

特集：MAZDA MX-30 Rotary-EV

13

## アルミサイドハウジング実現に向けた 高速フレーム溶射技術の開発

### Development of HVOF Thermal Spray Technology for Aluminum Side Housing

山本 真司<sup>\*1</sup> 中田 行俊<sup>\*2</sup> 高橋 宏和<sup>\*3</sup>  
Shinji Yamamoto Yukitoshi Nakata Hirokazu Takahashi  
池田 雄一郎<sup>\*4</sup> 岸田 高穂<sup>\*5</sup> 岡田 保彦<sup>\*6</sup>  
Yuichiro Ikeda Takaho Kishida Yasuhiko Okada

#### 要 約

マツダは走る喜びと優れた環境性能を実現する一つの選択肢として、マツダ独自の軽量、コンパクトなロータリーエンジン（以下、RE）によるバッテリーへの充電を可能とする e-SKYACTIV R-EV を開発し、お客様に提供している。従来の RE では、その大型構成部品であるサイドハウジング（フロントハウジング及びリアハウジング）は鋳鉄製であり、ユニットの軽量化による更なる運動性能と環境性能を追究するためには、この 2 部品のアルミニウム（以下、アルミ）への材料置換が重要課題となっていた。しかし、硬度の低いアルミでは、回転運動するローターに装着されたシール部材の摺動に対する耐久性が得られないため、高い耐摩耗性を有する硬化層を摺動面にコーティングする必要がある。そこで、摺動面の耐摩耗性を確保するコーティング手段として、高速フレーム（以下、HVOF）溶射技術を適用した。本技術の適用にあたり、摺動面に要求される機能と品質の関係、溶射皮膜の品質特性に影響する要因とそのメカニズムを明確にした。これらの検証を積み重ね、技術を手の内化することにより、要求機能、品質を確保しつつ、必要最小限の投資、コストで量産適用を実現した。本稿ではこの取り組みについて報告する。

#### Abstract

As one of the options for realizing both driving pleasure and excellent environmental performance, Mazda has developed and released e-SKYACTIV R-EV that enables Mazda's unique light-weight compact Rotary Engine (RE) to charge the battery. The conventional RE has cast-iron side housings which have been required to be replaced with aluminum for lighter weight and higher performance, but the aluminum side housing needs wear-resistant coating on its sliding surface to secure durability. We therefore developed High Velocity Oxy-Fuel (HVOF) thermal spray technology and verified the effects of the influential factors on its coating quality and required functions, while minimizing the cost and investment through a series of verifications. This paper reports our initiatives aiming to put the technology into production.

**Key words** : Heat engine, Rotary engine, Wear resistance, Thermal spray, HVOF

#### 1. はじめに

走る喜びと優れた環境性能を両立させる選択肢の一つとして、マツダは独自の RE による発電と外部電源によりバッテリーを充電し、モーターで駆動するプラグインハイブリッド車を開発し、お客様に提供している。軽量、コンパクトな RE の特性を生かした e-SKYACTIV R-EV によるマツダ独自の優位性を確立するには、既存の RE の

更なる軽量化が必要であり、その最重要課題として、主要構成部品であるサイドハウジングの材料を従来の鋳鉄からアルミに置換することが求められていた (Fig. 1)。

フロントハウジングとリアハウジングのアルミ化により、15kg 以上/台の軽量化が可能になり、これによってマツダ独自の RE による電動駆動ユニットをより高い走行性能、環境性能とともに実現することができる。

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

\*6 本社工場第 2 パワートレイン製造部  
Powertrain Production Dept. No.2

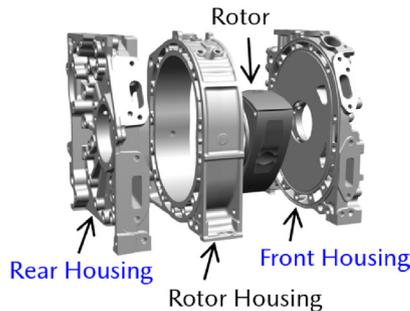


Fig. 1 Main Components of Rotary Engine

しかし、アルミは軽量である反面、材料硬度が低く、そのままサイドハウジングに使用すると、回転運動するローターに組み込まれたシール部材の摺動により削られて摩耗するため、摺動面としての機能を保持することができない。従って、アルミの摺動面に高い耐摩耗性を有する高硬度な材料をコーティングすることが必要不可欠となる。コーティングの工法としては、複合メッキ等、複数の表面硬化処理の耐久性を評価した結果、最も耐摩耗性が高く、かつ摺動抵抗や耐焼き付き性等にも優れた皮膜を形成できる  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  を主成分とするサーメット材を HVOF 溶射する工法を選定<sup>(1)</sup>し、量産適用に向けた技術開発を行った。

## 2. HVOF 溶射技術の適用課題

### 2.1 HVOF 溶射の特徴

HVOF 溶射とは、プロピレン等の可燃ガスを高圧の酸素とともに溶射ガンのノズル内で燃焼させ、燃焼室の圧力を高めることで高速火炎（燃焼ジェット噴流）を発生させて、 $\text{Cr}_3\text{C}_2$ 系サーメット材粒子を約マッハ 2.0（約 700m/s）の超音速でアルミ基材に衝突させることにより皮膜を形成する工法<sup>(2)</sup>である。Fig. 2 に示すように溶射ガンを左右にオシレートさせながら複数層を重ねることにより、摺動面に数百  $\mu\text{m}$  の厚さで硬質かつ緻密な皮膜を形成することができる（Fig. 3）。

この技術は主に航空宇宙産業等で、極めて高い耐摩耗性や耐熱性が要求される少量生産部品に適用されることが多く、自動車用の大物部品としては世界初の量産適用となる。

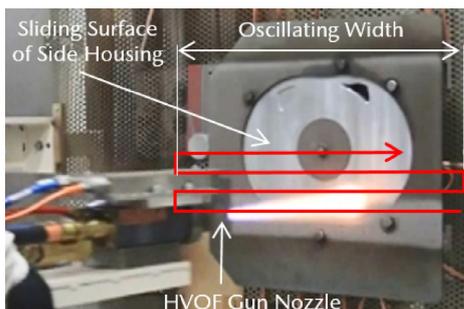


Fig. 2 HVOF Spray on Side Housing

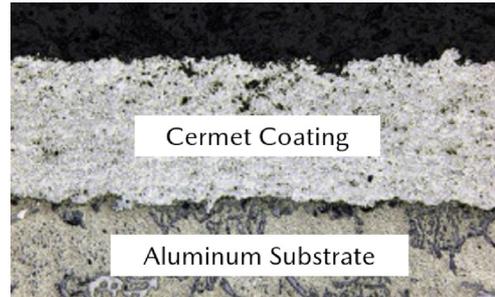


Fig. 3 Cross Section of HVOF Coating

### 2.2 HVOF 溶射技術の課題

アルミサイドハウジングへの量産適用においては、当初、摺動面に求められる機能（耐剥離性、耐摩耗性等）に対して、この新たな工法で得られる溶射皮膜が、どの程度の実力（マージン）をもっているかを明確に把握しきれていない状況であったため、要求機能の限界と品質の実力を一つ一つ見極めていく必要があった。そこで、摺動面に要求される機能、品質を満足するために必要な投資、コストを最小限に抑えることをねらいに、前処理工程の可否を検証しつつ、機能限界を明確にした上で、量産工程の仕様を決めることとした。

本仕様を決める上で、溶射範囲が摺動面全体の広範囲になることから、溶射によるワークの変形や、後工程となる硬質溶射皮膜の仕上げ研削における生産性の悪化が懸念された。

本技術適用における生産性の課題と解決に向けての視点、及び取り組み項目を以下に記す。

#### (1) 量産工程（前処理）の仕様決定

一般的な溶射処理においては、溶射前に基材表面を脱脂洗浄し、ブラスト等で粗面化することにより、溶射皮膜と基材間の密着力を高める必要があるとされている。ただし、これらの影響度は材料の組合せや溶射条件によって異なると考えられるため、摺動面の要求機能を確保するために必要となる、各工程の仕様、可否を見極める。

#### (2) 商品機能の確保（機能限界の見極め）

皮膜の品質特性の中でも特に重要かつ量産での管理が難しいと考えられる密着強度について、そのメカニズムと影響要因を明確にすることにより、意図的に下限品を製作し、あえて耐久評価に供試することで、機能限界を見極める。

#### (3) ワーク変形の抑制

溶射によるワークの変形メカニズムを明確にし、影響するパラメーターを適正に制御することにより、変形の最小化を図る。

#### (4) 皮膜の研削方式の決定

難削材である硬質皮膜を効率的に研削するため、溶射後の皮膜の表面粗さや被研削面の高さの変動（前加工精度、膜厚変動等を含む）にかかわらず、常に必要最小限の取り代で削る定量研削方式を確立する。

### 3. 課題解決に向けた取り組み

#### 3.1 量産工程（前処理）の仕様決定

Fig. 4 に一般的に考えられている溶射とその前後加工の工程を示す。前工程として摺動面をフライス加工し、中間洗浄を行った後、溶射工程に入る。後工程では、皮膜の仕上げ研削等を行い、リークテスト工程にて品質を保証した後に、組立工程に送られる。通常の溶射工程では、まず脱脂洗浄して基材表面の油分や汚れを完全に除去した後、ブラスト等により表面に細かな凹凸形状を付与した上で溶射を行うことにより、溶射粒子を食い付きやすくすることが推奨されている。

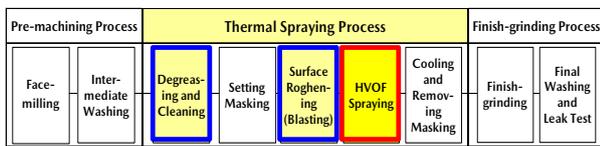


Fig. 4 Assumed HVOF Spraying Process for Side Housing

そこでこれらの前処理について、摺動面に求められる機能（耐剥離性）を確保する上で、どのような仕様でなければならないか、あるいはそれらの前処理が本当に必要かどうかという視点で、必要最小限の工程を見極めるために、前処理の仕様を振らした溶射テストを行い、密着強度への影響を検証した。密着強度は JIS H 8402 に準じて、試験片に溶射し、皮膜表面に強力な接着剤で相手材を接着し、引張試験で評価した (Fig. 5)。

Fig. 6 に脱脂洗浄工程で密着強度に影響すると考えられる要因を振らして溶射し、密着強度を測定した結果を示す。メーカー推奨の脱脂洗浄をした表面状態と、脱脂洗浄することなく、前加工工程の中間洗浄液や切削クーラントが付着したままの表面状態で、粗面化処理を行わずに溶射し、密着強度を評価した。その結果、全ての条件において接着剤で破断し、皮膜の密着強度は規格を満足することを確認できた。

また、Fig. 7 に粗面化工程の仕様を振らしたテストの結果を示す。メーカー推奨のブラスト面のほか、旋盤面、フライス面、溝加工やアンダーカット形状を加工した面を評価したが、これら全ての条件においても規格を満足することを確認できた。

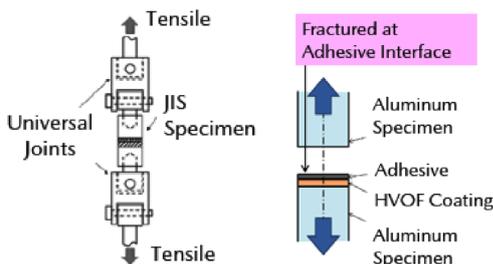


Fig. 5 Bond Strength Measurement

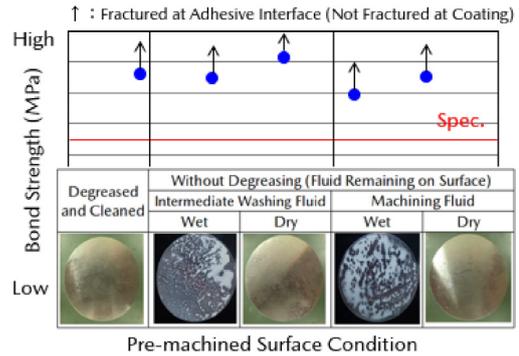


Fig. 6 Effect of Degreasing on Bond Strength

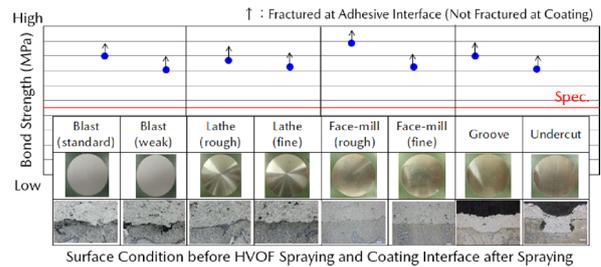


Fig. 7 Effect of Surface-roughening Type on Bond Strength

上記の結果を基に、脱脂洗浄、粗面化処理を行わず、フライス加工したままの状態でのN増しテストを行った結果、全て接着剤で破断し、なおかつ規格に対し、十分な密着強度を確保できることが分かった (Fig. 8)。更に試作品の耐久評価を行った結果、皮膜の剥離等の発生はなく、機能上問題ないことを確認した。

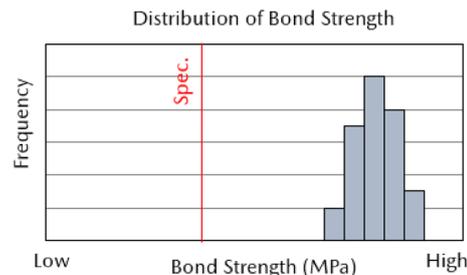


Fig. 8 Bond Strength without Degreasing or Roughening

以上の検証結果から、溶射用の前処理工程は不要と判断し、脱脂洗浄と粗面化工程を追加することなく、前工程のフライス品へ直接溶射することに決定した。これら2工程を不要としたことで、新工法に伴う設備投資をミニマムに抑えることができた。

#### 3.2 商品機能の確保（機能限界の見極め）

これまでに社内で経験のない工法を量産適用するにあたり、お客様に提供する商品機能を確実に保証するには、機能限界を明確にし、新工法で得られる皮膜がその限界値に対してどれだけのマージンを確保できているかを把

握しておく必要がある。そこで、エンジン運転中の皮膜の剥離限界を知るためには、まず、意図的に密着強度を落とした皮膜を製作し、耐久評価により確認する必要があると考え、溶射皮膜の密着メカニズムの検証を行った。

アルミ表面をあえてバフで鏡面研磨し、その上から溶射した皮膜の断面を拡大観察した結果、平滑なアルミ表面に高速で衝突した溶射粒子が食い込んでおり、アルミ基材と皮膜の界面が凸凹形状を呈していることを確認した (Fig. 9)。これより、HVOF 溶射皮膜の高い密着強度は、その特徴である超高速 (約マッハ 2) で飛行する硬質粒子の基材への食い込みで生じたアンカー効果によるものと判明した。

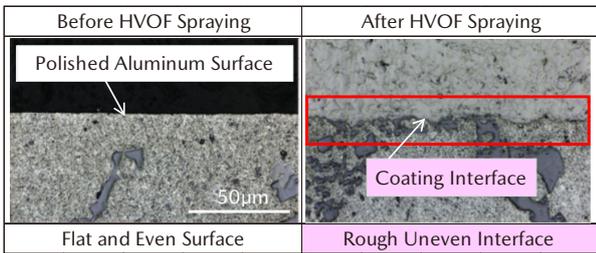


Fig. 9 HVOF Spraying on Polished Aluminum Surface

また、HVOF 溶射の場合、溶射距離 (溶射ガンから基材表面までの距離) が長くなると、粒子の飛行速度が低下することが分かっている (Fig. 10)。そこで、溶射距離と密着強度の関係性を調査した結果、接着剤強度より低い皮膜破断する領域においては、溶射距離が長い程、密着強度が低下することが分かった (Fig. 11)。

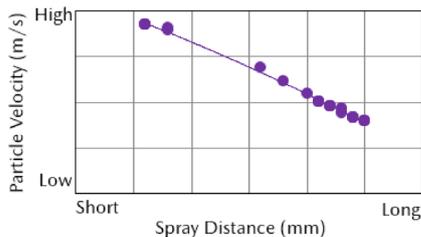


Fig. 10 Effect of Spray Distance on Particle Velocity

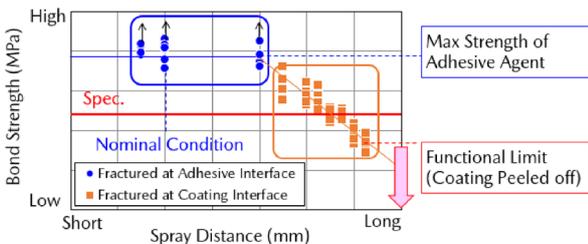


Fig. 11 Effect of Spray Distance on Bond Strength

以上の結果を基に、溶射距離を長く設定することにより、意図的に密着強度を落とした皮膜を製作した。下限品の皮膜は、標準品に比べて硬度が低く、気孔が占める

面積率も高いことから、機能限界を見極めるのにふさわしい下限品質が得られていると判断し、耐久評価に供試した。耐久評価の結果から、RE 運転中に皮膜の剥離が発生する機能限界を見極め、安全率を考慮した上で、密着強度の規格下限を最終決定した (Fig. 11)。

### 3.3 ワーク変形の抑制

耐久評価による機能検証を進める一方で、試作品による溶射テストを重ね、得られた品質を詳細に測定すると、溶射によりアルミ基材が大きく変形していることが分かった。

Fig. 12 に溶射前後及び仕上げ研削後の摺動面上の測定点 (14 点) における表面高さの測定結果を、溶射後に測定した膜厚と合わせて示す。溶射後の表面高さ (図中の ■) から膜厚分を差し引いた位置 (▲) が溶射後の皮膜とアルミ基材との界面となり、溶射前の基材表面高さ (◆) と比較すると、凸状 (上方向) に大きく変形していることが分かる。

この状態から皮膜表面を図中の×の高さに仕上げ研削すると、変形が大きい部位では研削後の最終膜厚が部分的に薄くなってしまふ。特にワーク中央部 (測定点 8~14) では変形がかなり大きいため、付けた皮膜の大部分を削り取らざるを得なくなり、変形によるロスが非常に大きいことが分かった。

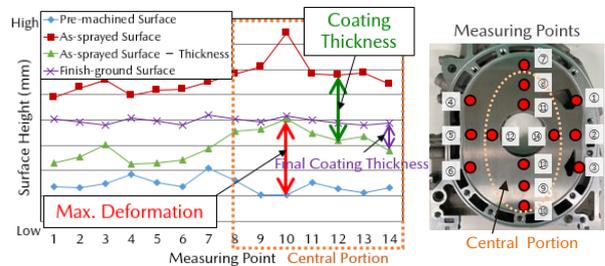


Fig. 12 Coating Thickness and Work Deformation

製品機能 (耐摩耗性) から要求される最終膜厚を確保するため、単純に必要な溶射膜厚を増やすと、その分コストが増加し、処理時間の延長に伴い生産性も低下してしまう。そこで、ミニマムコストで最終膜厚を確保するには、この変形 (=ロス) を最小限に抑えることが最も重要であると考え、以下の検証を行った。

#### (1) 要因振らしテストによる影響要因の絞り込み

まず、溶射パラメーターの中で、要求品質特性の一つである膜厚と、仕上げ研削時に膜厚のロスを招く原因となる変形量に影響を与える要因を明確にするため、振らしテストを行い、結果を重回帰分析することにより各要因の影響度を確認した。Fig. 13 に膜厚と変形量に対する各要因の標準偏回帰係数を示す。

| Variables                            | Std. Partial Regression Coefficient |             |
|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------|
|                                      | Thickness                           | Deformation |
| Overspray (mm)                       | N.S.                                | -0.659      |
| Gun Traverse Speed (m/min)           | -1.176                              | N.S.        |
| Cooling Air Supply (L/min)           | N.S.                                | -0.159      |
| Spray Distance (mm)                  | -0.144                              | -0.633      |
| Number of Spray Layers (cycle)       | 0.899                               | N.S.        |
| Powder Feed Rate (g/min)             | 0.564                               | N.S.        |
| Adjusted Contribution R <sup>2</sup> | 0.815                               | 0.632       |

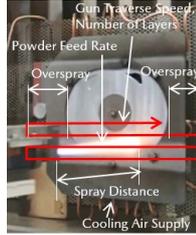


Fig. 13 Multiple Regression Analysis Result

これより、変形量に対しては、オーバースプレー（以下、OS）量，溶射距離，ワーク背面からの空冷エア流量の順で影響度が高いことが分かった。

このOS量とは、ガンを左右にオシレートさせながら溶射する際、ガンの移動速度を摺動面上で一定とするため、左右に幾分、摺動面幅より余分にオシレートさせる長さのことをいうが、これを長くする程、ワークが溶射フレームの熱源に照射されない時間が長くなり、その分だけ冷却時間が増えることで、ワークの温度上昇を抑えることができると考えられる。

Fig. 14 はアルミ材の平板（以下、TP）の背面に熱電対を取付け、溶射中の温度変化を測定した結果を示すが、OS量が大きい程、温度上昇が抑えられており、更に、最高到達温度が低い程、TPの変形量は小さくなることが分かった。

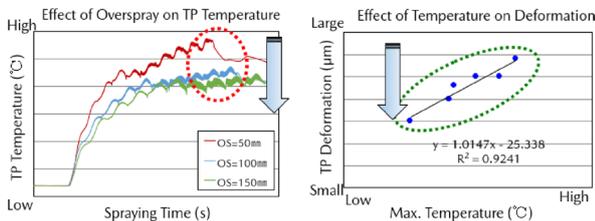


Fig. 14 Overspray vs. Temperature vs. Deformation

同様に、その他の有意な変形影響要因（溶射距離及び空冷）についても、ワークの温度上昇が抑えられる程、変形が抑制されることが確認された。

(2) 溶射変形のメカニズムの推定と対策の織り込み

これらの結果から、ワークの主たる変形メカニズムはアルミ基材と溶射皮膜（Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>系サーメット材）の線膨張係数の差に起因するバイメタル変形であると推定した。Fig. 15 に示すように、溶射中にフレームによりアルミ基材が加熱され、熱膨張した状態で溶射皮膜が成膜された後、溶射後の冷却過程でアルミ基材と溶射皮膜は、それぞれの線膨張係数（α）に応じた比率で収縮しようとする。この時アルミはCr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>系サーメット材に比べ、線膨張係数がはるかに大きい為、より大きく収縮しようとするが、溶射皮膜との界面部はアルミ表面に食い込んだ皮膜に拘束されるため、十分に収縮できない。これに対して、拘束のない背面側は大きく収縮するため、結果的にワーク中央部が上向きに凸状に変形する。

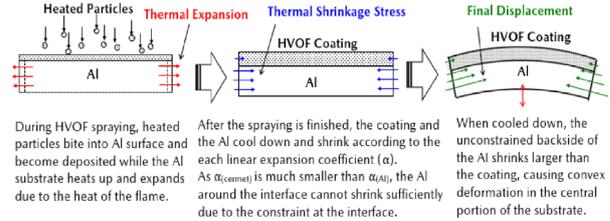


Fig. 15 Mechanism of Work Deformation

バイメタル変形は温度差と2種類の材料の線膨張係数の差（α<sub>(Al)</sub> - α<sub>(皮膜)</sub>）の積に比例すると考えられるが、αは材料固有の物性値であり変えることはできないので、溶射中の温度上昇（以下、ΔT）を抑えることが変形抑制のポイントになる。

ΔTを低減する方法としては、溶射距離を広げる（熱源である溶射フレームをアルミ基材から遠ざける）方法も考えられるが、この場合、要求品質特性である密着強度や膜厚の低下が懸念される。そこで、重回帰分析結果より、品質への影響度が低いと思われるOS量の拡大と空冷強化により対策することとした。

Fig. 16 に各要因とワーク変形量の関係を検証した結果を示す。これらにより、推定した理論どおりに変形抑制の効果が得られていることを確認した。

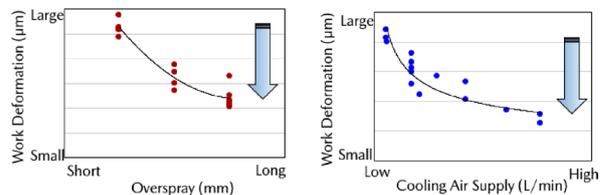


Fig. 16 Effect of Overspray and Cooling Air on Deformation

OS量の拡大については、生産性向上の効果も同時に狙うため、ワーク複数枚（4枚）を同時に連続溶射する方式（Fig. 17）を採用することとし、ワーク1枚当たりのOS量を拡大するとともに生産効率の向上を図った。これと合わせてワーク背面側の空冷エア流量を増加できるように、量産設備と治具の仕様を決定した。これらの対策を織り込むことにより、溶射変形を開発当初から大幅に（約70%）低減することができた（Fig. 18）。ロスを低減したことで、必要溶射膜厚も減らすことが可能となり、溶射コストを大幅に抑えることができた。

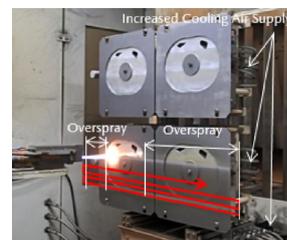


Fig. 17 Continuous Spraying on Four Works

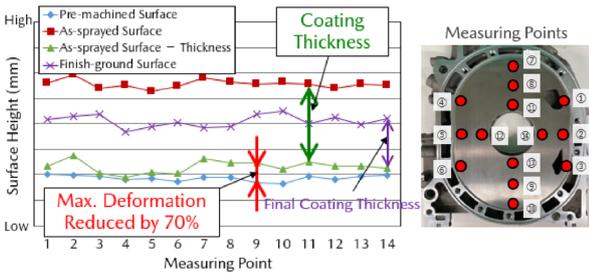


Fig. 18 Coating Thickness and Work Deformation

3.4 皮膜研削方式の決定

溶射後の皮膜表面は粗さが大きく、摺動面としてシール部材を滑らかに摺動させるためには、仕上げ研削で表面を高い精度で平滑に仕上げる必要がある。また、溶射皮膜は非常に高硬度な難削材であり、これを限られたサイクルタイム内で平滑に仕上げるには、粗残り（未研削部 = 品質不具合）が発生しない範囲で、必要最小限の取り代で研削することが望ましい。

しかし、溶射後の皮膜表面の高さは、上記の表面粗さに加え、膜厚自体の変動や溶射によるワーク変形、溶射前の摺動面のフライス加工の公差も含めて変動するため、通常の定寸研削方式（あらかじめNCで設定した寸法位置まで削る）の前提で、これらの変動を全て加味したねらい寸法を設定すると、研削代がかなり大きくなり、生産性の面から量産工程として成り立たせるのは難しい。

そこで、これまでシリンダーヘッド等の機械加工で構築してきた補正加工技術を研削工程に応用し、被研削面の高さに関係なく、常に必要最小限の取り代で研削できる定量研削の手法を新たに検討した。ドレスによる砥石径の変化や設備熱変位による研削精度の変動をNC上で補正する目的で平面研削盤内に導入した機内タッチセンサーを最大限活用することで、サイクルタイムと品質（粗残りなきこと）を両立できる方法を考案した。

Fig. 19 に従来の研削方法と、今回考案した方法を示す。

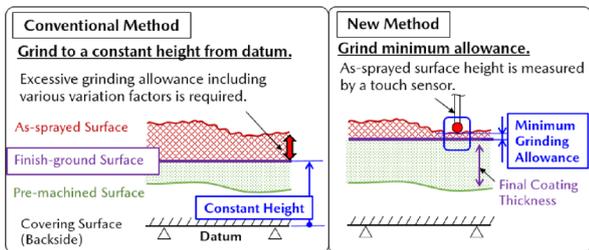


Fig. 19 Comparison of Grinding Methods

従来の研削では、被研削面の反対側のカバー面を基準に定寸研削を行っていたが、この方法では前述のとおり、溶射前の加工精度や溶射膜厚のバラツキ等を全て加味した、過剰な必要溶射膜厚及び研削取り代を設定する必要があるため、溶射コストや研削サイクルタイムが過大となる問題があった。これらのバラツキに対しては、前加工精度の向上や溶射膜厚の精密制御といった対策が考え

られるが、設備や工法の限界を考えると容易ではない。そこで、前加工精度や膜厚変動によらず、研削取り代を最小化することが理想と考え、定量研削方式の適用を目指した。

定量研削の手順としては、まず溶射皮膜表面上の高さをタッチセンサーで多点計測し、研削盤基準で最も低い位置を割り出し、その位置における高さから一定の研削取り代を引いた値を研削終了高さとする。一連の平面研削を行った後、研削面の高さをタッチセンサーで再度測定し、NC上のねらい高さとの誤差を次サイクルで補正することで継続的に品質の安定化を図るとともに、研削後のワーク全高が図面公差内に入っていることを全数保証する。

この定量研削方式を適用する上での課題と、その取り組み結果を以下に示す。

(1) 溶射皮膜表面の凹凸に対する測定精度保証

溶射後の皮膜表面は粗く、凹凸が激しいため、その影響を受けない最適なタッチセンサーの先端径を決定した。検証テストの結果、実サイクルにて、ワーク脱着込みの繰り返し精度が十分確保できることを確認した。

(2) 測定ポイントの決定

被研削面の高さは前加工精度やワーク変形、膜厚バラツキにより変動する。タッチセンサーで比較的高い位置の高さを測定して定量研削の基準とした場合、相対的に低い位置で研削代が不足し、粗残りが発生してしまう。これは多点測定して最も低い位置を割り出すことで解決できるが、測定サイクルタイムを増加させないためには、測定点数を必要最小限に留める必要がある。そこで溶射によるワーク変形や前加工精度の傾向を詳細に分析した上で、Fig. 20 に示す 10 点の測定点に絞り込み、N 増しテストで粗残りが発生しないことを確認した。

(3) 研削取り代の決定

研削サイクルタイムを最小化するためには、粗残りが発生しない範囲で最小限の取り代に設定する必要がある。そこで、Fig. 20 に示す溶射皮膜表面の Rz 粗さの実力値を理論上の必要最小取り代と考え、これにバラツキを考慮した上で、量産における必要最小研削代を決定した。

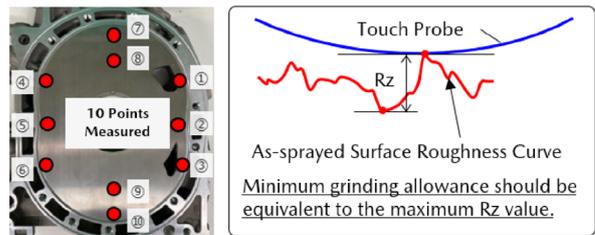


Fig. 20 Measuring Points and Grinding Allowance

上記の結果を織り込み、定量研削方式を適用することで、粗残りを発生させることなく、必要溶射膜厚及び研削サイクルタイムを大幅に削減することができた。

また、溶射変形の大幅な低減と仕上げ研削における取り代の最小化により、必要溶射膜厚を減らすことができた結果、溶射層数（重ねて溶射する回数）を低減しても最終要求膜厚を確保することが可能となり、ミニマムコストで本技術を量産に適用することができた。

#### 4. おわりに

サイドハウジングのアルミ化に取り組み、15kg 以上／台の大幅な軽量化を達成することで、マツダ独自の進化を遂げた RE をお客様に提供するとともに、より高い環境性能と走る喜びの実現に貢献することができた。

今回開発した HVOF 溶射技術は、その皮膜の研削を含めて社内でも過去に量産経験が無く、全くの手探り状態からの開発であった。その中で、未知の課題一つ一つに対して基礎実験を積み重ね、データを定量的に掘り下げて検証し、理論的にメカニズムを明らかにするプロセスを地道に重ねることで、技術を手の内化し、量産化を実現することができた。今後も、カーボンニュートラルへの貢献と、“人馬一体”の走りを提供し続けるため、更なる技術革新への挑戦を愚直に続けていく。

最後に今回の技術開発及び量産適用にご協力いただいた社外協力メーカー、関係者の皆様に感謝の意を表したい。

#### 参考文献

- (1) 小田ほか：溶射技術によるアルミニウム合金鋳物の耐摩耗性向上，[マツダ技報, No.29, pp.110-114 \(2011\)](#)
- (2) 和田：高速フレーム（HVOF）溶射の現状と課題，表面技術，Vol.59, No.8 (2008)

#### ■著者■



山本 真司



中田 行俊



高橋 宏和



池田 雄一郎



岸田 高穂



岡田 保彦