

論文・解説

19

## 溶射技術によるアルミニウム合金鋳物の耐摩耗性向上 Wear Resistance Modification of Aluminum Alloy Casting by Thermal Spray Technology

小田 信行<sup>\*1</sup> 南場 智<sup>\*2</sup> 大下 敬之<sup>\*3</sup>  
Nobuyuki Oda Satoshi Nanba Takayuki Ohshita

### 要約

アルミ鋳物は、鋳鉄代替による軽量化を目的に多くの自動車部品に採用されているが、耐摩耗性不足が代替の課題になることが多い。耐摩耗性確保のための表面処理の一種である溶射は、材料選定の自由度が高く、また高い耐摩耗性が確保できることから、近年、高耐摩耗性が要求される摺動部品への溶射の適用が始まっている。本稿では、鋳鉄に窒化処理を施しているエンジン摺動部品をアルミ鋳物化するにあたり、サーメット溶射を適用しその仕様を検討した結果を紹介する。

これらの特性は、いずれも皮膜のHV硬さと強い相関があり、HV硬さを高めることで、鋳鉄窒化と同等以上の耐摩耗性を確保できる一方、HV硬さを下げれば耐スカッフ性が改善される。溶射粉末や溶射施工条件を最適化し適切なHV硬さを設定することで、エンジン摺動部品に適した耐摩耗特性を確保することができる。

### Summary

Aluminum casting is often adopted for automotive components as substitute for cast iron. And the wear resistance shortage often becomes the issue of replacement. In recent years thermal spray coating, which is one of the wear resistance modification method, is started to be applied to automotive components that demand high wear resistance, because it has flexibility of material selection and high potential of wear resistance. The application of the cermet spraying and the material specification were examined to replace aluminum casting with nitrided cast iron for engine components.

Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr high velocity thermal spray coating has high scuff limit and wear resistance. These sliding properties have a high correlation with HV hardness of coating. If coating hardness is HV 700 or more, wear resistance equivalent to nitrided cast iron can be obtained. And the lower coating hardness is, the higher scuff limit is. Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr thermal sprayed aluminum casting with proper coating hardness by optimizing powder and coating condition has suitable wear resistance as engine components.

### 1. はじめに

アルミニウム合金は、低比重・高熱伝導といった材料物性を活かし、多くの自動車部品に採用されているが、鋳鉄鋼に比べ軟質なため、耐摩耗性不足が課題の一つである。

表面処理の一種である溶射は、皮膜材料の自由度が高く特性確保が比較的容易、他の表面処理手法に比べ皮膜生成が速

い、複雑部材や大型部材への施工が容易、といった特長を有する。更に、近年のプロセス技術開発により弱点であった耐剥離性が大幅に改善されたことから、高耐摩耗性が要求される摺動部品への適用が始まっている<sup>(1)</sup>。

今回対象としたエンジン部品は、鋳鉄にガス軟窒化処理を施工し、高い耐摩耗性を確保している。アルミ合金化の開発目標を、現行同等以上の耐摩耗性の実現とし、摺動部への耐

\*1~3 技術研究所  
Technical Research Center

摩耗付与技術として、高速フレイムによるサーメット (CrCr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr) 溶射を選定した<sup>(2)</sup>。

一般に、耐摩耗性確保には、皮膜の緻密化・硬化化で対応するが、耐焼付き性、摺動抵抗等の摺動特性が悪化する場合も少なくない。本サーメット溶射皮膜においても、適用に応じた皮膜仕様を設定するには、皮膜仕様と要求特性との関係を明確にしておく必要がある。これまで、本溶射皮膜中の炭素量に注目し、皮膜の組織構造と物性の相関性を定量的に評価した研究例<sup>(3)</sup>はあるが、耐摩耗性や耐焼付き性といった摺動特性との相関性については充分把握されていない。そこで、溶射システム・条件を工夫することで、幅広い範囲で皮膜仕様を設定した溶射皮膜を作成し、摺動特性を中心に皮膜仕様との関係を詳細に調査した。

## 2. 開発の考え方

### 2.1 耐摩耗性付与技術

アルミへの耐摩耗性付与技術を比較検討するため、複合メッキ、溶射、陽極酸化等の表面処理を施工したテストピースを作成し、主に耐摩耗性の観点からスクリーニング評価を行った。Fig.1に往復摺動摩耗試験での評価結果を示す。本部品適用環境において鋳鉄窒化品と同等以上の耐摩耗性を示すのは、カーバイド系のサーメット溶射のみであった。

### 2.2 溶射プロセス

上記のスクリーニング結果よりカーバイド系材料の溶射皮膜を選択し、それらを高品質で実現する溶射プロセスを検討した。Fig.2に代表的な溶射プロセスの特徴を粒子速度とフレイム温度の関係で示す。粒子速度が高いほど粒子結合度や基材密着力が増し、溶射皮膜の緻密さ・硬さは高くなり、また、フレイム温度が高いほど高融点材料の適用が可能で、溶射材料の選択肢が広がることが知られている。

Table 1に、カーバイド系材料を溶射する場合の各種溶射プロセスの特徴を、投入エネルギーと皮膜特性で比較して示す。フレイム溶射やアーク溶射は投入エネルギーが小さく投資/コストの面は優位であるが、粒子間結合力や基材密着力が低い。一方、高速フレイム溶射やプラズマ溶射、爆発溶射は、投資/コスト面では不利であるが、特性の良い皮膜が得られる。

以上より、投入エネルギーと皮膜特性の両面から、バランス

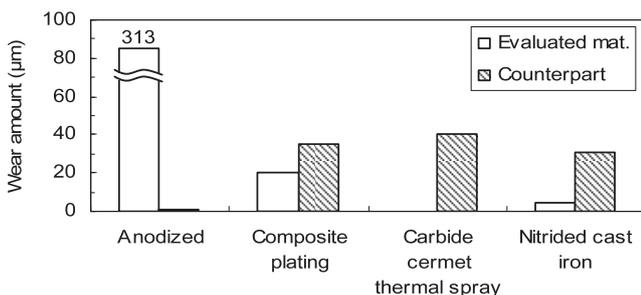


Fig.1 Wear Resistance of Various Surface Treatments

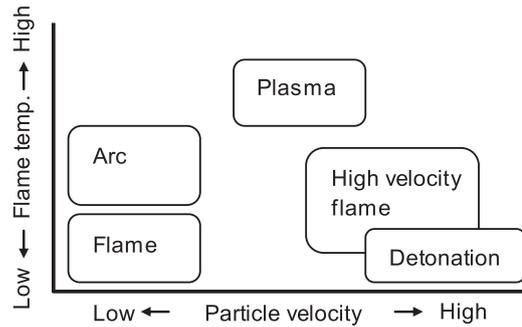


Fig.2 Schematic of Thermal Spray Process

Table 1 Process Comparison in Carbide Thermal Spray

Thermal source	Process	Energy	Interparticle cohesion	Adhesion
Combustion gas	Flame	4	2	2
	High velocity flame	2	4	4
	Detonation	1	4	4
Electricity	Arc	4	2	2
	Plasma	3	3	3

の良い高速フレイム溶射を選定した。

### 2.3 溶射材料

本部品で最も問題となる摩耗形態は、焼付きによるアドヘシブ摩耗である。そこで、溶射材料の選定には、ピンオンディスク試験による焼付き限界評価を用いた。試験条件をTable 2に示す。候補の溶射材料には、代表的な耐摩耗性材料であるCr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCrとWC-12Coを選択し、実際に摺動するシール部材2種を相手材として、焼付き限界評価に供試した。Fig.3に現行の鋳鉄窒化と比較して結果を示す。選定した溶射皮膜はいずれも鋳鉄窒化に比べ焼付き限界は同等以上で、Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCrがより良好であった。

以上より、溶射材料としてCr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCrを選定した。

Table 2 Scuff Limit Test Condition (Pin-on-Disk)

Load	Raised in stages to scuffing occurrence
Sliding speed	8m/s fixed
Lubrication	Engine oil 0W20: 100°C, 0.7ml/min
Counterpart	Seal A: Sintered iron alloy (Fe-3%C) Seal B: Boron added ductile cast iron

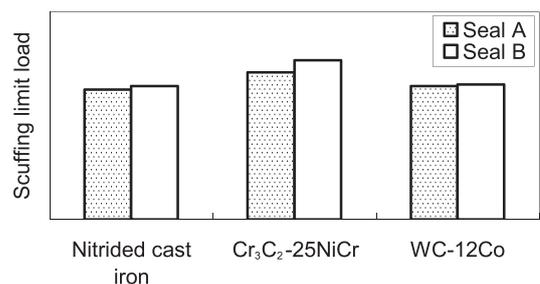


Fig.3 Scuff Limit Test Result

### 3. 実験方法

サーメット溶射の基本仕様として、溶射プロセスには『高速フレーム溶射』、溶射材料には『Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25NiCr』を選定した。実部品では、高い耐摩耗性だけでなく、低摺動抵抗や高皮膜密着力も同時に要求される。また、溶射の施工条件が異なれば、皮膜仕様も変動する。従って、適用に応じた皮膜仕様とそれを達成する溶射条件を設定するためには、皮膜仕様が要求特性に及ぼす影響を明確にしておかなければならない。そこで、溶射条件・システムを工夫することで仕様の異なる溶射皮膜を広い範囲で作成し、要求特性を評価して、これらの関連性を詳細調査した。更に、一部仕様を実機に織込み、これら関連性を検証した。

#### 3.1 溶射条件

溶射皮膜は、粒径の小さい粉末を使用し、溶射中の粉末(粒子)速度を速くすることで、緻密で硬さが高く、基材との密着力が高い皮膜が得られる。また、この逆の条件では、皮膜は疎になり硬さ・密着力の低い皮膜になる傾向を示す。この傾向を利用し、溶射材料の組成を固定し、溶射システム(燃料・溶射ガン)、溶射粉末の粒径、被溶射物との距離(W/D: work distance)を調整し、硬さをパラメータとして、仕様の異なる皮膜が得られるよう、条件設定を行った。

溶射システムとしては、①液体燃料(ケロシン)を用いるシステムと②気体燃料(プロピレン)と水冷ガンのシステムおよび③気体燃料(プロピレン)と空冷ガンのシステムを用いた。溶射速度は①、②、③の順で高い。粉末粒径は、細粒(10~38 $\mu$ m)と粗粒(15~45 $\mu$ m)の2グレードを用いた。W/Dは各システム、粒径に合わせて調整した。Table 3に溶射試作条件と狙いの硬さを示す。

#### 3.2 評価方法

実部品と同じアルミ鋳物合金(AC4B-T6)を基材とする試験片に、各条件で溶射を実施し、皮膜仕様と摺動特性、耐剥離性の関係性を評価した。

皮膜仕様を表す指標として、皮膜のHV硬さ、気孔率、および金属組織を調査した。

摺動特性は、ピンオンディスク試験装置を用い、耐摩耗性、耐焼付き性、摺動抵抗を評価した。評価装置概略をFig.4に、評価条件をTable 4に示す。耐焼付き性は2.3項と同

Table 3 Trial Production Condition

No	Coating spec (Target HV)	Spray gun [fuel]	Particle dia.( $\mu$ m)	W/D (mm)
1	>1000	WokaStar	10~38	300
2	1000	[Oxygen/kerosene]	15~45	
3	1000	DJ-2700	10~38	230
4	900	[Oxygen/propylene]	15~45	
5	800	DJ-Std#9 [Oxygen/propylene]	10~38	180
6	700		15~45	215
7	600		15~45	180

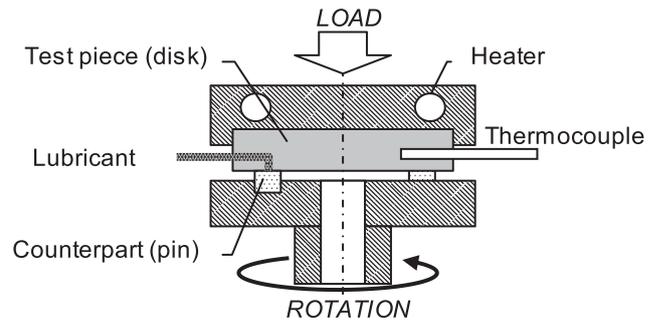


Fig.4 Schematic of Sliding Property Test Method

Table 4 Sliding Property Test Conditions

Mode	Wear resistance	Scuff limit	Frictional resistance
Metrics	Wear amount after 30 min.	Pressure at scuff occurrences	Coefficient of friction
Load	6MPa fixed	Raised in stages	2,4MPa
Speed	1m/s	15m/s	2.5 ~ 10m/s
Lubricant	No	Engine oil 10W-20 0.17ml/min (Room temp.)	
TP temp.	—	100°C	100°C

様に焼付き限界で評価しているが、試験片仕様間の差異を明確にするため、更に厳しい条件とした。相手材はいずれも実際に摺動するシール部材(鉄系焼結材)である。なお、摺動特性評価用の試験片は、ダイヤモンドでの研削により、表面粗さをRa: 0.10~0.16 $\mu$ mに揃えている。

耐剥離性評価は、溶射皮膜とアルミ鋳物基材との密着力へ溶射条件が及ぼす影響を把握するため、JIS H 8402「溶射皮膜の引張密着強さ試験法」に準じて実施した。

## 4. 実験結果と考察

#### 4.1 皮膜仕様

Fig.5に、各皮膜仕様のHV硬さと気孔率、金属組織を示す。粒子速度の大きい仕様(番号の若い仕様)ほど、HV硬さが高く気孔(金属組織中黒く見える部分)が少なく、緻密な皮膜が形成されていることが分かる。狙い通り、特性の異なる皮膜を得ることができた。

#### 4.2 摺動特性

Fig.6にHV硬さと耐摩耗性評価での摩耗量の関係を示す。HV硬さが高いほど摩耗量は小さく、皮膜硬さと耐摩耗性には高い相関関係がある。またHV700以上の仕様については、現行量産仕様に比べ摩耗量は少ない。Fig.7に皮膜のHV硬さと相手材(鉄系焼結材)の摩耗量との関係を示す。両者に明瞭な相関関係は見られず、かつ、現行鋳鉄窒化での摩耗量と同等以下である。本皮膜仕様の相手攻撃性は、HV硬さに寄らず現行鋳鉄窒化と同等以下である。

Fig.8に皮膜硬さと焼付き限界面圧の関係を示す。硬さが低いほど、焼付き限界面圧は高い。Fig.9に気孔率との関係を示すが、焼付き限界面圧と更に高い相関関係が認められ

る。硬さが低いほど皮膜中に存在する気孔は多く、この気孔がオイルピットの役割を果たし焼付き限界が向上したものと考える。なお、気孔率が低く（1%以下）、焼付き限界面圧が低いNo.1～3（HV1,000レベル）においても、現行鑄鉄窒化（図中点線）と同等の焼付き限界面圧であり、本サーメット溶射は高い耐焼付き性を有すると考える。

Fig.10および11に面圧2MPaおよび4MPaでの摩擦係数を示す。いずれの皮膜仕様においても、摺動抵抗は現行鑄鉄窒化よりも小さく、特に面圧の低い場合に小さい。面圧が高くなると、油膜形成が困難となり摩擦係数が増える傾向にあると考える。なお、鑄鉄窒化は面圧に対しほとんど変化しないが、これは摺動面に黒鉛脱落による比較的大きなオイルピットが存在し、面圧の大小に寄らず同様の油膜が形成されるためと考える。

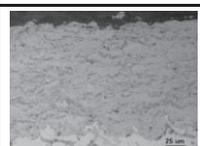
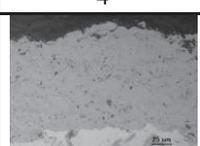
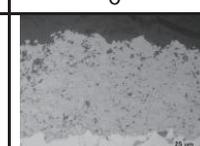
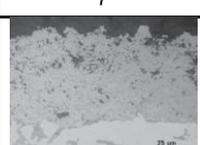
1	2	3
		
Hardness(HV)1010	1000	980
Porosity(%) 0.8	0.6	0.4
4	5	6
		
920	780	700
1.4	2.7	5.3
7		
		
550		
6.1		

Fig.5 Metal Structure and HV Hardness of Each Coating

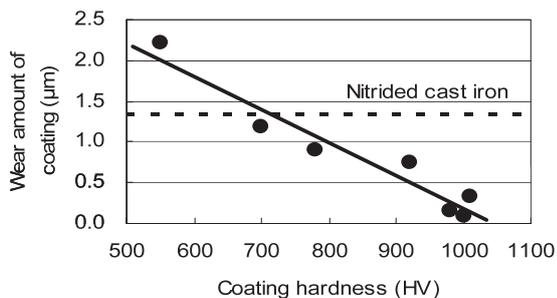


Fig.6 Wear of Coating Against Coating Hardness

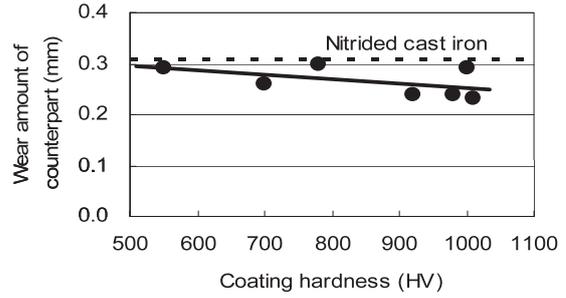


Fig.7 Wear of Counterpart Against Coating Hardness

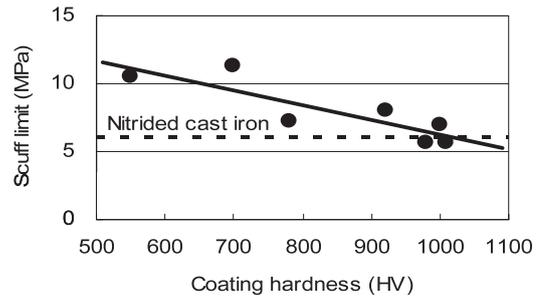


Fig.8 Scuff Limit Against Coating Hardness

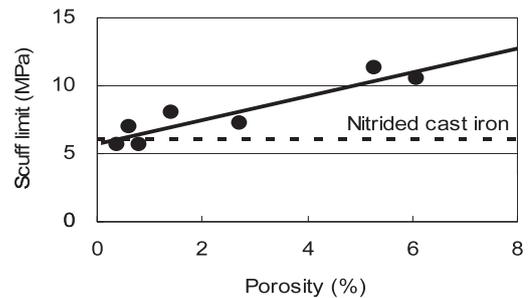


Fig.9 Scuff Limit Against Porosity

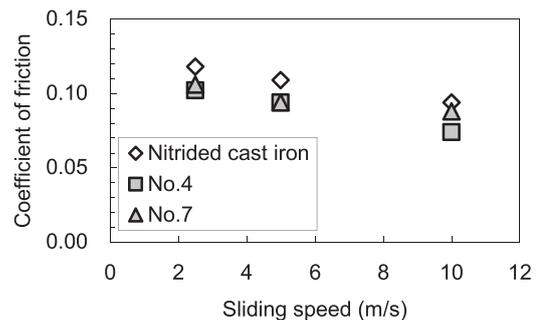


Fig.10 Coefficient of Friction at 2MPa

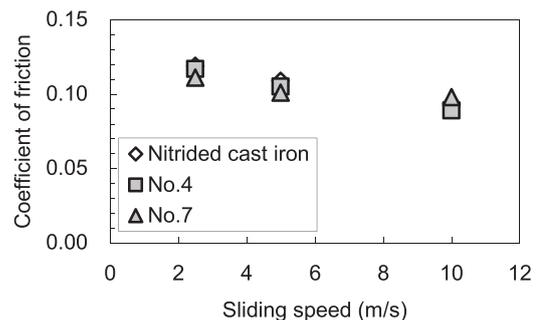


Fig.11 Coefficient of Friction at 4MPa

### 4.3 耐剥離性

Fig.12に引張密着強さ試験結果を示す。本試験方法は、溶射皮膜と基材間に剥離が生じる際の応力で、密着力を定量化するものである。しかしながら、今回の皮膜仕様では、溶射皮膜と基材の剥離はなく、溶射皮膜と接着剤の界面で剥離した。基材がアルミ鋳物で軟質であるため、溶射皮膜の機械的嵌合が強く、非常に高い皮膜密着力が得られるものと考えられる。今回の評価では、いずれの皮膜も接着剤強度（70MPa程度）と同等以上の密着力を有することが確認できた。

### 4.4 皮膜仕様の実機検証

試験片でのリグ評価により、耐焼付き性、耐摩耗性、耐剥離性といった要求特性は、HV硬さをパラメータとして整理できることがわかった。実部品に施工し耐久試験を行い、要求特性とHV硬さの関連性を検証した。Fig.13に、リグ試験と実機試験での摩耗量、および摺動面の拡大写真を示す。実機においても溶射皮膜は現行鋳鉄窒化と同等の滑らかな摺動面を呈しており、摩耗量はHV硬さと高い相関があることが判った。

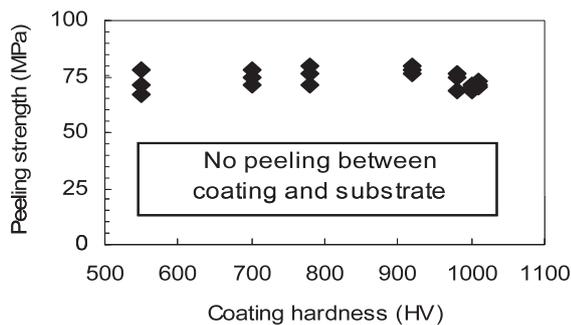


Fig.12 Peeling Strength

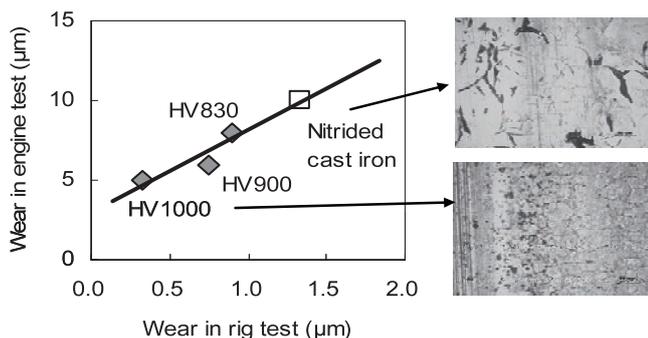


Fig.13 Wear Relationship between Rig and Engine Test

## 5. まとめ

高耐摩耗性が要求されるエンジン摺動部品のアルミ鋳物化を図るにあたり、耐摩耗性付与技術として $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-}25\text{NiCr}$ の高速フレーム溶射を選定した。適用に応じた皮膜仕様を設定するため、広い範囲でHV硬さを設定した溶射皮膜を作成し、皮膜仕様と摺動特性との関係を調査することで、以下の知見を得た。

- (1) 耐摩耗性は、HV硬さと高い相関があり、HV700以上の硬さであれば鋳鉄窒化並みの耐摩耗性を得ることができ。相手攻撃性は、HV硬さに寄らず鋳鉄窒化以下である。
- (2) 耐焼付き性は、HV硬さが低いほど良好であるが、これは皮膜中の気孔が増え、オイルピットの役割を果たすためと考えられる。
- (3) 摺動抵抗は、いずれの仕様においても鋳鉄窒化よりも小さい、特に面圧の低い場合に小さくなる。

最後に、本研究開発を進めるにあたり多大なご協力をいただいた社外の関係者の皆様に深謝します。

## 参考文献

- (1) 池田ら：新型高性能V6エンジン用シリンダブロックの開発，自動車技術会学術講演会前刷集，No.75-08 (2008)
- (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)
- (3) 園家ら：HVOF溶射による $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ 皮膜の組織構造と物性の相関性，溶接学会論文集，第21巻 第1号 (2003)

## 著者



小田 信行



南場 智



大下 敬之