

ギヤ内蔵型圧縮機へのアブレードブル溶射技術の適用

Abradable Properties of Thermal Sprayed Coating for Integrally Geared Compressor

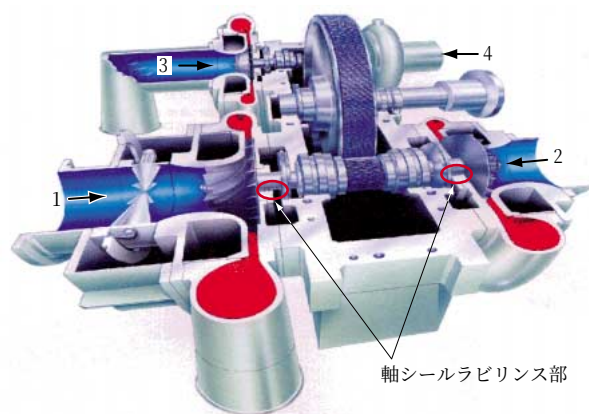
園 家 啓 嗣 技術開発本部生産技術センター生産技術開発部 課長 工学博士 技術士（金属部門，総合技術監理部門）
若 林 元 航空宇宙事業本部生産センター生産企画部
田 畠 一二三 技術開発本部基盤技術研究所機械要素研究部
堀 内 正 昭 株式会社アイテック

ギヤ内蔵型圧縮機のノークリアランス軸シールラビリンス部に溶射法を用いて粉末のアブレードブル材を積層する技術を検討した。この結果，Al/Si-ポリエステル溶射の場合，密着強度は一般的なアブレードブル溶射法で得られる5.0 MPaである。曲げ延性も特に問題ない。必要な最重要特性である被削性は，切削粉が細かい粒子になることから非常に優れていることが明らかとなった。Al/Si-ポリエステル溶射は，乾燥大気環境下では最も優れたアブレードブル溶射皮膜であると判断できる。

Thermal spraying of a powder of abradable metals on the surface of the no-clearance labyrinth shaft seal for the integrally geared-type compressor was investigated. The adhesion strength of Al/Si-polyester sprayed coating was about 5.0 MPa, which is the value obtained by conventional abradable spraying. Bending elongation was good. The abradable property was recognized to be very good, because abradable products become fine particles. The Al/Si-polyester sprayed coating is most superior type of abradable sprayed coating under atmospheric dry conditions.

1. 緒 言

当社は各種のターボ圧縮機を製作し販売している。このなかで，**第1図**に示すギヤ内蔵型圧縮機（小型高压）のノークリアランス軸シールラビリンス部には，従来アブレードブル材としてホワイトメタル（Pb-Sn 合金）の鑄込みが適用されていた。しかし，圧縮機稼働中のフィンへの作用力を低減させるため，より被削性の良好な材質が求められていた。



（注）数字 1, 2, 3, 4 は空気の吸入口を示す。

第1図 代表的なギヤ内蔵型圧縮機
Fig. 1 Typical geared-type compressor

圧縮機ラビリンス部には試験的に溶射を適用したことがあるが，今回，切削粉を微細な粒子状で飛散できるように溶射法を用いて，粉末のアブレードブル材を積層する技術を本格的に検討し，圧縮機の長期にわたる品質の安定化を目指した。

2. 試験方法

2.1 供試材料

文献による調査結果および今までの経験から，アブレードブル材として適切と考えられる下記の溶射材料と溶射方法に絞って，軟鋼基材に溶射したサンプルを試験材として使用した。また比較材として，ホワイトメタルの鑄込みサンプルを使用した。

（1）試験材

Al/Si-ポリエステル（以下，皮膜①と呼ぶ）

溶射方法 大気プラズマ溶射

ホワイトメタル（以下，皮膜②と呼ぶ）

溶射方法 高速ガスフレイム溶射

材質，記号 Pb-Sn合金，WJ2

（2）比較材

ホワイトメタル鑄込み（以下，鑄込み材と呼ぶ）

材質，記号 Pb-Sn合金，WJ9

2.2 試験項目

溶射試験材について、以下のように最重要特性である被削性、密着強度および曲げ延性などの性能を鋳込み材と比較評価した。

(1) 顕微鏡組織観察

各種溶射試験材組織と鋳込み材の組織を観察した。

(2) 密着強度評価

軟らかいアブレーダブル材を溶射する場合は、基材と皮膜間の密着性が必要なため、JIS 規格 (JIS Z 7721) に準じて接着剤を用いた密着強度試験を実施し⁽¹⁾、皮膜の密着強度を比較評価した。

(3) 被削性評価

保有する大型軸シール試験装置を実機圧縮機に近い高速回転 (周速 : 50 m/s) ができるように改造し、溶射サンプルについて圧縮機を模擬したフィンに対する被削性を、鋳込み材と比較評価した。また、摩擦熱の程度を定性的に調査するため、切削面近傍 (表面から 6 mm 程度内側の位置) の温度を測定した。

(4) 曲げ延性評価

組立中のひずみを想定し、3 点曲げ試験を実施し曲げ延性を比較評価した。評価は表面に割れが発生する時点を割れ発生限界ひずみとした⁽²⁾。

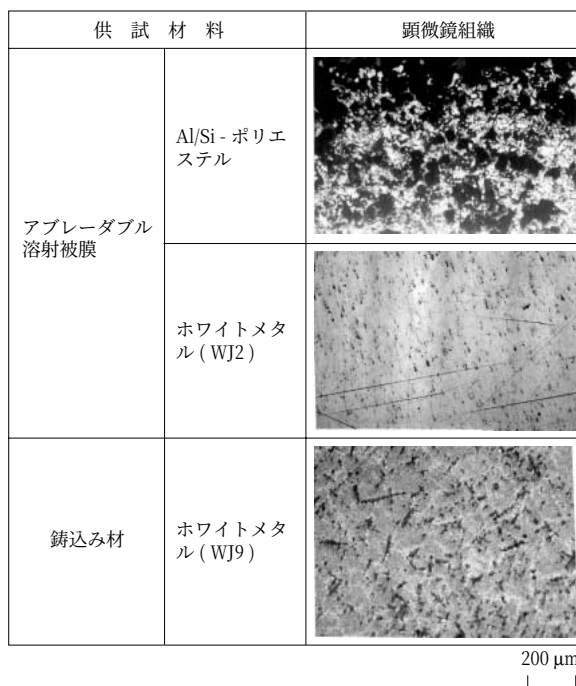
3. 試験結果

3.1 顕微鏡組織観察結果

アブレーダブル溶射皮膜 (皮膜 ①, ②) と鋳込み材の顕微鏡組織を第 2 図に示す。皮膜 ① は Al/Si のマトリックスにポリエステルが均一に分散する組織であった。また皮膜 ② は、ち密な組織であった。鋳込み材は空孔などが認められるが、ち密な組織であった。

3.2 密着強度評価結果

アブレーダブル溶射皮膜 (皮膜 ①, ②) と鋳込み材の密着強度測定結果を第 1 表に示す。皮膜 ① の平均密着強度



第 2 図 アブレーダブル溶射皮膜と鋳込み材の顕微鏡組織
Fig. 2 Micrographs of abrasion-resistant sprayed coatings and cast alloy

は 5.0 MPa であり、エンジンの大気プラズマ溶射を用いたアブレーダブル溶射皮膜の実績と比較すると満足な値である。一方、皮膜 ② は高速ガスフレイム溶射を使用したため、平均密着強度は 11.48 MPa と高かった。なお、鋳込み材の平均密着強度は 33.7 MPa であった。

3.3 被削性評価結果

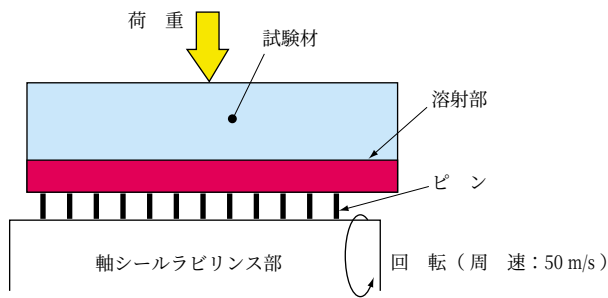
被削性試験装置の概要を第 3 図に示す。実機圧縮機に近い高速回転 (周速 : 50 m/s) で、アブレーダブル溶射皮膜 (皮膜 ①, ②) と鋳込み材の被削性試験結果を第 4 図 ~ 第 6 図に示す。

皮膜 ① は第 4 図に示すように、切削面にはピンによる円周方向の幅 2 mm 程度の溝が生じているが、溝に沿ってはがれもあり皮膜にもろさも認められる (- (a))。摩耗粉は大部分が直径数 μm 程度の非常に細かい粒となることが明らかとなった (第 4 図 - (b), - (c))。切削面近傍の温

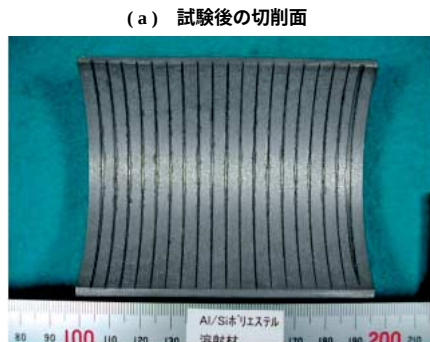
第 1 表 密着強度測定結果
Table 1 Bond strength of sprayed coatings and cast alloy

材 質	試験回数	膜 厚 (mm)	破断荷重 (N)	破断面積 (cm ²)	密着強度 (MPa)	平均密着強度 (MPa)	破断位置	破断位置の概略図
Al/Si - ポリエステル溶射	1	2.0	2 499	4.9	5.1	5.0	D	
	2	2.0	2 401	4.9	4.9		D	
ホワイトメタル (WJ2) 溶射	1	2.0	5 247	4.9	10.71	11.48	C	
	2	2.0	6 002	4.9	12.25		C	
ホワイトメタル (WJ9) 鋳込み材	1	9.0	15 974	4.9	32.6	33.7	C	
	2	9.0	17 003	4.9	34.7		C	

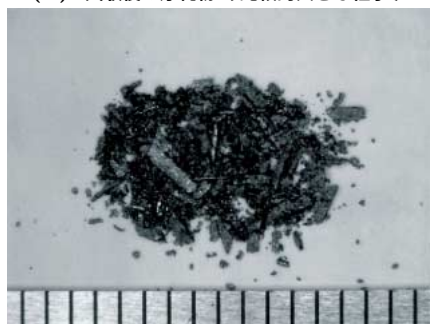
(注) JIS Z 7721 に準じる。



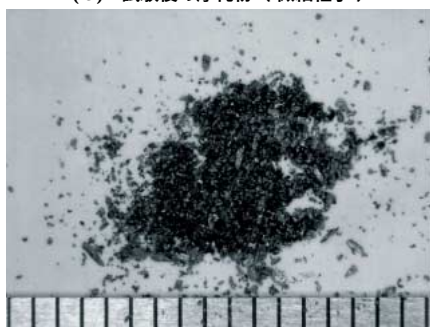
第 3 図 被削性試験装置の概要
Fig. 3 Machinability testing device



(a) 試験後の切削面



(b) 試験後の摩耗粉 (比較的大きな粒子)

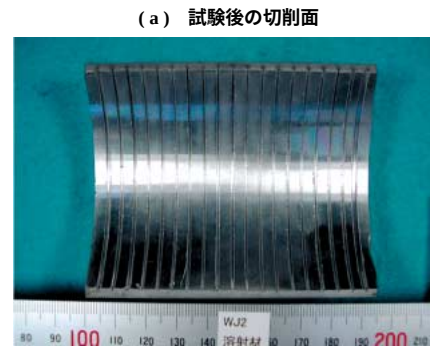


(c) 試験後の摩耗粉 (微細粒子)

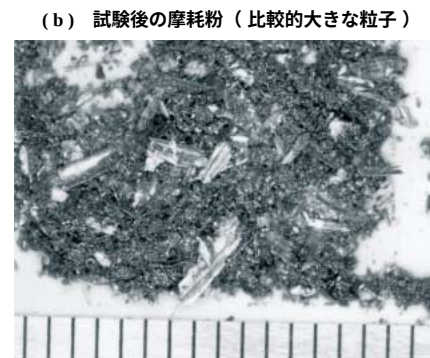
第 4 図 Al/Si - ポリエステル溶射皮膜の被削性試験結果
Fig. 4 Machinability test results of sprayed coating of Al/Si and polyester mixture

度もほとんど上昇せず、ピンと切削面の間には摩擦熱の発生がほとんどないと考えられる。以上の結果から、皮膜①の被削性は非常に優れていると判断できる。

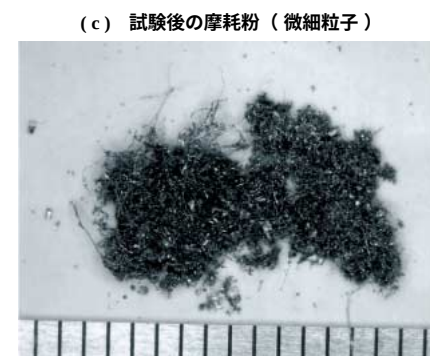
皮膜②は第 5 図に示すように皮膜①と同様、切削



(a) 試験後の切削面



(b) 試験後の摩耗粉 (比較的大きな粒子)



(c) 試験後の摩耗粉 (微細粒子)

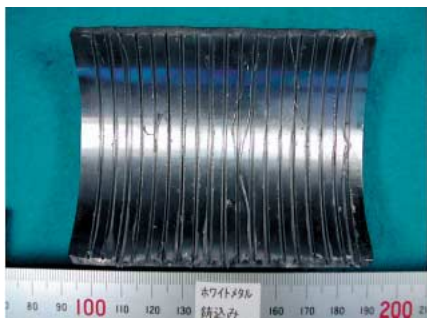
(注) 試験材: 被膜②

第 5 図 ホワイトメタル (WJ2) 溶射皮膜の被削性試験結果
Fig. 5 Machinability test results of sprayed coating of white metal (WJ2)

面にピンの切削による溝 (幅 2 mm 程度) が認められた (- (a)). ち密な組織であることから、もろさは全く認められなかった。摩耗粉は比較的小さいものと細かい粒子状のもの (数百 μm) が混在していた (第 5 図 - (b), - (c)). また、切削中に温度が 100°C 程度まで上昇していることから、ピンと切削面の摩擦によって熱が発生していると考えられる。したがって、皮膜②の被削性は皮膜①より劣ると判断できる。

鋳込み材は第 6 図に示すように、切削面にピンの切削による溝 (幅 2 mm 程度) が生じていた (- (a)). 組織はち密でありもろさは全く認められなかった。摩耗粉は試験片と同じ長さのひも状のものが多数認められた (第 6 図 - (b), - (c)). また、切削中に温度が 150°C 程度まで上昇す

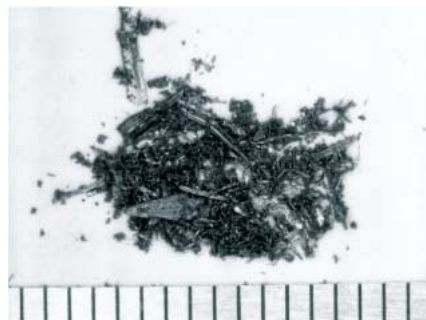
(a) 試験後の切削面



(b) 試験後の摩耗粉 (大きな粒子)



(c) 試験後の摩耗粉 (比較的大きな粒子)



(注) 試験材：鋳込み材

第 6 図 ホワイトメタル (WJ9) 鋳込み材の被削性試験結果
Fig. 6 Machinability test results of cast white metal (WJ9)

ることから、ピンと切削面との接触による摩擦熱が多量に発生していると考えられる。したがって、被削性は非常に劣ると判断できる。

以上のことから、アブレーダブル溶射皮膜は鋳込み材よりも被削性が優れており、特に皮膜①は非常に優れた被削性をもつことが明らかである。

3.4 曲げ延性評価結果

アブレーダブル溶射皮膜 (皮膜①, ②) と鋳込み材の 3 点曲げ試験結果を第 2 表に示す。皮膜①の割れ発生限界ひずみは平均 0.47%、皮膜②のそれは平均 0.61% であり、一般的な耐摩耗性溶射皮膜 (割れ発生限界ひずみ: 0.2%程度) より曲げ延性は良好であると考えられる⁽²⁾。なお、鋳込み材の割れ発生限界ひずみはいずれも 3.4%以

第 2 表 3 点曲げ試験結果

Table 2 Three-point bending test results of sprayed coatings and cast alloy

材 質	試験回数	割れ発生限界ひずみ (%)	試験片の取付状況
Al/Si-ポリエステル溶射	1	0.41	
	2	0.53	
ホワイトメタル (WJ2) 溶射	1	0.66	
	2	0.57	
ホワイトメタル (WJ9) 鋳込み材	1	>3.4	
	2	>3.4	

(注) 1. 割れ発生限界ひずみは被膜表面に割れが発生した時点の曲げひずみを示す。

2. ホワイトメタル鋳込み材の場合は、測定器の能力 3.4%でも割れが生じなかったため、3.4%以上とした。

3. () は平均値を示す。

上であった。

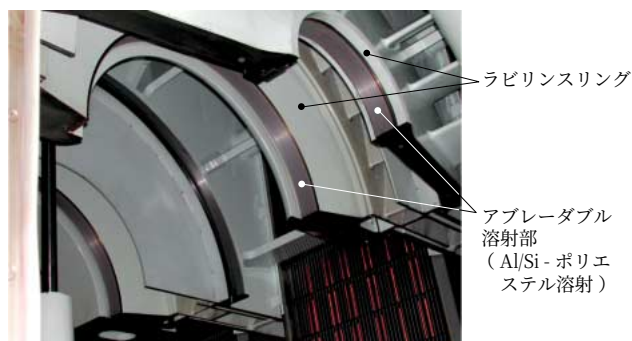
3.5 総合評価

皮膜②の場合、密着強度、曲げ延性は良好であるが、最重要特性である被削性は皮膜①より劣る。鋳込み材は密着強度、曲げ延性は優れているが、最重要特性である被削性については最も劣る。

一方、皮膜①の場合、密着強度は大気プラズマ溶射法で得られるアブレーダブル溶射皮膜の一般的な値である 5.0 MPa 程度を有している。曲げ延性も特に問題ない。最重要特性である被削性は、切削粉が細かい粒子になることから非常に優れていると考えられる。したがって、皮膜①は乾燥大気環境下では、最も優れたアブレーダブル溶射皮膜であると判断できる。

4. 圧縮機ラビリンス部への適用

皮膜①は最重要特性である被削性が非常に優れていることが明らかとなった。大気圧縮機の軸シールラビリンス部にはエンジン関係の実績を基に、すでに Al/Si-ポリエステル溶射を施工した機種もあるが、実機と同じ条件で耐久試験を実施した。小型のギヤ内蔵型大気圧縮機のノークリアランス軸シールラビリンス部に溶射を適用した。ラビリンスリング内側に Al/Si-ポリエステルを 3 mm 程度の膜厚に大気プラズマ溶射し、研削・研磨で 2 mm 厚さに仕上げた。溶射されたラビリンスリングは曲げ応力が掛からないよう配慮し、大気圧縮機の軸シールラビリンス部に組み込んだ (第 7 図)。その後、客先の実ラインで稼働を開始した。



第 7 図 圧縮機軸シールラビリンス部への溶射適用
Fig. 7 Application of thermal spray to labyrinth shaft seal of compressor

5. 結 言

Al/Si-ポリエステル溶射は、アブレーダブル溶射で最重要特性である被削性については非常に優れていることが実証された。溶射を適用したギヤ内臓型圧縮機は乾燥大気環

境下で、稼働後 1 年以上経過しても効率低下などの問題は特になく、長期にわたる品質の安定性が期待できる。今後、アブレーダブル溶射技術の適用範囲を広げていく。

— 謝 辞 —

本研究の実施に当たり、株式会社アイメックの佐伯圭一氏には実験面で多大なご支援をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 園家啓嗣ほか：プラスチックシート製造用ロールへの溶射法の適用 石川島播磨技報 第 42 巻第 3 号 2002 年 5 月 pp.146-150
- (2) 難波一夫ほか：耐高温腐食・耐摩耗溶射材のボイラへの適用 石川島播磨技報 第 38 巻第 3 号 1998 年 5 月 pp.181-188