用した。その中でも、自転しながら偏心半径で公転するローター（Fig. 1）にアンバランス（詳細は後述）があると、洗濯物が偏った状態で脱水する洗濯機のように音や振動が生じる。そのため全数計測して調整加工しているが、この調整量をゼロで製造できれば、素形材（素材）に設けられている調整加工の削り代を廃止して、薄肉軽量化することも可能となる。

本稿では、素材製造ばらつきを大幅に改善した内容と、それを維持管理する仕組みを報告する。

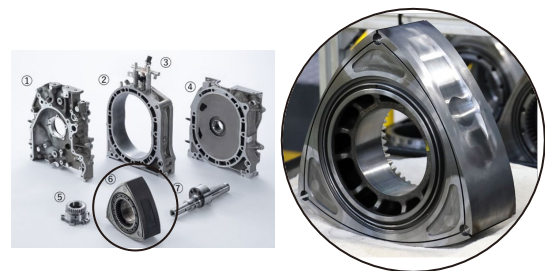


Fig. 1 Rotor of Rotary Engine

2. ロータリーの製造工程

ローターは最小肉厚2mmのダクタイル鋳鉄で、素材の鋳造から、機械加工、めっき、組み立てを自社内で実施している。

*1~3 パワートレイン技術部
Powertrain Production Engineering Dept.

*4~6 第3パワートレイン製造部
Powertrain Production Dept. No.3

鑄造工程では、溶かした金属（溶湯）を砂で作る鑄型の空洞に流し込み、冷却後に凝固した素材部を取り出し、付着した砂等を取り除いて素材を製造する。ローターにはシェルモールド造型法を採用しており、270~300°Cに加熱した金型の空隙部に、樹脂を珪砂にコートした砂を吹き込み、100°C付近で一旦軟化した樹脂が熱硬化することで砂粒同士を結合させて鑄型を作る。これらは数ピースに分割されており、立体パズルのように組み合わせて鑄型を組んで空洞部を形成し、そこに流し込まれた溶湯が冷却されると同時に鑄型は加熱され、樹脂が炭化し崩壊することで凝固した素材を取り出しやすくしている。

ローターの鑄型は Fig. 2 に示すように、外郭面を形成する主型（Master mold）の中に、中空部や燃焼室の凹み形状を形成する中子（No.1~3 Core）を勘合しセットする。主型 1 段あたり素材 2 個分の空洞を設け、それらを 3 段に重ねて湯道（Sprue runner）を貫通させることで一式の鑄型から 6 個の素材が取れる構造としている。

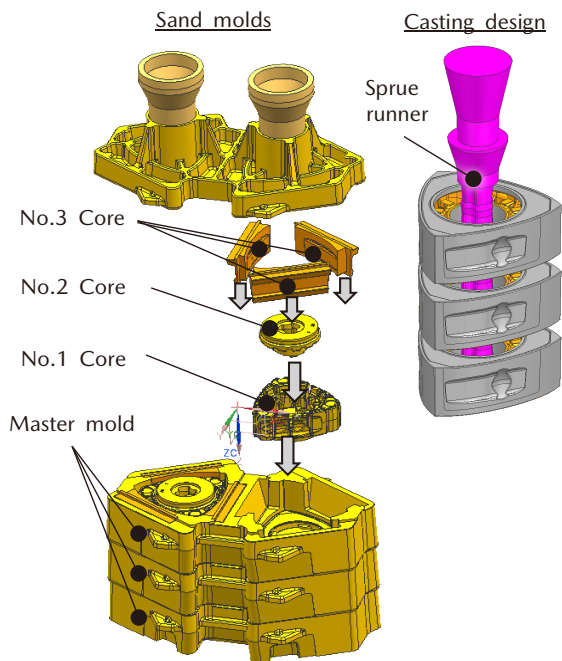


Fig. 2 Sand Molds and Casting Design

3. アンバランスの主要因と現状の対応

アンバランスは、回転する物体の重心と回転軸のずれ量（以下、偏重心距離）に質量を乗じたもので、 $g \cdot mm$ という単位で表わされる。アンバランスがあると、それに角速度の二乗を乗じた遠心力が発生し、異音や振動の原因となる。ローターは設計モデル上、丸みを帯びた正三角形であり、ある点の質量は 120°ごとに回転させた位置の 2 点と釣り合い偏重心距離を 0 としているが、実際は製造ばらつきで完全には釣り合わない。その要因は、形状が設計モデルと異なる場合と、同じでも重量が他の

2 点と異なる場合、つまり寸法と密度のばらつきである。

ローターは Fig. 3 に示すとおり外郭面に全て機械加工が入る一方、全体の表面積の半分近くは鑄肌面で、その大部分は No.1, 2 中子を転写して形成する中空部が占める。また、機械加工工程では、コンベックスメジャーを使う際、押し付けた先端を基準（0mm）として長さを測るように、素材の基準面を治具や定盤に押し付け、ここを基準とした寸法で加工するが、8C 型ローターは基準面全 7 か所（軸方向 3 か所、周方向 1 か所、径方向 3 か所）を、全て No.1 中子を転写して形成する面に持たせている（Fig. 4）。そのため、No.1 中子の出来栄が鑄肌・加工面どちらにも影響し、ローター全体の寸法ばらつきの主要因となる。

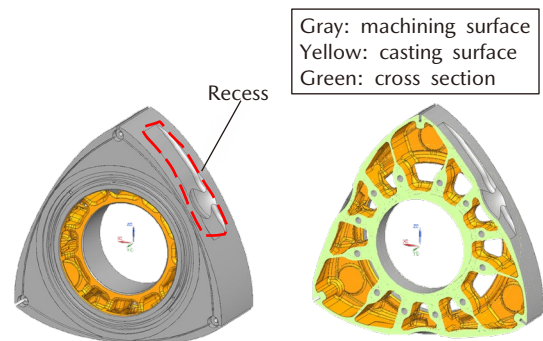


Fig. 3 Casting Surface and Machining Surface

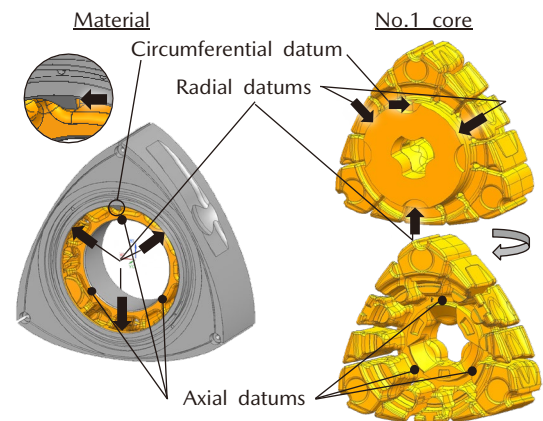


Fig. 4 Machining Datums for Rotors

球状黒鉛を晶出したダクタイル鑄鉄の密度は、黒鉛面積率や基地組成等の金属組織と、凝固収縮率等の欠陥により定まる。それらは溶湯の冷え方に大きく影響されるため、120°ごとの位置の冷却速度ばらつきが密度ばらつきの主要因となる。

これらから生じるアンバランスへの対応として、機械加工工程では、加工後にインターナルギアを組み付け、軸中心に回転させて重心の位置と質量を計測し、ギア・反ギア面両方のアンバランス量と角度を全数算出している。規格を満足しない場合は、Fig. 5 に示す各頂点の調

調整範囲を加工で除去し、重心の偏りを打ち消すことでアンバランスを調整する。調整量は除去する質量と、その偏重心距離の乗算で表されるが、加工範囲がシール溝で規制されるため偏重心距離は一意に定まる。そこで除去する質量をコントロールするが、密度と加工範囲が決まっているため、これは加工深さで調節する。その後再計測し、規格内であることを確認して次の工程に送る。

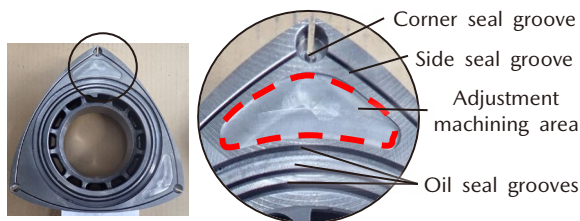


Fig. 5 Adjustment Machining Area (8C Type)

調整加工でバランス規格を満足できないワークは不良品として再溶解してその情報を素材工程にフィードバックし、金型摩耗等の経時変化によりアンバランス量や角度が変わると、Fig. 6 に示す No.1 中子金型のバランス調整座を都度、補整して調整範囲内に収め続けている。



Fig. 6 Adjustment Seat of Metallic Pattern (13B Type)

4. 目標設定

従来モデルの 13B 型エンジン⁽¹⁾ は 1973 年から生産を始め、新車への搭載は RX-8 (2012 年量産終了) が最後だが、リペアパーツやリペアエンジン供給のため、現在も毎月数百台単位で製造している。鋳造工程では生産設備の維持管理に努めているものの、金型の機構や鋳造方案が旧式であることや、設備・要具の劣化は否めない。そのローターはバランス調整加工で除去する質量が最大 24.8g/箇所、偏重心距離は 77.5mm のため、最大 1920g・mm/箇所まで調整できるが、規格を上回るワークが 1 割程度発生している。

8C 型エンジンは、燃費改善として冷却損失改善をねらったロングストローク化により偏芯量がアップ (15.0 → 17.5mm) したため、ローターの径方向サイズが 13%、質量も 26% 増加しており、素材が同精度の場合、調整前アンバランス量は 43% 増加する。一方、調整量もサイズアップにより偏重心距離が 14%、調整加工範囲が 6% 拡大できるため、あと 18% 深く加工することで

増加分をリカバーできる。しかし、それは加工サイクル延長や精度低下を誘発し、削り代としての素材肉厚の確保により重量が増加し燃費等の悪化を招く。そこで 8C 型では肉厚を 13B 型と同一の設定とすることで最大調整量を 21% アップの 2393g・mm にとどめ、不足分は素材ばらつき低減で補うこととした。それに加え、素材アンバランス量をより厳しく管理することで、調整加工サイクルタイムの短縮や調整後の回転バランス精度向上が可能のため、更に 30% 削減した 1675g・mm に対し Cpk1.33 を満足することを本活動の目標に定めた。

5. アンバランス予測技術の確立

5.1 既存解析の適用

要因の効果を机上で迅速かつ正確に把握するため、レシプロエンジンのクランクシャフト用に開発された既存のアンバランス解析ツールをローターへ適用した。これは素材の実物を 3D スキャンしてモデルを作成し、次に加工工程と同様、基準面を起点にした寸法でモデルを削り、最後にアンバランス測定を CAE (Hyperworks) 上で再現することで加工後のアンバランス量を算出するものである。

前述したようにローターでは No.1 中子の寸法精度がアンバランス量へ大きな影響を与える。また、3 章で述べたように調整量過多の対策として金型補整するが、その結果は機械加工の後に判明するため、確認に時間を要する。そこで、中子を 3D スキャン、モデル化し、素材設計モデルの中空部と置き換えてアンバランスを予測できると、量産移行後も No.1 中子の出来栄検査に活用することで、鋳造・加工・バランス計測せずともアンバランス量の把握が可能で、タイムリーな金型補整が可能になると考えた (Fig. 7)。

5.2 高精度化の取り組み

既存の解析では 3D スキャンした素材モデルをそのままアンバランス解析したが、ローターでは 3D スキャンした中子を素材中空部に精度良く置き換える必要がある。鋳型は注湯の際に熱膨張するが、素材は凝固収縮により常温の鋳型より小さくなるため、一般的な鋳鉄では、一定の倍率を乗じて中子を設計する。そのため、3D スキャンした中子モデルをその倍率で除することで素材中空部を再現できるが、実際の収縮量は素材・鋳型の形状や金属の種類、溶湯圧等に影響される⁽²⁾ ため、実測することでより高い精度でモデルを変換できると考えた。

そこで、中子を 3D スキャンし、それをを用いて鋳造した素材の中空部を CT スキャンした。それらから作成した 2 つのモデルに対し、同一点と原点の距離について、中子と素材の寸法関係を求めた (Fig. 8)。この結果、中空部は 1.000662 で中子寸法を除すると精度良く再現でき、この近似式ベースの倍率を採用することで高精度化

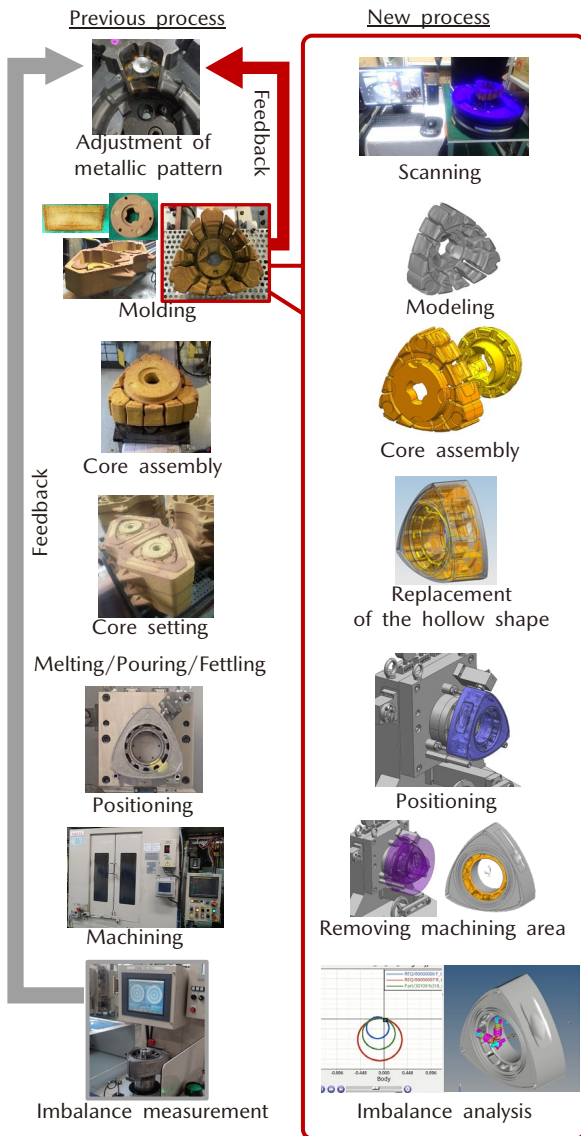


Fig. 7 Imbalance Analysis

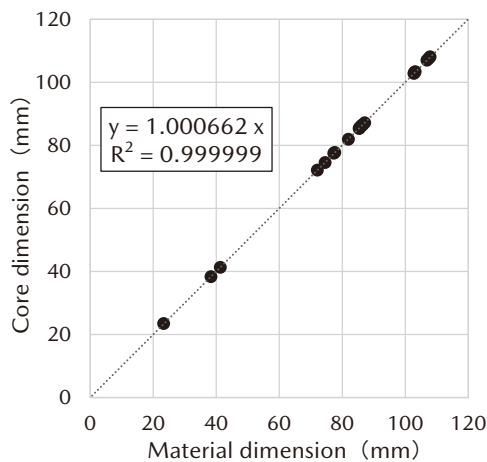


Fig. 8 Relationship between Core Dimensions and Material Dimensions

に寄与できると考えた。そして解析の結果は、アンバランス量 84~93%, 角度方向 98.5~99%の精度があり, 予実差が極小化され一致した (Table 1)。

Table 1 Expected Difference of Imbalance

		Predicted value	Measured value	Concordance rate (%)
imbalance (g・mm)	Gear-side	843	999	84
	Opposite gear-side	1643	1769	93
Angle (°)	Gear-side	214	210	98
	Opposite gear-side	191	196	97

6. ばらつき対策の検討と実施

6.1 対策の検討

3章で述べたように No.1 中子の出来栄がアンバランスの主要因であるため, 造型から機械加工まで, 中子と, その転写した素材面の形状を正確にキープし続けられればバランスの良いローターが製造できる。つまり①No.1 中子を精密に造型し, ②No.2 中子と精度良く接着し, ③溶湯が注がれても変形せず形状を転写し, ④基準面を正確に起点として加工することである。そこで5章で開発したシミュレーションを活用して①~④の寸法ずれがアンバランス量へ与える影響を算出し, Cpk1.33 が成立する対策とその寸法管理値を個別に設定した (Table 2)。これらに対して取り組んだ内容を以下で紹介する。

Table 2 Measures against Imbalance

Measure	Imbalance (g・mm) per mm	Control value (±mm)	Predicted maximum imbalance (g・mm)
(1) Reduce pattern shift	897	0.20	179
① (2) Maintenance metallic pattern	741	0.20	148
② Improved core assembly precision	2190	0.30	657
③ Control the core deforming	1793	0.20	359
④ Reduction of machining standard deviation	7869	0.10	787
	Avg.		179
	σ		365
	Target level		1675
	Cpk (against target)		1.36

6.2 対策① No.1 中子の造型精度

(1) 金型機構の進化による型合わせ精度向上

No.1 中子型は上下の金型と, 3つの側面の凹み部を形成する金型の計5つを合わせて空隙を形成する。8C型ローターではこれらの合わせ精度の向上を図った。

従来モデルの13B型ローターはNo.1中子金型を4セット, 円形に備えており順繰りに回転させて造型し, ピンとブッシュで位置決めしていた。しかし, 型合わ

せ前の位相精度に限界があり、それらが摩擦しやすい。また、回転式のため金型上に駆動源を搭載できず、側面型はリンク機構を用いて外力で抜き方向に動かした後には花びらが開くように倒して開閉していた。そのため0.4mmのクリアランスをもたせており、凹み形状の位置合わせ精度も±0.2mmのばらつきをもっていた。8C型ローターでは側面型も大型化しており、同様の機構を用いると開閉の際に中子と干渉する。その上、加熱機構を側面型内に設けられないため、13B型では上下型からの熱伝達でヒートアップさせていたが、大型化され熱容量の増えた8C型では必要な断面積が確保できず十分に加熱されない。そこでNo.1中子型には、回転機構を排したシンプルな造型機を導入し、エアシリンダーにより側面型を押し当てて位置決めするスライド方式とすることでゼロクリアランス化を実現し、精度を向上させるとともに加熱機構も内蔵した (Fig. 9)。上下型は、位置決めピンとプッシュの摩耗量0.1mmをそれぞれ交換基準とし、型ずれを±0.2mmで管理することとした。

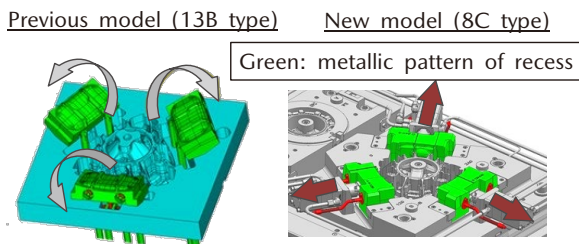


Fig. 9 Metallic Pattern Structure of No.1 Core

(2) 金型寸法精度維持管理

鑄砂の吹き込みや型合わせで摩耗が進む金型の寸法精度維持のため、従来は安価な鑄物のFC250材だった金型材質を変更した。表面硬度が高くより耐摩耗性が良い熱間工具鋼の中でも被削性がよく、切削で仕上げ加工でき、トータルコストに優れるSKD61材を選定し40%の耐摩耗性向上を実現した。

また、金型を定期的に3Dスキャンし、摩耗量0.2mm以内で整備することとした。更に、アンバランス量そのものも、製造ロットごとに中子を3DスキャンしCAEで予測することで管理と定点観測することとした。このように金型構造の精度向上と、CAEを活用した金型維持管理をすることで、No.1中子の出来栄をタイムリーに、そしてこと細かに維持管理できるシステムを構築した。

6.3 対策② No.1, 2 接着中子厚さ／主型へのセット精度

No.1, 2中子は接着剤を塗布し圧力をかけて接着する。上下の金型の合わせ不足や圧力不足があると厚くなるた

め、13B型では接着圧力を管理していた。一方、解析により厚さばらつきがアンバランスに影響を与えることが明らかになったため、8C型では高さ寸法そのものを管理することとし、接着装置に設置したレーザー変位計で全数検査し、±0.3mmで管理することとした (Fig. 10)。

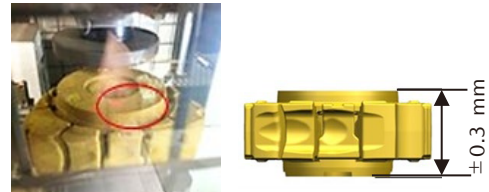


Fig. 10 Measuring Assembly Dimension for No.1, 2 Core

主型と中子のクリアランスは0.2mmに設定しているが、人の手で作業するため、セットの際に鑄型同士が接触し破損する懸念があった。作業者の習熟度に依存せず正確に作業できるように、防止策としてFig. 11に示す樹脂製のガイド治具を製作し、鑄型同士の干渉を防止した。

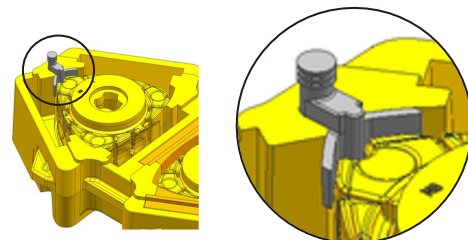


Fig. 11 Core Setting Jig

6.4 対策③注湯時の中子変形

注湯すると、中子は溶湯からの熱で膨張しつつ浮力が働き、凝固過程では素材の収縮にさらされて変形する。13B型ローターはNo.1, 2中子の合わせが平面で、接着剤の接着剤だけで変形に抗うため剛性が低く、素材CTスキャンの結果からも変形が認められていた。対策として8C型では噛み合わせ構造として剛性を向上させた (Fig. 12)。

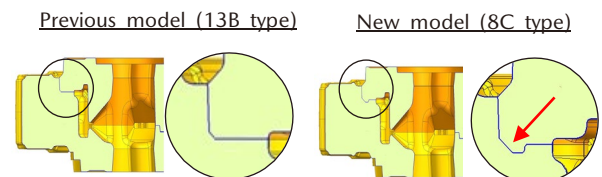


Fig. 12 Improvement of Assembly Structure

6.5 対策④加工の基準ずれ

加工面の径方向寸法は、加工基準3点を固定して中心軸を算出し、それを基準としている。固定治具に鑄バリ

等の異物を噛み込み基準がずれた状態で加工すると、外郭の加工面と中空部の鑄肌面の相対的な寸法、つまり肉厚がばらつき、アンバランスが生じる。13B型では径方向の加工基準近傍に鑄型の位置決め形状が存在し、Fig. 13のように固定治具の周り止め形状と垂直に鑄バリが出ていた（鑄バリサイズは4倍以上に拡大して表現）。そこでバリ残り基準を定め、治具に逃がし形状を設けることで対応していたが、抜本対策として位置決め形状を改良して治具に水平な鑄バリに変え、根本的な対策とした。

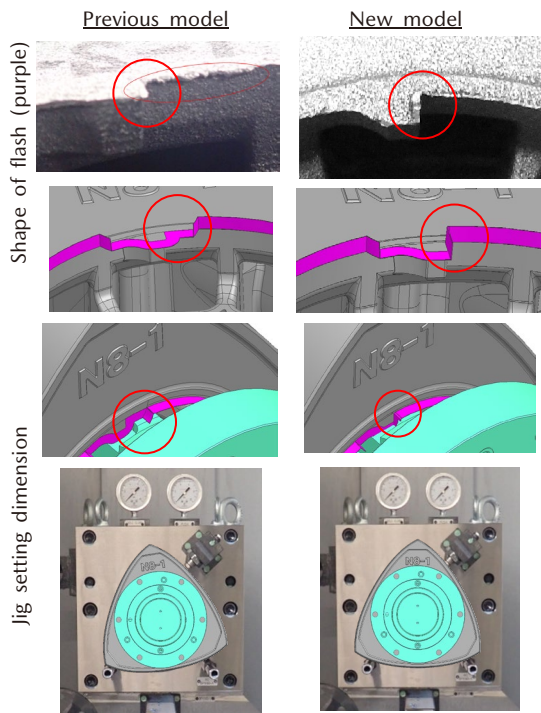


Fig. 13 Improvement of Flash Shape

また、機械加工時の基準ずれの管理値として±0.1mmを採用してずれ量を全数測定し、満足するワークのみ次の工程に送ることとした。

6.6 追加対策

(1) 冷却速度ばらつき

ローターは代々、量産性に優れた頂点ゲート方案を採用していたが、RX-8に搭載された13B型 RENESIS ローターでは、120°ごとの冷却速度が均一で密度ばらつきを抑制したセンターゲート方案（Fig. 14）を開発した。これにより密度ばらつきは極小化されたが、8C型ローターではこの方案を踏襲しつつ更に厳しい充填温度ばらつき基準±10°Cに挑戦した。CAEで凝固解析し、湯道径や堰断面等の因子をチューニングし、基準を満足する鑄造方案を作りあげた。

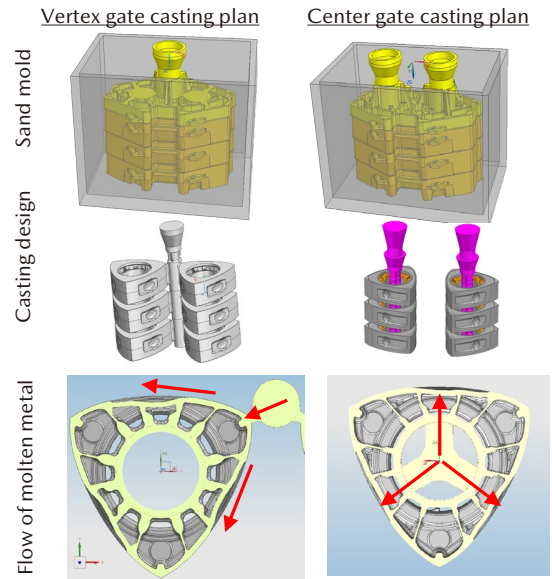


Fig. 14 Improvement of Casting Design

(2) パイロット生産での異常値

これらの対策を織り込み、36個のパイロット生産を行った結果、アンバランス量 2416, 2186, 1532g・mmと、目標値を超過した異常値が3個発生した。現物を観取りしたところ、メタル挿入穴近傍に偏肉が認められ、寸法測定の結果、Fig. 15のようにNo.2中子に対し最大1.0mm傾いたことが判明した。そこでこの状態を模擬してアンバランス解析した結果、実測値と一致したため、これを原因と特定した。工程内で中子の傾きの原因を調査したところ、組んだ鑄型を搬送する際の振動や衝撃で主型が浮き、ずれた中子に浮いた鑄型が載ったときに同現象が発生することを突き止め、その対策として主型同士を接着することとした。より万全に対策するため、再度各工程を手順ごとにチェックし、漏れないことを確認したうえで量産を迎えた。

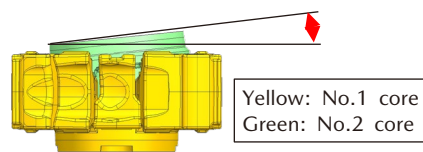


Fig. 15 Conceptual Diagram of Core Inclination

7. 効果確認

量産を開始し651台の加工完了時点のアンバランス量の計測値をTable 3に示す。自主管理値 1675g・mmに対してCpk1.43を確保しており、図面規格に対してCpk2.32とばらつきを極小化した鑄造工程を実現できた。

Table 3 Result of Mass Production

	Imbalance (g・mm)	Cpk	
		Gear-side	Opposite gear-side
Target level	1675	1.80	1.43
Standard level	2393	2.84	2.32

8. 終わりに

8C型ローター素材ばらつきの極小化を究め、素材工程で管理が難しかったアンバランスにおいて、鋳造する前に予測する技術を作り上げ、それを活用することで新たな対策やタイムリーで確度の高い管理の実現につながった。このようなモデルベースと実生産の融合は特に鋳造工程で有効であり、次世代部品の量産準備に向け、今後も新しい目つきで挑戦する。

参考文献

- (1) 神原ほか：ロータリーエンジンの構造と歴史，[マツダ技報, No. 21, pp.3-10 \(2003\)](#)
- (2) 八島ほか：シェルモールド法による鋳物の寸法誤差，[鋳物, 第56巻, 第9号, pp.47-50 \(1984\)](#)

■著者■



坪井 涼介



刀裨 英男



曾根 雅治



小島 仁志



山光 一央



高垣 真人