

特集：DX/AI の活用

05

少量鋳造部品への砂 Additive Manufacturing (AM) 適用 Application of Sand Additive Manufacturing (AM) for Low-Volume Cast Parts

西 昇一^{*1} 國松 大知^{*2} 河野 一郎^{*3}
Shoichi Nishi Daichi Kunimatsu Ichiro Kouno
大島 久和^{*4} 坪井 涼介^{*5} 小島 仁志^{*6}
Hisakazu Oshima Ryosuke Tsuboi Hitoshi Kojima

要 約

マツダは創業以来、数多くの新しいクルマを市場にお届けしてきた。一方で旧型車のサービスパーツ生産も続けている。旧型車には生産終了から30年以上経過しても、マツダブランドに共感され、乗り続けられているファンの方々のために、大量生産する自動車メーカーとして旧型車のサービスパーツ供給を継続していくには多くの課題があった。そこで今回長年続けてきた従来の砂型鋳造プロセスから、新たに少量生産にも適した砂型鋳造プロセス Additive Manufacturing (AM) を開発し一部の部品の生産を開始した。現在はサービスパーツ生産だけでなく、お客様が乗り続けられる限りブランド価値追求とビジネス効率を両立させ続けられるプロセスを創造する取り組みを始めている。今回は新しい砂型鋳造プロセスの開発経過を報告する。

Abstract

Since its founding, Mazda has delivered many new cars to the market. At the same time, it has continued to produce parts for older models (hereafter referred to as service parts). Many older models, even more than 30 years after production has ended, continue to be driven by customers who resonate with the Mazda brand. For these loyal fans, Mazda, as an automobile manufacturer, continues to supply service parts. However, producing small quantities of parts for older models presents many challenges for the manufacturer. Therefore, Mazda has developed a new sand casting process suitable for small-scale production, replacing the traditional sand casting process that has been used for many years, and has begun producing some parts using this new process - Additive Manufacturing (AM). Currently, Mazda is not only focusing on the production of service parts but also working on creating processes that balance brand value pursuit and business efficiency, as long as customers continue to drive their vehicles. This report details the development process of the new sand casting method.

Key words : Production, Casting, Additive Manufacturing

1. はじめに

クルマ造りのライフサイクルは生産開始から約5年で量産を終了し、それ以降は旧型と位置づけサービスパーツ生産数量が減少する。各自動車メーカーで定められた部品供給期間を経過後でも、生産可否判断を行って超旧型部品としてサービスパーツ生産を継続している (Fig. 1)。

このような少量生産はモノ造りをしている企業に共通すると考える。マツダにおいても SKYACTIV 技術搭載車に代表される量産部品からロータリーエンジンに代表さ

れる超旧型のサービスパーツにいたるまで、多品種の製造に対応しなければならない。その結果、旧型 (量産終了後9年間) と超旧型 (量産終了後25年間) を合わせた部品種類数は量産部品を超えるまで増加している (Fig. 2)。またマツダ内で生産している部品には生産数が120個/年以下の部品も多数ある。その大半はロータリー車の鋳鉄エンジン部品とフェンダー等のプレス部品である (Fig. 3)。

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

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

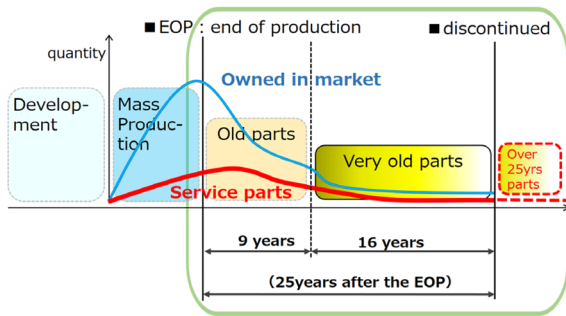


Fig. 1 Production Life of Automotive Parts

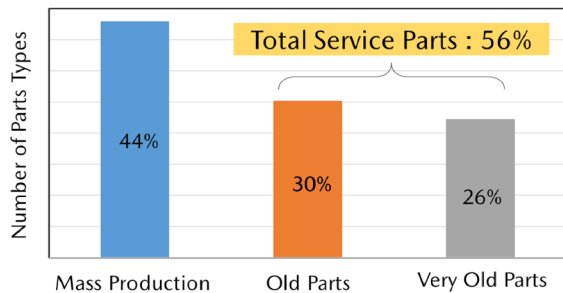


Fig. 2 Proportion of Service Parts (Aug.2022)

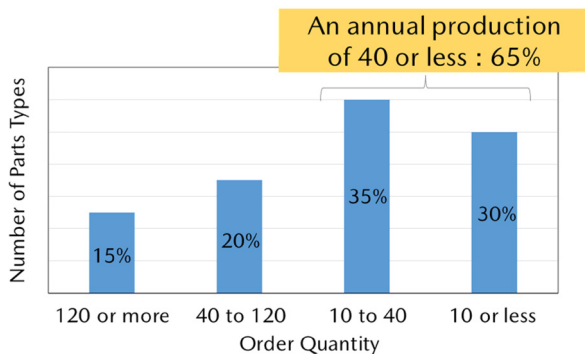


Fig. 3 Over 25 Years Parts (in House)

更に、市場ニーズの急激な変化とともに、エンジン・トランスミッション部品に加えて、電駆部品、そしてサービスパーツへの対応など設計・製造はますます複雑化してきている。

その中で金型や設備の復元が困難となり生産を断念しなければならない事案が過去に発生している。お客さまにとってはいずれも大切な部品であり、製造できないのはマツダの責任であり、企業理念のパーパスとして「前向きに今日を生きる人の輪を広げる」ことを掲げるメーカーとして、なんとしてもその期待に応えなければならないと考えている。

本稿ではこのような環境変化の中でも、マツダファン の期待に応え続けられる少量鋳造部品に適した新しい砂型鋳造プロセスを開発した。その経緯を報告する。

2. サービスパーツ生産の工程と課題

サービスパーツ生産の流れを Fig. 4 に示す。生産するためには金型と設備が必要となるが、常時は使用されな

いため、生産前にメンテナンスが必要となる。金型のメンテナンスでは、機能を確認するためのオーバーホール作業として、分解/清掃/注油/錆び取りを行うが、経年劣化などで機能低下した金型部品については復元補修が必要となるケースもある。

マツダでは 1996 年にマツダ・デジタル・イノベーション (MDI) を開始し、以降は 3 次元デジタルデータでの型づくりを始めた。MDI 以降の金型が劣化した時は新製時の 3D データどおりに復元できる。しかし MDI 以前のサービスパーツは 2 次元図面でのモノ造りであり、復元は熟練技術者が手作業で肉盛溶接し仕上げる。経験に頼った現物合わせの補修方法である。今は当時を知る熟練作業者はほとんど居なくなりノウハウ伝承ができず、何度も復元作業が繰り返されている。その結果金型のメンテナンスに莫大な工数を要している。

また補修内容も多岐にわたるが、サービスパーツは大量生産を前提に金型や設備も設計されているため、少量生産ではライン全体の効率を悪化させる。またサービスパーツとなると金型をつくり変えるような大改善は投資面からできないのが現状である。これらの背景から生産リスクを考え不要の在庫を抱えざるを得ず、保管や管理業務も発生している。

金型は生産頻度の多寡にかかわらず保管には所定の面積が必要になるため保管場所の確保も大きな課題となっており、新型部品の導入に伴うサービスパーツ用金型の移動や管理などの付随業務も増加している。

同様にサービスパーツを生産するために旧型設備を保有するケースも多く、そういった設備の稼働率は著しく低い。稼働前には金型と同じく多くのメンテナンスを要している。場合によっては、少量のサービスパーツ生産を試作専門業者様に委託せざるを得ない状況も多く発生している。

このように少量出荷生産ではさまざまな要因が重なり生産性が著しく悪化しており、ビジネスとして成立しておらず、今後も生産を継続するためにはこの点の改善が必須と考える。

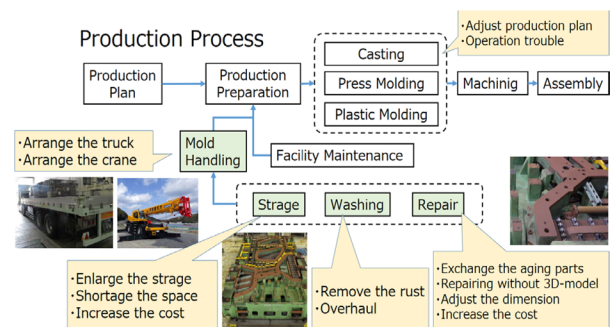


Fig. 4 Concerns on Old Parts Production

3. 解決のための技術開発

3.1 解決技術の検討

前章で述べたとおり、サービスパーツの金型・設備を今後も維持管理し続けるのは困難でコストもかかる。その対応として金型などの要具を用いず、直接素材を製造する方法として3Dプリンターを活用した製造方法（以前はRapid Prototype (RP) と呼ばれた製法。現在はAdditive Manufacturing (AM)）がある。このAMにより部品生産ができれば多くの金型の共通課題である補修や保管は不要となり、付随する多くの管理業務も削減できる。

しかしながらAMで製造部品を直接作ることが理想ではあるが、製造プロセスを大きく変更することになり、新車開発と同等の耐久試験等の評価が必要となるため、現実的と言えない。そこで製品設計に影響しない鋳型への適用が現時点では最適と考えた。

鋳造プロセスで用いられる鋳型にはFig. 5に示すように砂型と金型がある。ダイカスト等で用いられる金型へのAM適用は鋳造品質の確認に期間を要すると判断し、まず砂型へAM適用しその次に取り組むこととした。更に最終目標をダイレクトに鋳造部品をつくることとし、砂型へのAM適用を全領域のAM技術開発の出発点とした。

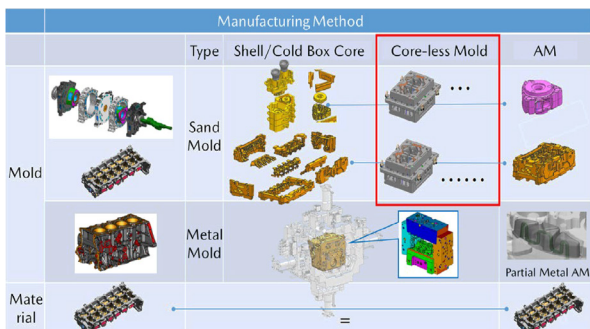


Fig. 5 Material Less Approach

砂型のAMプロセスは最初に砂型の3Dモデルを設計し、次にスライスしたモデルの断面を固めながら繰り返し積み重ねることで立体的に造型する。この方式を以下、砂AMと呼ぶ。

設計した3Dデータは保管され、必要に応じてデータを呼び出して砂型をプリントアウトすることで生産を維持できる。従って、砂型造型用の金型は不要、つまり型レス化が可能となる。

更に、鋳造案の設計抜け勾配やアンダーカットの金型制約もなくなり、設計の自由度が向上し鋳造品質を向上させる設計が可能になると考えた。これにより、最新のプロセスへ対応できる鋳型を、金型制約に捉われずに製作することが可能になる。このように従来の金型を単純にAMで置き換えるだけでなく、製造プロセスの悪さを改善するツールとしてAMを使いこなすことで、新たな付加価値を加え損益分岐点を下げ、導入効果を最大化

できると考えた。これは今後の新しい量産部品の製造プロセス革新につながると考える。

3.2 砂AM技術確立の考え方

砂型の製造法も多様で、①常温硬化するフラン鋳型は試作、②加熱硬化するシェル鋳型は鋳鉄、③ガスで硬化するコールドボックス鋳型はアルミというように材質に応じて最適な方法を採用している。そのため少量生産の際にも多くの中子造型種類の専用設備を保有しなければならない。

それぞれの製造法に特徴があり、鋳造プロセスとも密接に関連し選択されてきたが、今後多くの部品へのサービスパーツ生産の対応を考慮すると、ビジネス視点からも生産に関する変動要素を減らし固定要素を増やしコストを下げるという考えで、砂AMの製造法は統一すべきと考えた。

4. 砂AM鋳型の適用検討

4.1 対象部品の選定

3.2節で述べたとおり、量産部品製造では3種類ある砂型製造プロセスを、砂AMでは1種類に集約することで導入メリットを最大化できる。部品選定については部品固有の生産課題の解決を考慮し、鋳鉄とアルミからそれぞれ選定することにした。

(1) 鋳鉄ローターの要求特性

鋳鉄部品の中から、ローター (Fig. 6) に着目した。ローターはロータリーエンジンにおいて、エンジンの中心部で回転し動力を生み出す重要な部品⁽¹⁾であり、現在でもコンスタントにサービスパーツとして生産を継続している。

ローターは回転体のため、重心と回転軸のずれ量に質量を乗じたアンバランス評価が重要である。アンバランスがあると角速度を二乗した遠心力が発生し、異音や振動の原因となる。その大きな要因が中子型である。中子型はアンバランス量0で設計されているが、金型や設備が劣化すると肉厚バランスが崩れ、アンバランスが発生してしまう。これを防ぐため調整座を設け、アンバランス量を規格に収まるようワークに追加工や金型調整を行うが、機械加工後に組立し実際に回転させないと計測・フィードバックができないためタイムリーな調整には長いリードタイムを要する⁽²⁾。

また新車時の2ローターの場合、ローター同士のバランスも重要で、重量をランク分けし、ランクの近いローターを選別して組み合わせ生産していたが、サービスパーツでは一方の重量ランクが分からないため中央のランク品を払い出すしかできず、結果として量産より厳しい規格幅で管理している。

このため、サービスパーツのローターはマツダ鋳鉄部品の中で最も緻密な金型の維持管理が要求され、多大な工数をかけて対応しているのが実情である。これを砂AMにより精密に造型することで維持管理は不要になり、

持続的にお客様に新品同等のローターをお届けできると考え、まずは効果を事前確認した。

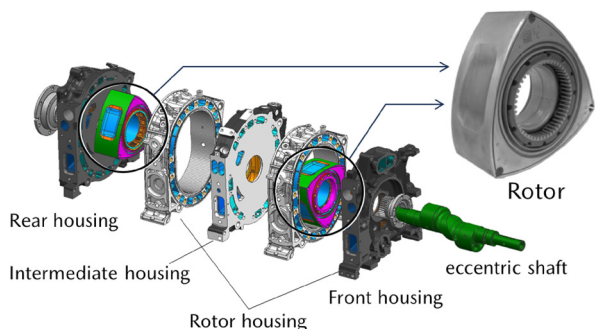


Fig. 6 Rotor Built into a Rotary Engine

(2) アルミ シリンダーヘッドへの適用の考え方

マツダではシリンダーヘッド製造は独自の工法である Advanced Precision Mazda Casting process (APMC) で製造しているが、複雑な形状を全て砂型で形成するため多くの砂型（以後「中子」）を組み合わせている。常温鋳型に 0.9 分サイクルで鋳造できる非常に生産性が高いプロセスだが、一方で多くの砂型が必要になり、代表的なものでは、12 個の中子を 7 型で製造している。このプロセスでは型の 3D データがあるので復元の際にはローターのような再現性の問題はないが、車種の多さに比例して型数が 300 型以上となり、将来サービスパーツへ移行していくと型数の多さが大きな稼働ロスを生じさせるリスクがある。いかに型数を減らすかが課題である。

以上ローターと、更に形状が複雑なシリンダーヘッド 2 部品を従来の金型構造を生かしつつ AM の特徴を生かして砂 AM で設計ができれば、マツダ社内の鋳鉄、アルミ用砂型は全て砂 AM 化できると考えた。以下、社外製作した AM 鋳型を使った、鋳鉄ローターでの味効き評価結果を紹介する。

4.2 ローターの製造

(1) 鋳型構造

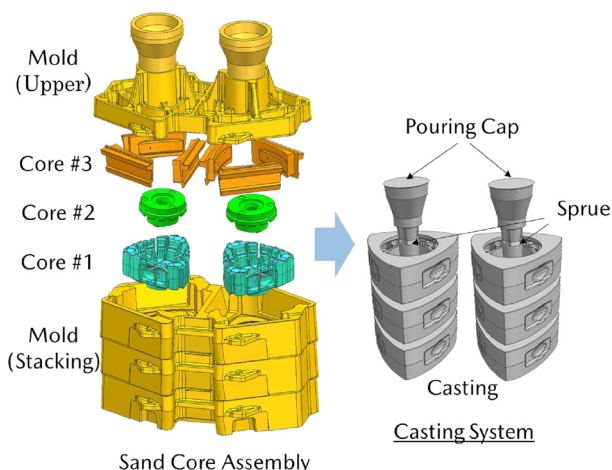


Fig. 7 Sand Mold and Casting System

ローターの鋳型は Fig. 7 に示すように、外郭面を形成する主型 (Mold) の中に、中空部や燃焼室の凹み形状を形成する中子 (Core#1~3) を勘合し組み立てる。主型 1 段あたり素材 2 個分を設け、それらを 3 段に重ねて湯道 (Sprue runner) を貫通させることで 1 式の鋳型から素材を 6 個取りできる構造としている。

(2) ローター製造の課題

まず先述のアンバランスの調整内容について詳細に説明する。新車時は個々の重量を規格管理し、エンジン組み立て後各ローターでバランス調整しエンジンとして完成させている。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. 8 に示す各頂点の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、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へ搬送する。この時調整加工でバランス規格を満足できない不良品は再溶解する。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. 9 に示すバランス調整座を都度、補正して調整範囲内に収める。

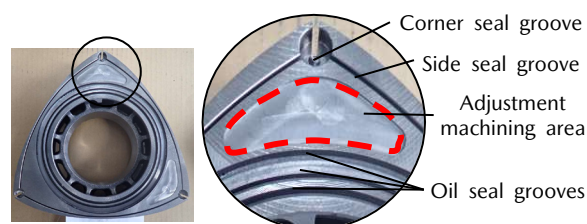


Fig. 8 Adjustment Machining Area (8C-Type)

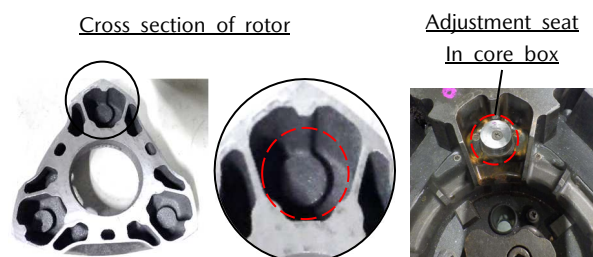


Fig. 9 Adjustment Seat in the Core Box (13B-Type)

回転バランスに大きく影響するのは素材面の残る Core # 1 & # 2 で成型される部分になるため、重量規格を満足するためには両者の位置ズレの低減が重要で、この調整作業を廃止することが本生産の最大の課題である。

4.3 味効き評価と結果

(1) 評価方法

一体化の精度向上と铸造品質の味効き評価を進めた。砂 AM の効果を最大化するため、铸铁の量产工程に適用されているシェルモールド法では金型制約で二分割になっていた中子を Fig. 10 に示すように一体で設計し、組立による寸法ばらつきと合わせ面に生じるバリレス化を目指した。

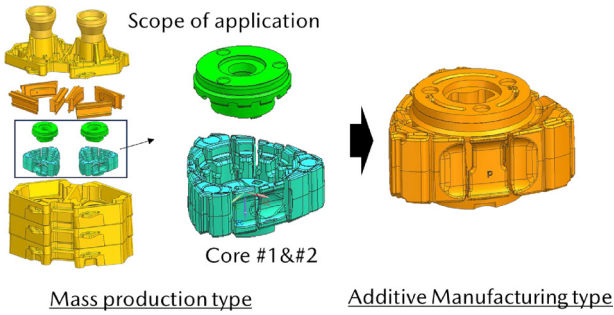


Fig. 10 3D Printer Core Structure

砂 AM 造型装置は造型速度の高いバインダージェット方式⁽³⁾を選択した。この方式は、あらかじめ硬化触媒と混練した砂を敷き詰め、粘結剤（バインダー）を、紙のインクジェットプリンターのようにプリントヘッドから滴下、プリントすることでモデルの断面を1層固め、これを繰り返し積み重ねることで造型する（Fig. 11）。造型後は砂型が硬化触媒と砂の混練物に埋もれた状態になるため、これを取り出す。

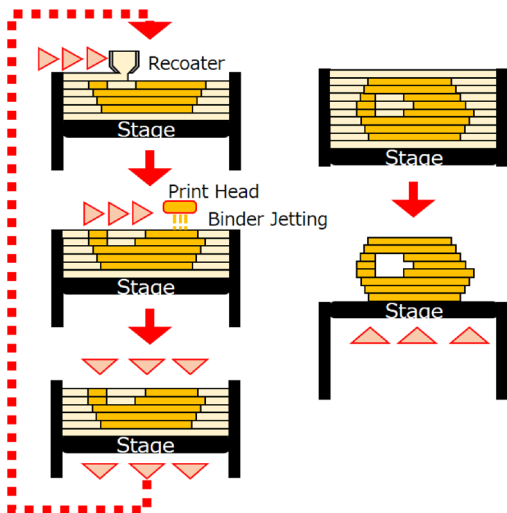


Fig. 11 Process of Binder Jetting Type

Fig. 12 のように AM の特徴を生かし多数個取りでレイアウト設計し、ExOne 社の S-max Pro で造型を行った。造型はメーカー指定の人口砂と、バインダーは砂 AM で主流⁽⁴⁾のフラン樹脂と高温硬化フェノール：Hot Hardening Phenol (HHP) を使用した。

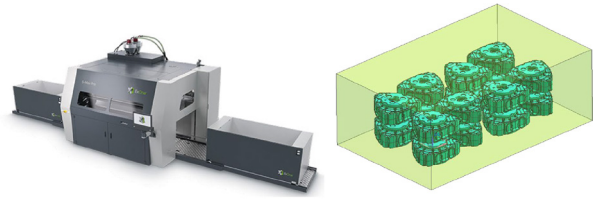


Fig. 12 Overview of the 3D Printer & Layout

評価ではバインダー種による差を確認するため、Fig. 13 に示すように湯道を共有する3つの中子にそれぞれシェルモールド、フラン、HHP を配置した。また、铸造に耐える強度を得るために必要なバインダー量はシェルモールドの1.5倍程度であるため、铸造時に発生するガス量も増えることが予想され、その影響を回避するためにガス欠陥に最も有利な最下段に2つを配し、残りはシェルと交互に配置して铸造し、素材表面のガス欠陥と金属組織を評価した。

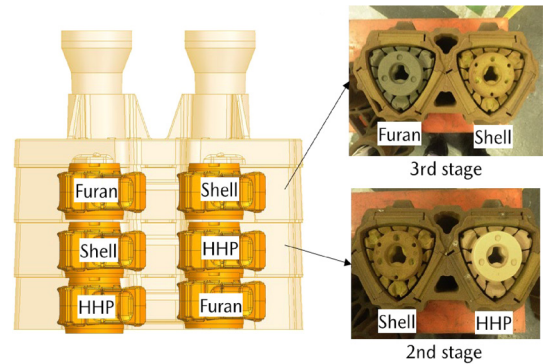


Fig. 13 Sand Mold Configuration

(2) 評価結果

砂 AM 造型後の中子を非接触形状測定機で測定し、モデルと重ね合わせ形状差を確認した（Fig. 14）。寸法精度はシェルモールド法より良好で、収縮率もフェノールがシェルと同等でフランはやや小さいが、その差はモデルの寸法を変更することで対応可能と考えた。

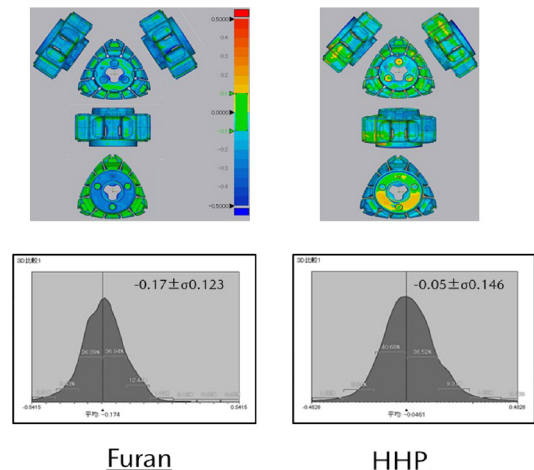


Fig. 14 Dimension Results

次に铸造した素材の金属組織を Fig. 15 に示す。フラン中子では铸造込み時に硫黄を含むガスが発生するため、素材表面の黒鉛球状化が阻害され、悪い結果となった。

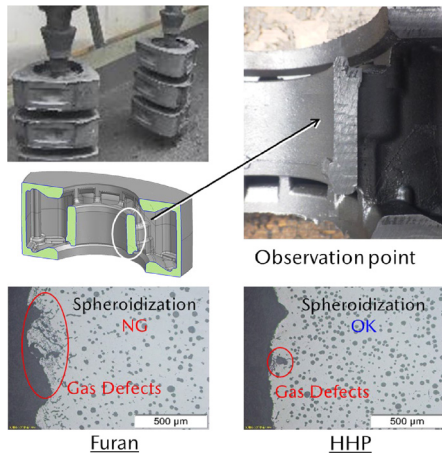


Fig. 15 Microstructure

一方、HHP はシェルモールドと同じフェノール樹脂のため、問題は発生しなかった。以上の結果から HHP を統一バインダーとして選定することとした。

しかしガス欠陥は、フラン樹脂、HHP のワーク双方に発生しており、最下段の素材も表面に凹凸が発生し、中段、上段は広範囲で中子ガスによる欠陥が生じた。これを回避するには HHP 樹脂のバインダー量をシェルモールドと同等レベルに低減する必要があるが、トレードオフとして铸造に耐えられないほど強度が低下するため、新たな解決策を検討しなければならなかった。

5. 鑄鉄ローターへの適用

5.1 機能向上に向けた砂型の再設計

(1) 中空一体化構造の鑄型の検討 (CHP 採用の検討)

ガス発生の原因はフェノール樹脂が過熱されガス化し溶湯内に入り込んだものである。したがってその対策は、ガス量をいかに低減し、型外へ排出することである。

またこのタイミングでフェノール樹脂の改善が進み：低温硬化フェノール：Cold Hardening Phenol (CHP) が提供され始めた。CHP の特徴は造型後の硬化プロセスが比較的低温の加熱であることと、砂の状態が乾砂状態で流動性が高いことである。HHP は湿砂で流動性が悪いため、不要砂の排出や、中子の中空化ができなかったが、CHP の特性を生かして中空化の可能性が見えてきた。一方、設計を進めるにあたり 3D データがないため、中子や素材、金型から 3D スキャンを行い、形状データを作成した。

これらのデータを基にガス欠陥対策は、鑄型内部を中空にして中子重量を削減しバインダー量を減らすことを最優先に考えた。同時に中空化でガス通路を確保し、鑄型強度も確保しつつ鑄型全体のバインダー量は従来同等を目指すことでガス欠陥ゼロを目指した。具体的には中空化の設計時の肉圧の設定は、他部品の鑄造実績と基礎

TP の熱間強度試験結果から基本肉厚 5mm とした。

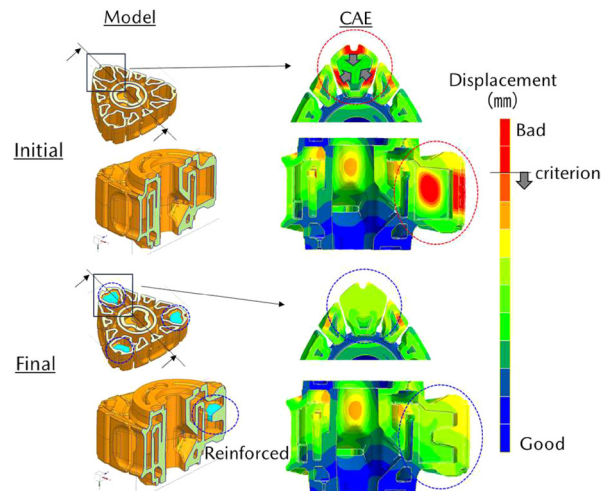


Fig. 16 Hydrostatic Pressure Deformation Simulation

また中空化による中子強度低下が懸念されたが、安易に肉厚アップを行わず、中子重量増を最小限に抑えるため溶湯静水圧による砂型変形の CAE 解析により最適形状に改善した。解析は、鑄造解析より鑄型温度の均一性を確認の上、その温度での強度を考慮した (Fig. 16)。

中空化の結果、中子重量は従来の 1.89kg→1.30kg へ 32%低減した。またバインダー添加量は 2.4%→3.2%と増加したが重量は従来と同等に抑えることができた (Fig. 17)。

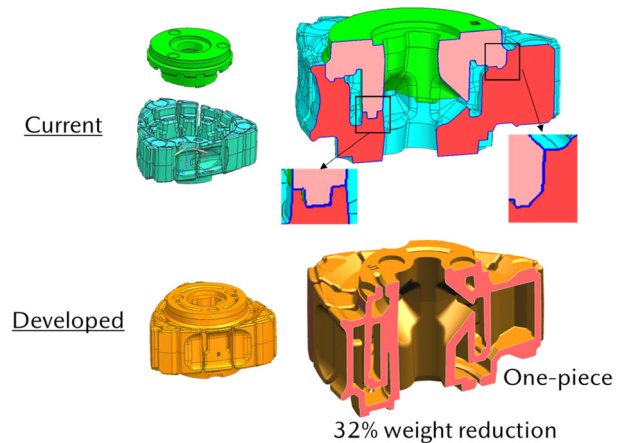


Fig. 17 Casting Mold Structure

(2) 鑄造方案の変更

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。そこで従来は Fig. 18 に示すようにローターの頂点位置に配置していた堰を、MDI 以降の RENESIS^{※1} ローターで中央に移し、120°ごとの冷却速度が均一で金属組織及び、密度ばらつきを抑制可能なセンターゲート方案を開発した。RENESIS より前のモデルにも、3D モデルベースのモノづくりである砂 AM の特長

を活かすことで、要具、設備更新に投資することなくセンターゲート方案を織り込み、品質向上が可能である。これら2点を対策として織り込み鑄造評価に進んだ。

※1 「RX-8」に搭載したサイド排気ポート方式ロータリーエンジン

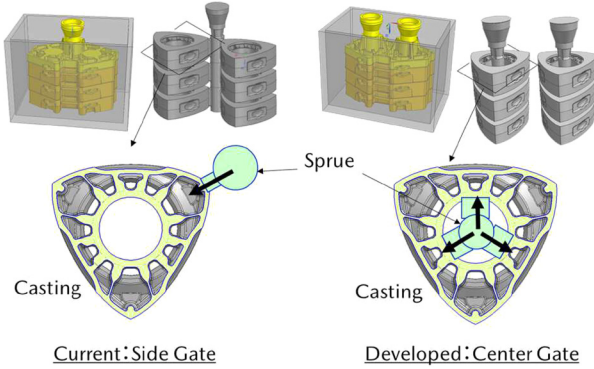


Fig. 18 Developed Gate System

5.2 造型・鑄造の評価結果

(1) 工程全体での評価

以上の対策を行ったAM中子を造型し実機での鑄造評価を行った。結果をTable 1に示す。量産を想定し評価項目は、乾燥後の直後強度、鑄造前の強度、中子の単品精度、組付け後の鑄型の一体化精度とし、鑄造後は、素材寸法、Computed Tomography (CT)による内部品質、寸法精度、砂残り、ガス欠陥等とした。そしてこれらの評価結果は量産同等であることを確認した。

Table1 Evaluation Progress

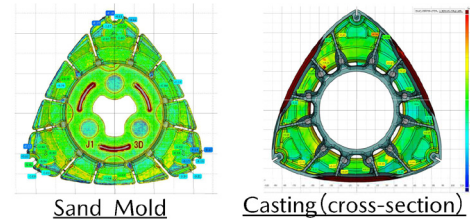
	Process	Evaluation Item	Judge
Process (Production Conditions)	Materials	Sand	OK
		Binder	OK
		Core Properties	OK
	Molding	Molding Conditions	OK
		Core Shape Thickness	OK
		Handling Property Thickness	OK
	Removal	Dimensional Change	OK
		Sand Removal Method	OK
	Excavation	Sand Discharge of Enclosed Sand	OK
		Sand Residue Rate	OK
		Heating/Drying	Dimensional Change
	Core Storage/Transport	Environmental Impact/Aging	OK
	Assembly	Assembly	OK
	Casting	Gas Defects	OK
		Impact of Enclosed Sand	OK
	Sand Removal	Residual Sand After Cleaning	OK
	Machining	Seating/Inter-process Transfer	OK
Equipment	Specifications	OK	
	Maintenance	OK	
MBD	Core Physical Properties	OK	
Product Equivalence	Material Quality	Material Dimensions	OK
		Metal Structure	OK
		Mechanical Properties	OK
		Internal Voids	OK
	Product Quality	Unbalance Amount	OK
		Weight Variation	OK
		Machining Dimensions	OK

さらに、積層後の埋もれた状態のAM中子を掘り出す作業も、CHPの採用により処理時間が短縮できた。またガス欠陥もバインダー総重量を量産同レベルに改善した

中空化の効果で中子から発生したガスも型外へ確実に排出できたことが確認できた。鑄造後の砂残りも、薄肉化を追求したことで、想定どおり砂型への熱吸収率が高まり、崩壊性も向上し砂残りは発生しなかったと考えられる。

(2) 寸法精度

以下、AM中子の精度とそれを使った鑄造品の寸法データをFig. 19に紹介する。



		Dimensions	
		Sand Molds	Castings
		Outer	Wall thickness
Mass Products n=32	Ave.	+0.19	+0.16
	σ	0.24	0.20
3D print n=24	Ave.	-0.10	0.00
	σ	0.03	0.04

Fig. 19 Dimension Results of Casting/Core

素材重量とアンバランスに最も影響するCore#1 & #2のAM一体品では、量産シェルに対して、 σ :0.24から0.03へ改善されればつきが大幅に低減された。鑄造品の肉厚精度についても σ :0.20から0.04へ改善されたことが確認できた。

(3) 内部組織

ゲート位置変更結果についても、対策案のセンターゲートでは、黒鉛球状化が製品部位にかかわらず均一にでき鑄造品質を更に安定させることができた (Fig. 20)。

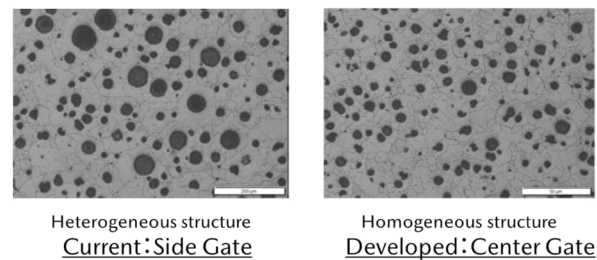


Fig. 20 Improvement of Microstructure

5.3 適用効果 (アンバランス量の改善)

最大の課題であった加工後のアンバランス量については、従来の調整加工の必要が廃止できるレベルにまで改善した。アンバランス不良はローターの表裏面でそれぞれ従来の15.3~15.4%から0.5~2.7%まで低減できた (Fig. 21)。

今回数あるローターの1機種へ適用し中子精度向上、重量の安定化だけでなくアンバランスの大幅改善に繋がった。今後、他のローターへも展開し、調整加工廃止の可能性を確認していきたい。

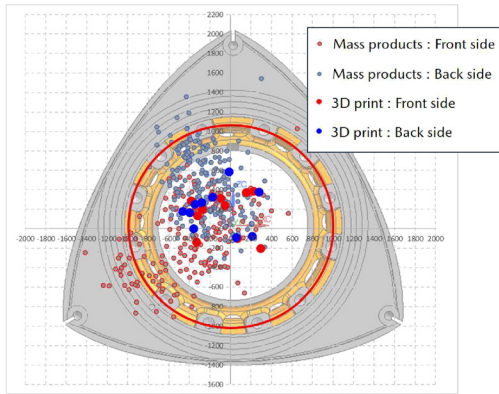


Fig. 21 Improvement on the Center of Gravity

5.4 気づきと学び

完成した素材の次工程である加工ラインでエアを用いた加工治具への着座検知不良が発生した (Fig. 22)。バインダーはモデルの断面に従い塗布するが、塗布した砂粒から隣の砂粒に滲み、鋳肌が従来の金型品より粗くなることが原因であると実体観察から分かった (Fig. 23)。

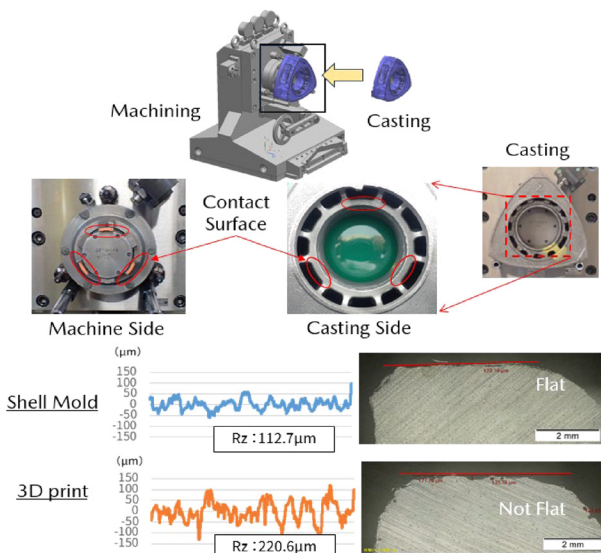


Fig. 22 Comparison/Effect of Surface Roughness

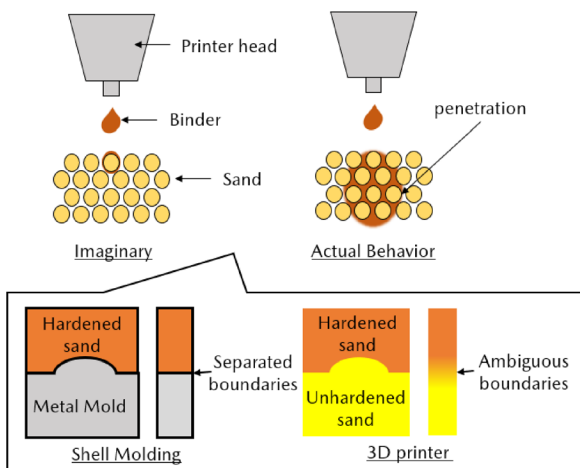


Fig. 23 Mechanism of the Binder Penetration

滲みの影響を受けにくくするため、加工基準面などの平面が必要な部位については積層方向に平行になるようにレイアウトし、積層によって段差がしやすい方向から加工基準をさけることを実施した。更に鋳造後の研掃条件の見直しを行い粗さ改善も進め、その上で加工ラインのエアゼロを見直し、AM 鋳肌用に再設定することで解決できた。

このように、AM 造型の際には必要特性に応じて造型方向を決定しなければならないこと、従来の生産工程も AM 仕様に見直す必要があることを学んだ。

6. おわりに

以上より少量のサービスパーツを砂 AM で生産することで、生産者側のメリットとしては、

- Q：バランス不良低減
- C：型補修、型保管費用削減
- D：注文に応じた生産が可能
- CN：鋳造歩留まり向上

一方、お届けするお客様のメリットとしては今後も同一品質での購入していただくことができる。

今回、ローターの 1 部品を生産開始することができたが、この砂型 AM コンププロセスを全ての鋳造部品に展開していきたいと考える。また本検討の中で、AM 導入は市販設備を購入しただけではその効果を最大限に発揮させることはできないことも分かった。積み重ねた鋳造技術と砂粒を積み重ねる AM の特徴を最大限に生かすことで、従来のさまざまな制約を取り除くことができ、当社独自の AM 技術に進化し設計の機能追求にも貢献できる。そしてより短期間で量産準備を完了して生産を開始し、最後の 1 台まで作り提供し続けることができると実感した。

一方、マツダはこれからも新しい商品を生み出し続ける。それに伴ってサービスパーツへの継続的な対応は必要である。新車の大量生産と少量のサービスパーツ生産を同じプロセスで製造する検討の余地はあるものの、出荷時点で方案を変更すると堅守すべき部品質に影響する可能性がある。

そのためには生涯生産として考え、試作段階で AM による評価を完了しておくべきと考える。現在の開発初期の試作段階では、木型を用いて砂型製造するケースが多い。試作段階における製造リードタイムの短縮は開発設計者にとってもメリットとなり、お客さまへお届けする期間短縮にもつながる。そのため、試作段階で砂 AM を活用して短納期化を進めるメリットは大きいと考える。

以上からサービスパーツ生産の継続と新車開発を最少投資で行う少量生産プロセス (ビジネスモデル) として、既存中子造型プロセスと AM 技術を融合させるべく、今後試作部門、開発部門と共に創りあげたい (Fig. 24)。

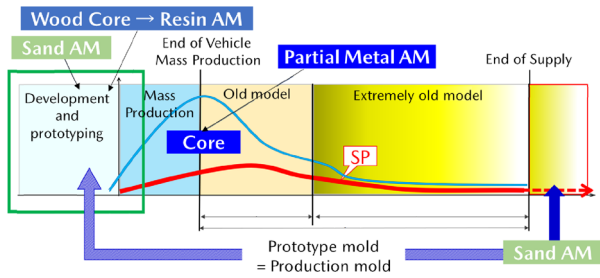


Fig. 24 Concept of Expanding AM Application

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) 坪井ほか：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，[マツダ技報](#)，No.40，pp.77-83 (2023)
- (3) 岡根ほか：3D プリンターの砂型造形への適用による鋳造品と鋳造技術の高度化，[鋳造工学](#)，第 90 巻，6 号，pp.268-273 (2018)
- (4) 永井康弘：人工砂を用いたフラン自硬性鋳型とその特性，[鋳造工学](#)，第 94 巻，12 号，pp.728-732 (2022)

■著者■



西昇一



國松大知



河野一郎



大島久和



坪井涼介



小島仁志