

特集：MAZDA MX-30 Rotary-EV

15 新型ロータリーエンジン 8C 型向け高速クロムモリブデンめっき工法の開発

Development of High-Speed Chrome-Molybdenum Plating Method for New 8C Rotary Engine

林 政男^{*1} 園田 尊正^{*2} 春木 佳奈^{*3}
Masao Hayashi Takamasa Sonoda Kana Haruki高場 宣弘^{*4}
Nobuhiro Takaba

要 約

ロータリーエンジンにおいて、ローターハウジング摺動部のトロコイド面には耐摩耗性向上を目的としたクロムモリブデンめっきを施している。ローターハウジングは緻密なめっき形成による高強度なめっき皮膜の確保とめっき表面の油だまり溝への潤滑油膜の保持により耐摩耗性を確保してきた。今回、ロータリーエンジンの復活にあたり、新しいめっき工法を適用しつつ CO₂ 低減を課題として取り組んだ。具体的には生産工程において、6.5 時間ものめっき処理時間を要し、更に油膜保持のため逆電処理による油だまり溝形成工程を要していた。めっき液中に触媒を添加することでめっきの析出効率を高め、処理時間を従来の半分以下の 3 時間に短縮しつつ、めっき処理と同時に油だまり溝を形成する工法案はあったが、複雑形状のワークへのめっき析出速度のバラツキを低減し、ねらいどおりの均一なめっき皮膜を得ることが量産化の課題であった。この課題に対し、CAE を活用して電極形状と処理条件を最適化することにより量産化を実現し、生産効率を大きく向上させ、同時にめっき処理の際に発生する CO₂ を 45% 低減することができた。

Abstract

The trochoid surface of the rotary engine's rotor housing is coated with a chrome-molybdenum alloy plating for the purpose of wear resistance. Wear resistance is achieved by maintaining a high-strength plating film and retaining a lubricating oil in the oil retention grooves on the plating surface. In the revival of the rotary engine, efforts were made to apply a new plating method while addressing CO₂ reduction. The previous plating method required a lengthy plating processing time of 6.5 hours and an additional step of forming oil retention grooves through reverse electroplating. Although there had been a method proposal to reduce the processing time to 3 hours by adding a catalyst to the plating solution while forming oil retention grooves, achieving a uniform plating film on complex-shaped workpieces remained a challenge for mass production. To address this issue, mass production was realized by utilizing CAE to optimize electrode shapes and processing conditions, significantly improving production efficiency, and reducing CO₂ emissions during the plating process by 45%.

Key words : Materials, Catalyst, Addition, Surface treatment/plating, Strength/stiffness/rigidity/wear resistance

1. はじめに

マツダ独自の技術であるロータリーエンジンは、これまで 60 年余りにわたり開発を進めてきている。今回、このロータリーエンジンの特徴であるコンパクトで高出力な特性を活かした新たな発電ユニット e-SKYACTIV R-EV

を開発した。

今回の発電ユニットに搭載されるロータリーエンジンも従来同様、高出力かつ高耐久の機能を追求している。耐久性の向上のため摺動部となるトロコイド面に耐摩耗性と低摩擦性を備えたクロムモリブデンめっきを析出させている。ゆっくりとめっき皮膜を形成することで緻密

*1~4 車両技術部
Painting, Trim & Final Assembly Engineering Dept.

なめっきを形成して耐摩耗性を確保し、逆電処理による油だまり溝形成を行うことで低摩擦性を付与してきた。しかしながら環境側面では、めっき処理設備の稼働(6.5h)、工程間の物流、逆電処理のそれぞれでエネルギーを要しており、カーボンニュートラルの達成に向け消費エネルギーの低減が急務であった。今回めっき液中に触媒を添加してめっきを行う高速クロムめっき工法⁽¹⁾を採用することにより、めっき時間の短縮とめっき構造の改善に加え、逆電処理という追加加工エネルギーの削減を同時に解決し、その課題であるめっき速度のバラツキ制御に取り組んだ。本稿では、高速クロムめっき工法の量産導入にむけた活動内容について報告する。

2. めっき皮膜の機能集約

ローターハウジングはアルミ材の内面に鉄板層を鋳込貼付した後、エンジン加工工場にてトロコイド面の内面研削加工を行い、めっき工場に搬入し硬質クロムめっきを行っている。従来の13B型ローターハウジング (Fig. 1 左) では、硬質クロムめっき処理後の内面研削後に、再度めっき工場に搬入し逆電処理にて油だまり溝の形成を行うことでエンジン性能を確保してきた。13B型の加工工程を Fig. 2 に示す。これに対し、8C型ローターハウジング (Fig. 1 右) で新たに採用した高速クロムめっき工法は、めっき液に触媒を添加し、電流密度を高めてめっき処理することで、めっき処理速度を速めると同時に皮膜中に油だまり溝を形成させることができるため、めっき時間の大幅な短縮かつ油だまり溝形成のための追加加工の廃止が可能となるめっき処理法である。8C型の加工工程を Fig. 3 に、13B型及び8C型の内面研削後の写真を Fig. 4 に示す。

一般的にこの工法では、めっき膜厚とめっき構造がバラツキやすいことがわかっており、めっき膜厚とめっき構造のバラツキを低減することが量産化の課題であった。課題解決に向けて、めっき構造の定量化をまず行った。次にねらいのめっき膜厚とめっき構造を実現するための工程因子の制御(めっき液成分管理、めっき液流量制御、電極形状の制御)を行った。

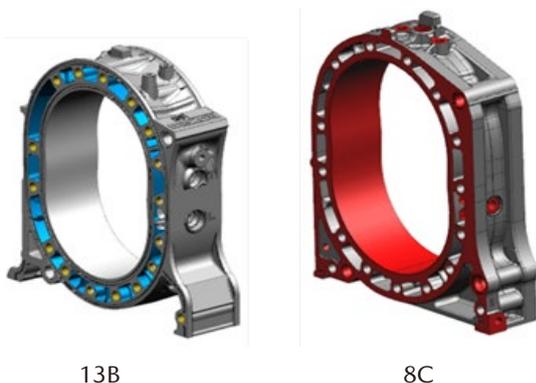


Fig. 1 Rotor Housing

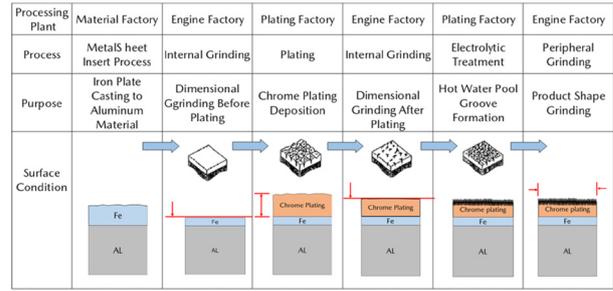


Fig. 2 13B Conventional Process

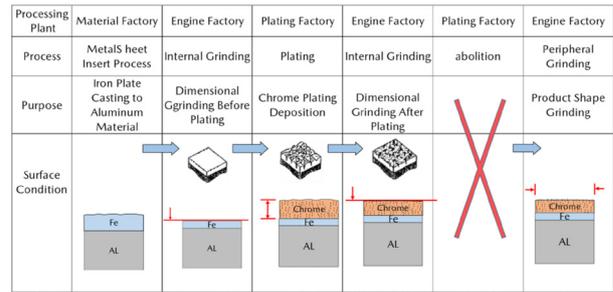


Fig. 3 8C New Process

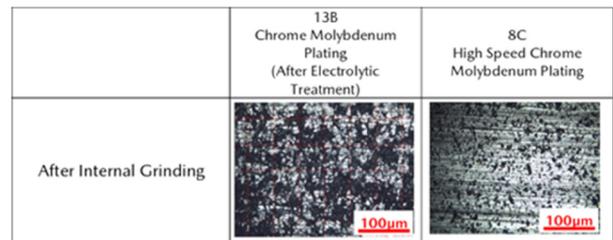


Fig. 4 Surface after Grinding

3. 主要取り組み

3.1 めっき表面観察システムの構築(めっき構造定量化)

めっき後のワークには約150µmのクロムめっきが析出されており、この皮膜中にはエンジン性能保証のために重要な役割となる油だまり溝が存在している。この油だまり溝の大きさは後工程の内面研削加工後の品質に大きく影響する。この油だまり溝の本数は1cmあたり約1000本と、とても細かい溝であることから、高精度で観察測定できる機器の選定及び測定方法の構築が課題であった。油だまり溝の観察測定は、量産ワークに対して垂直にレンズをあてて観察する必要があるが、ワークの内側は約205mm (Fig. 5) しかなく、市販されている顕微鏡やマイクロスコプでは観察することができない。このためレンズ先端にミラーを取付けた状態で観察する仕組みのマイクロスコプを製作しトロコイド面の全ての部位を隈なく観察できる装置を設計・導入した。導入したマイクロスコプを Fig. 6, 7 に示す。

この装置は撮影した写真 (Fig. 8 左) から画像解析にてめっき皮膜中の油だまり溝の数を測定できる。具体的



Fig. 5 Shape of Rotor Housing

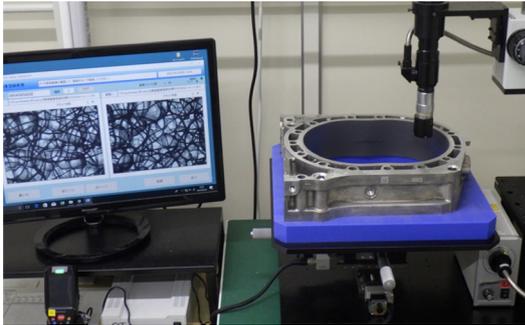


Fig. 6 Microscope System

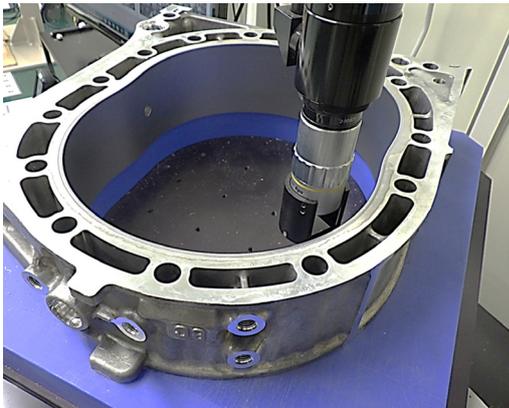


Fig. 7 Observation of Inside Surface of Work

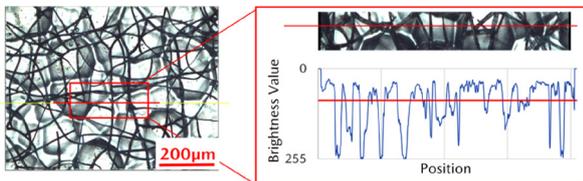


Fig. 8 Picture of Oil Retention Grooves in a Plating Film

には内面研削加工にて削り取られる深さでの1cmあたりの油だまり溝を観察画像中の交点数 (Fig. 8 右) から読み取り算出できるようになっている。このようにめっき処理工程の品質を定量的に判定する仕組みを構築し、これにより量産における制御因子の管理幅と良品条件を明確にする基盤ができた。

3.2 めっき析出速度のコントロール

ローターハウジング高速クロムモリブデンめっきで使用するめっき液は、クロム酸や硫酸、モリブデン酸ナトリウム、触媒などから構成されており、濃度や温度、電流密度、流量等の状況によりめっき品質は大きく変わる。めっき皮膜の硬さに対しては温度が重要であり、めっき皮膜の付きまわり性はクロム酸濃度や硫酸濃度が重要である。また油だまり溝は触媒濃度 (Fig. 9) と処理電流値 (Fig. 10) で制御できる。

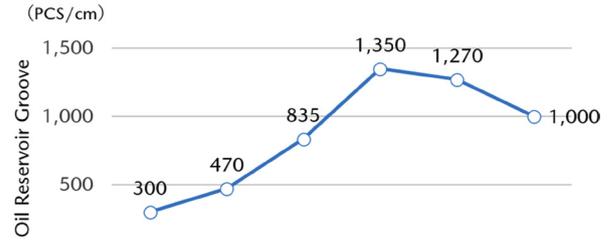


Fig. 9 Catalyst Concentration vs Oil Retention Groove Count Graph

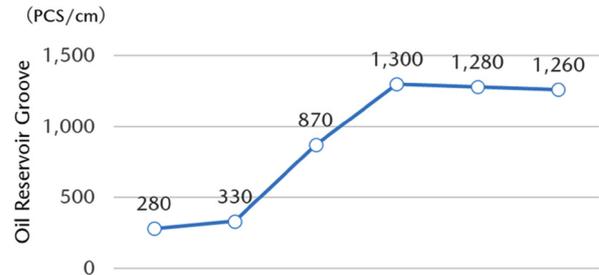


Fig. 10 Current Density vs Oil Retention Groove Count Graph

また、めっき液中の触媒濃度を適切に管理することが重要である。めっき液中の触媒濃度の違いによる皮膜構造の違いを Fig. 11 に示す。めっき液中の触媒濃度の違いによりめっき構造は大きく異なる。

| | Low | High |
|------------------------|-----|------|
| Catalyst concentration | | |
| Current density | | |

Fig. 11 Current Density and Plating Surface Structure

触媒濃度はめっき処理工程において徐々に変化するため、めっき構造の均一化のために、触媒濃度を精度よく頻りに管理する必要がある。そこで量産中、迅速かつ高

精度にめっき液中の触媒濃度を測定・管理できる方法を検討した結果、イオンクロマトグラフ法を採用し、ラインサイドに配備することとした。

3.3 めっき液循環流量コントロール

ローターハウジングめっき設備は下記 Fig. 12 に示す構造で、ローターハウジング生産開始時から基本構造は大きく変わっていない。1度でより多くのローターハウジングをめっき処理したいため、ワークを数枚積み重ねた状態でめっき設備に組付し、設備中央にセットされている電極とワークのわずかな隙間に下側からめっき液を送り込み上側から回収する仕組みの設備としている。めっき液を循環しながら通電することでクロムイオンを還元し、トロコイド面にクロムめっき皮膜を析出させる仕組みである。この時、電極表面（陽極側）からは酸素、ワーク表面（陰極側）からは水素ガスが大量に発生する（Fig. 13）。

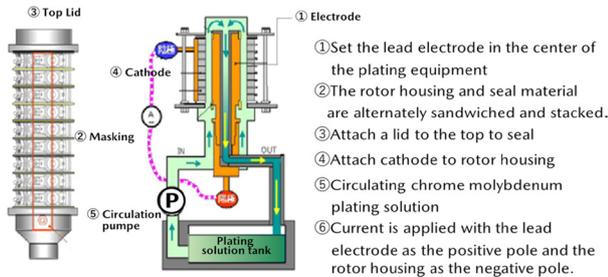


Fig. 12 Plating Equipment Configuration

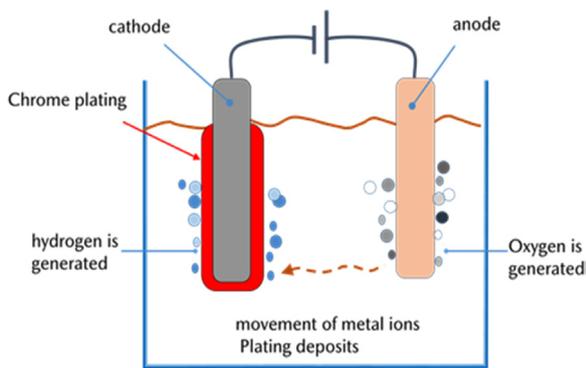


Fig. 13 Plating Mechanism

発生したガスはめっき液と一緒に上側から回収されるが、ワークを高く積み重ねて過ぎた場合には、上部に積み込まれたワークと下部に積み込まれたワークで表面のガスの付着量が異なり、めっき膜厚とめっき構造に差が生じてしまう。めっき析出時に発生するガスをめっき液循環流により回収することで、めっき速度の差を低減し、めっき膜厚とめっき構造のバラツキが低減できると仮定し、CAEにより循環流量変化によるワーク表面の流れを検証（Fig. 14）し、ワークの同時処理数とめっき液循環流量を決定した。

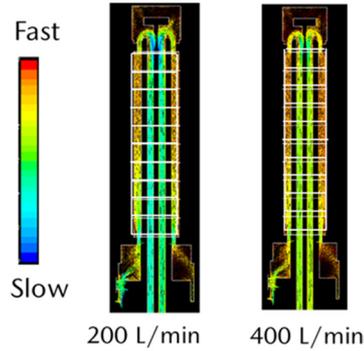


Fig. 14 Simulation of Work Surface Flow Velocity

また、この結果から数段積み重ねたワーク内のめっき液流量を調整する機構を設備仕様に織り込んだ。実機での検証では、9段積みされたワークの全てでねらいどおりのめっき膜厚 150 μ m が析出されていることを確認できた。実際に循環流量を増やすほど膜厚差が少なくなることが確認でき、めっき析出反応で発生するガスを積極的に離脱させることがめっき析出の均一化に効果的であることが立証できた。8C型ローターハウジングめっき設備を以下に示す（Fig. 15）。



Fig. 15 8C Plating Equipment

3.4 めっき用電極のシミュレーション設計

ここまでの取り組みで、部位によるめっき析出速度の差を低減することが、めっき皮膜の品質確保に重要であることが分かった。そこで更なる品質改善のため、トロコイド面内のめっき析出速度均一化に取り組んだ。これまでの電極設計の考えを基にシミュレーション解析を行い、8C型ローターハウジングに対応した専用めっき電極の設計を行った（Fig. 16, 17）。

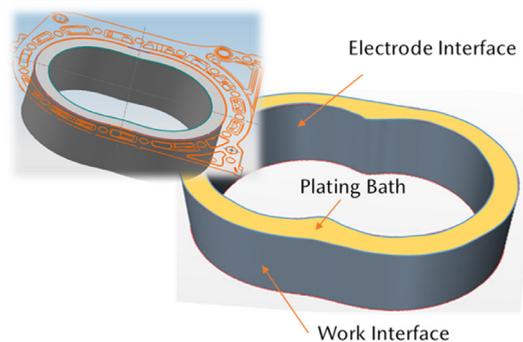
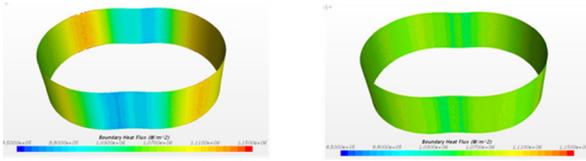


Fig. 16 Analytical Model Creation



Analysis Result of Existing Shape
Deformed Trochoid Analysis Results

Fig. 17 Analysis Result

膜厚を指標に比較した結果、専用設計した電極を使った場合、シミュレーション解析で求められた状態と合致していることが確認でき、1枚のワークの中での膜厚差を従来の1/3に低減した。

3.5 品質保証システムの進化

本活動にて、めっき皮膜品質と制御因子である製造条件の関係が明確になってきた。また実際に量産導入していく中で製造時の管理項目を追加し、品質結果も統計的に品質保証できることが分かった。更に、ワークに二次元バーコード (Fig. 18) を打刻し、ワーク1枚1枚と、めっき処理条件 (Fig. 19) 及びめっき品質確認結果 (Fig. 20, 21) をデータベースに登録、確認できるシステムを整備した。量産ワーク全数の製造条件と品質結果をデータとして残し、一元管理することで、全てのワークを品質保証するようシステムを進化させた。

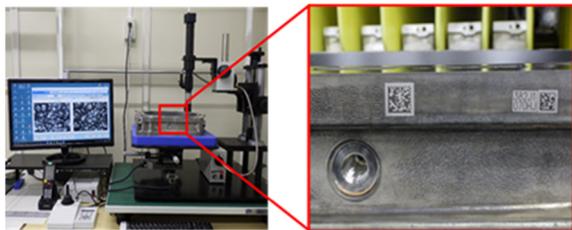


Fig. 18 2D Barcode

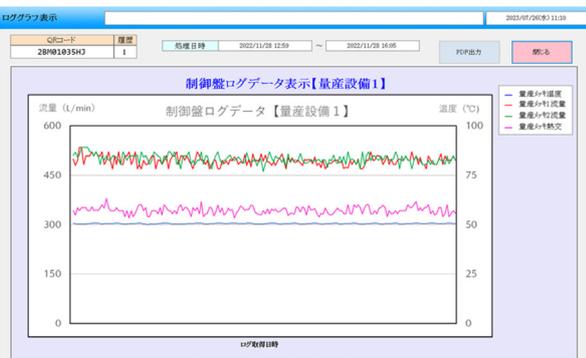


Fig. 19 Control Panel Log Data

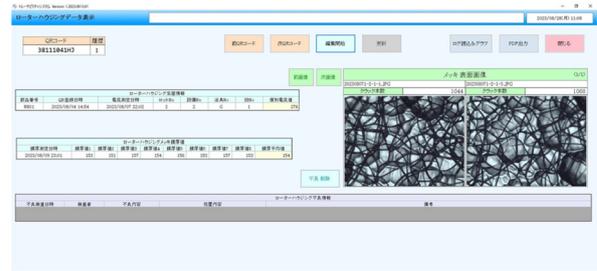


Fig. 20 Film Thickness Measurement Results



Fig. 21 Number of Oil Retention Groove

4. 効果

高速クロムモリブデンめっき工法の採用により、めっき時間を6.5hから3.0hと短縮し、かつ内面研削後の逆電処理工程を廃止した。この結果、年間61000kg-CO₂の削減を実現した。また、めっき皮膜の低摩擦化により、摺動部に接触するアベックスシールの摩擦性もねらいどおりに低減できていることが確認できた。

5. おわりに

本ユニットは開発、素材、加工、めっき、組立など多くの関連部門の連携と協力によって商品化を実現することができた。この関係性を継続しながら今後もお客様の期待を上回り、喜んでいただけるような魅力ある商品開発に尽力していく所存である。最後に、高速クロムモリブデンめっきの開発・生産にご協力いただいた全ての関係者の皆様に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 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■



林 政男



園田 尊正



春木 佳奈



高場 宣弘