

部品の長寿命化と部品の機能回復に役立つ MSCoating 技術

MSCoating ; Useful for Life Elongation and Recovery of Parts

落合 宏行 航空宇宙事業本部 技監
渡辺 光敏 航空宇宙事業本部生産センター生産企画部 主査
荒井 幹也 航空宇宙事業本部技術開発センター材料技術部 部長
吉澤 廣喜 技術開発本部基盤技術研究所材料研究部 主幹

耐摩耗性など航空エンジンに限らず部品の寿命延長に有効で、また、従来は廃却にせざるをえなかった部品を修理によって回復できる技術 MSCoating を開発し、適用を開始している。長期的にみれば、省エネで環境に優しい技術である。微少放電のエネルギーを使い金属の表面に、摩耗し難い性質、風化し難い性質、酸に犯され難い性質、熱を伝え難い性質などを局所に付けることが可能である。前処理、後処理が不要で、小さな設備で流れ生産のラインに組み込むことが可能である。

IHI has developed revolutionary cladding technology named MSCoating, which can build up functional cladding, which is effective to prolong jet engine parts and others. Such machinery parts, which were previously scrapped due to repairing difficulty, can be repaired. MSCoating helps save energy and is good for the ecology. IHI has already applied MSCoating to aeroengine parts and gas-turbine repair parts for electric power plants. MSCoating can add anti-wear, anti-erosion, oxidation resistance, thermal barrier, and other characteristics locally to metal surface by micro-pulse electric discharge energy. This eliminates pre- and post-treatment such as cleaning and masking processes in production. Due to compactness, the MSCoating machine can easily be incorporated in production flow lines.

1. 緒 言

ジェットエンジンは高温および高圧のもとで、高速回転するため、部品には高強度、高品質、高信頼性が求められる。また、燃料消費率および推重比（エンジン重量当たりの推力）向上を特長とする高性能化への要求とともに、近年の環境適合性の要求は年を追うごとに高まっている。特に燃料消費率の向上は燃料の節約に直結し、経済性ばかりでなく地球環境にも良い。これらの高性能化要求にこたえるため、エンジンの軽量化およびタービンの高温化と圧縮機の高圧化が求められる。

一方、エンジンは使用時間に伴い、性能劣化が生じる。この主要因の一つが、摩耗による回転部品と静止部品のすき間の増大である。圧縮機では、動翼先端が静止部のケーシングとこすり摩耗する。この結果、チップクリアランスと呼ばれる翼先端のすき間が増えることで、圧縮された空気が翼先端部で逆流してしまう。タービンでも同様で、チップクリアランスの増加で、燃焼ガスがタービン動翼を回す仕事をせずに通抜けしてしまう。

エンジンには翼先端以外にも、空気や燃焼ガスの漏れを防ぐためのシールが多数存在する。ラビリンスシール

では、回転する薄いフィンの先端が摩耗すると、空気の漏れが増大し性能低下につながる。そのほかにも、エンジンの前から飛び込む砂などが翼に衝突することによって発生するエロージョンによる圧縮機翼の形状変化、特に翼前縁の形状の変化および翼面の粗さの劣化がある。さらに、燃焼器の燃料ノズルにおける燃料の微粒化性能の劣化による不均一燃焼などが、経年変化に伴う性能劣化の原因として考えられる。

また摩耗した部品は、オーバホールによって、修理もしくは新品に交換することで性能を復帰させる。しかし、修理では溶接のように熱を加えることが多く、加工に伴う変形が大きいと、部品の形状と品質を復帰できないことも多い。修理できない場合は新品と交換になるが、これは、新品としての新たなコストと環境負荷を生じることになる。

当社は三菱電機株式会社と共同で耐摩耗性など多くの機能性肉盛を、部品に変形を与えることなく安価に形成する MSCoating と呼ぶ技術を開発し、適用開発を進めている。従来の技術では不可能な狭い溝の奥にも、小さい径の穴の内面にも肉盛を行えるので、従来は廃却していた部品を容易に修理することが可能になり、環境負荷の

低減に貢献できる。

2. 開発の経緯と現状

基本技術である放電コーティング技術は、金型や工具などの表面にセラミックスのコーティングを付ける加工において一部実用化されていた。この技術をベースに両社が共同で開発した。

民間航空機用エンジンの低圧タービン (LPT) 翼の先端に発生する振動を抑えるために設けられているシュラウドの擦動面には、エンジンでは一般的に付けられているハードフェース (高温耐摩耗性のコバルト合金の肉盛溶接) が採用されていなかった。エンジンが実際の航空機に搭載されて、ハードフェースなしでは摩耗が大きく設計変更が必要になった。従来の溶接による肉盛を採用するとコストが高くなり過ぎるので、コストを下げることを目的に新技術を開発した。

最初は、すでに開発されていたセラミックスの薄いコーティングの採用をエンジン部品設計部門に働きかけたが、溶接と同種の厚い金属の肉盛の開発を要求され、金属を厚く盛る技術を開発した。

開発された技術は、汎用技術でありいろいろな部品に、いろいろな機能を付けることができ、変形を起さず熱影響部がほとんどないので、加工ミスによる不具合部品の補修、摩耗してしまった部品の修理に有効である。

民間航空機用エンジンの LPT 翼への適用開発は、各種要素試験を行い、その結果をそのエンジンの共同開発者であるアメリカのエンジンメーカーに示し、実機エンジンでの耐久試験を行い、従来の方法よりも良い成果を得た。アメリカの連邦航空局の承認も得て量産初期部品の機体への搭載も行われた。現在は、素材の変更など本格量産のための準備が終わった段階である。

また、防衛省向けのエンジンで、磨耗の激しかった部品に MSCoating を適用することで部品交換の回数を大幅に削減し、財団法人防衛調達基盤整備協会から協会賞を受賞した。

開発エンジンの部品の補修およびガスタービンの部品の修理に適用し、エンジン納期の確保および費用削減に貢献している。

3. MSCoating の概要

MSCoating は、金属やセラミックスなどのコーティング成分を含むコーティングブロック (以下、C/B と呼ぶ)

を用いて放電のエネルギーを利用することによって、耐久性、耐摩耗性に優れた高品質な機能性被膜を安定的に形成する技術である。

熟練技能者や前後処理を必要としないため、生産ラインの自動化、省力化に適しており、溶射装置、めっき処理装置、蒸着炉などの高価な設備が不要なことから、製造工程を簡素化することができ、大幅なコスト削減が可能になる。

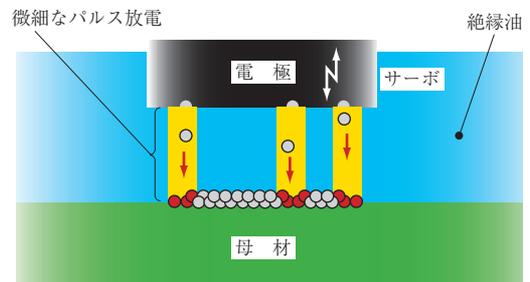
3.1 MSCoating の原理

コーティングさせたい材料の粉末を固めて C/B とし、被処理材とともに絶縁油の中に入れてパルス状の電圧を掛ける。これによって、C/B と被処理材との間に放電 (毎秒約 1 万回) が始まり、C/B の材料が被処理材に移動し、お互いの材料が溶融し接合される。第 1 図に MSCoating の原理を示す。

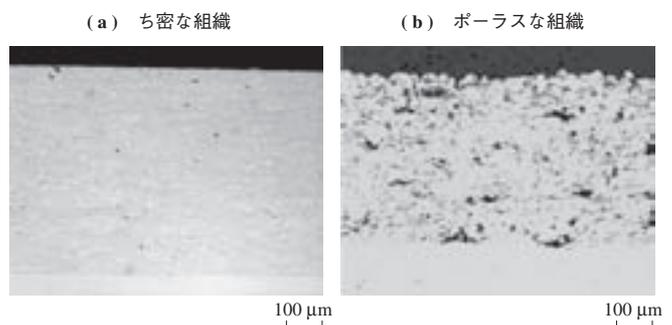
セラミックスの薄いコーティングおよび金属の厚い肉盛層を形成できる。また、C/B と加工条件を選ぶことによって、ち密な金属組織あるいは多孔質な組織にもすることができる。第 2 図に MSCoating による金属の肉盛のマイクロ組織を示す。

3.2 特長

金属の表面にコーティングする主な方法には、めっき、溶射、溶接、蒸着などがある。MSCoating は、これらの



第 1 図 MSCoating の原理
Fig. 1 Description of MSCoating



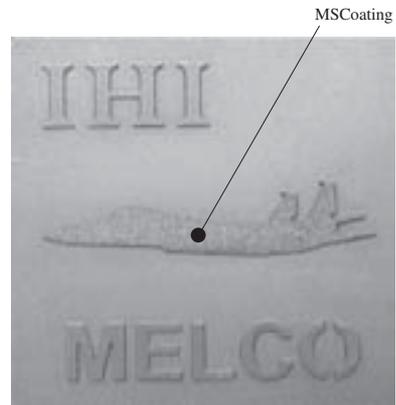
第 2 図 MSCoating による金属の肉盛のマイクロ組織
Fig. 2 Micro-structure of built-up alloy by MSCoating

加工方法に比べて多くの特長がある。環境負荷低減の面からみた主な特長を以下に示し、MSCoating と他技術の比較を第1表に示す。

(1) 被処理材の変形が極めて小さく、割れない
 溶接では溶接部の熱収縮が大きいため、変形したり、割れたりする恐れがある。しかし、MSCoatingでは直径がマイクロレベルの微細なパルス状の放電が局所的に繰り返し起こることによって溶融接合するため、被処理材の収縮は表面のごく浅い範囲に限られる。このため、変形が極めて小さく、割れることがない。第3図にTIG溶接との変形の比較を示す。変形が許されない完成部品の補修と修理に最適である。

(2) 正確な形状の肉盛が可能で、前後処理が不要
 MSCOatingは、C/Bと被処理材の間で放電する場所にコーティングできるため、C/Bの形状が正確に転写されたコーティングができる。このため、めっきや溶射で必要とする前洗浄とマスキング作業が不要である。第4図に転写された電極形状を示す。狭く深い場所にも肉盛することができ、従来の技術では不可能であった修理が可能になった。

(3) 小規模な装置のため生産ラインへの組込みが可能
 めっきや溶射は設備が大規模で、排水処理、防音対策、多量の電気などが必要である。しかし、本MSCoating技術はこれらを必要としない小規模な装



第4図 転写された電極形状
 Fig. 4 Transferred C/B-shape

置であるため、生産ラインへの組込みが可能である。

4. 実現可能な機能（予測を含む）

溶射と同様に、C/Bを開発することによって、さまざまな機能を実現できる。耐摩耗性、アブレシブ性（こすり合う相手を削り取る）、アブレイダブル性（こすり合う相手に削り取られる）、耐エロージョン性、耐酸化性、熱遮へい性などの機能が、C/Bと処理条件を開発することによって、実現可能である。

5. コーティング・肉盛の基本的な性能

5.1 耐はく離性

(1) セラミックスのMSCoating

INCONEL718材の薄い板にセラミックス(TiC)をMSCoatingして、破断が起こるまで繰り返し、折り曲げた後でも、はく離は見られなかった。また、破断後に先端の鋭い器具でコーティングを引っかいたが、はく離は見られなかった(第5図)。

(2) 金属のMSCoating

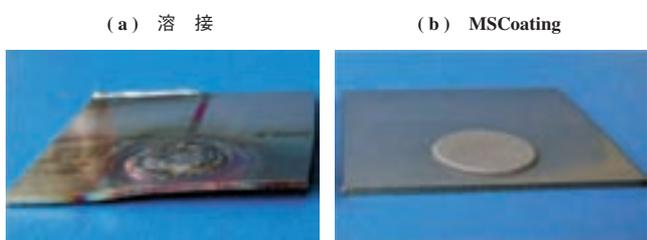
INCONEL718材の円板にコバルト(Co)100%の肉盛を行い、転削加工した後に熱衝撃試験を実施し、耐はく離性を確認した。熱衝撃試験は、液体窒素と熱

第1表 MSCOating と他技術の比較

Table 1 Comparative table of MSCOating and others

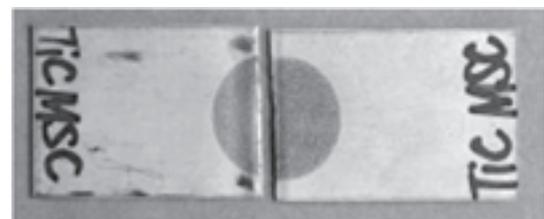
| 項目 | MSCoating | めっき | 溶射 | 溶接 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| ライン内への取込み | 容易 | 困難 | 困難 | 困難 |
| コスト | 小 | 大 | 大 | 中 |
| 前後処理 | ほぼ不要 | マスキング | マスキング | 仕上げ |
| 品質 | 安定 | はく離の可能性あり | はく離の可能性あり | 割れの可能性あり |
| 変形 | なし | なし | あり | 大きい |
| 被膜材質 | セラミックス・金属 | 金属 | セラミックス・金属 | 金属 |
| 環境 | ○ | △ | △ | △ |

(注) ○：影響なし △：影響あり



第3図 TiG溶接との変形の比較

Fig. 3 Comparison between TiG weld and MSCOating in deformation



第5図 折り曲げはく離試験後のセラミックス(TiC)のMSCoating

Fig. 5 MSCOating (TiC) after bend peeling test

湯に交互に 30 秒浸すことを 10 回繰り返した。転削加工後および熱衝撃試験後も、はく離は全く認められなかった(第 6 図)。

5.2 耐摩耗性

(1) セラミックスの MSCoating

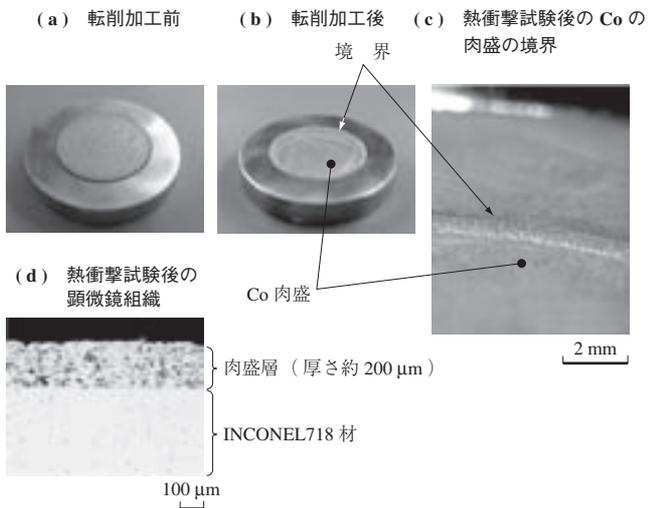
各種の材質にセラミックスを MSCoating して、従来の方法との耐摩耗性を調査した。フレッチングウェア試験結果を第 2 表に示す。

試験温度 室温
面圧 8 MPa
振幅 ±0.5 mm
サイクル数 10 万回 (at 40 Hz)

MSCoating によるコーティングは、従来の方法であるクロム (Cr) めっき、タングステンカーバイド (WC) の溶射よりも、はるかに耐摩耗特性が優れていることが分かる。

(2) 金属の MSCoating

溶接による肉盛と異なり、固体潤滑剤を含む層を作



第 6 図 コバルト (Co) 100% の肉盛の耐はく離性試験結果
Fig. 6 Co cladding after separation tests

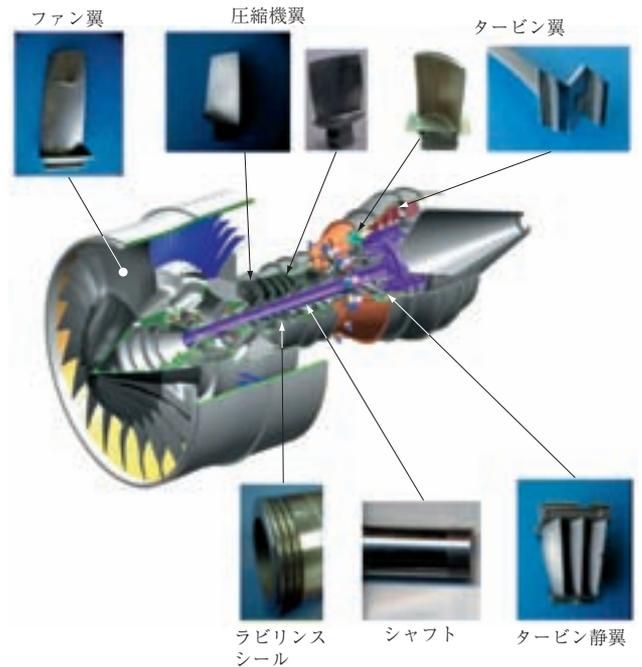
ることができるため、低温から高温まで凝着による摩耗が小さい。後に実施例で述べる。

6. 実施例とその性能

ジェットエンジンにおける適用事例と候補を第 7 図に示し、以下に紹介する。このなかの一部については、試験的に処理したものであり、実機での実証を進めている段階である。

6.1 金属肉盛の高温耐摩耗の例 1

低圧タービンの動翼のシュラウドの擦動面に、クロム (Cr) を含むコバルト (Co) 合金を肉盛した(第 8 図)。従来方法による溶接(第 8 図-(b))では、大きな余肉ができ、手仕上げで除去する必要がある。MSCoating(第 8 図-(c))では、必要な範囲に必要な厚さの肉盛ができる。薄い層では寸法精度も確保されるため、寸法確保のための



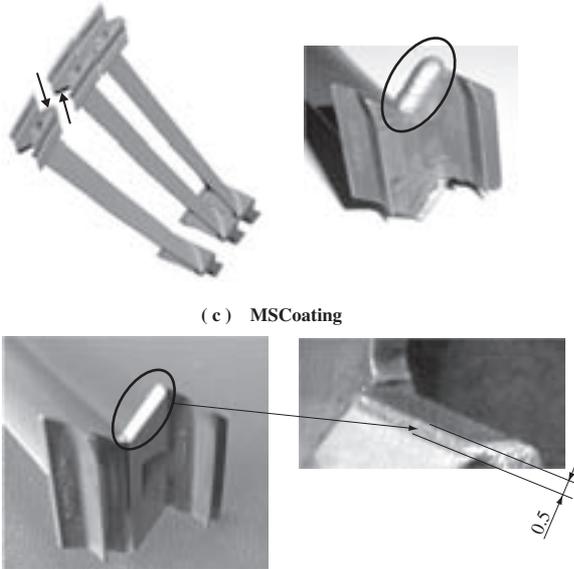
第 7 図 ジェットエンジンにおける適用事例と候補
Fig. 7 Application examples in aero-engines

第 2 表 フレッチングウェア試験結果
Table 2 Results after fretting wear

| No. | 試験片コーティングの材質 | | 摩 耗 量 | | 記 録 | 備 考 | 製品での適用部位 | 上・下試験片と取付状況 |
|-----|--------------|------------|-------|-------|-----|-----|----------------------|-------------|
| | 上の試験片 | 下の試験片 | 上の試験片 | 下の試験片 | | | | |
| 1 | Ti-5Al-2.5Sn | Cr めっき(基準) | 大 | 小 | ○ | 現設計 | ロータ系部品かん合部の かじり防止 | |
| 2 | Ti-5Al-2.5Sn | WC の MSC | 大 | 極小 | ○ | MSC | | |
| 3 | WC 溶射 | WC 溶射(基準) | 大 | 大 | △ | 現設計 | 軸受マウント周辺の 耐摩耗 | |
| 4 | TiC の MSC | TiC の MSC | 極小 | 極小 | ◎ | MSC | | |
| 5 | SUS440C | WC 溶射(基準) | 中 | 大 | △ | 現設計 | | |
| 6 | SUS440C | TiC の MSC | 中 | 小 | ○ | MSC | | |

(注) ◎ : 非常に良好 ○ : 良 好 △ : 好ましくない
MSC : MSCoating

(a) 耐摩耗肉盛の処理面 (b) 溶接 (従来の方法)



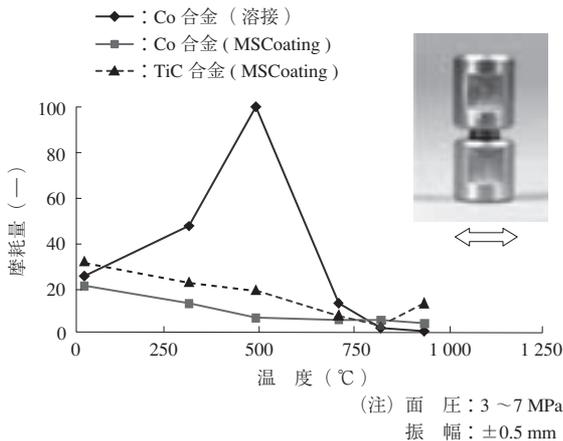
第8図 CF34 エンジンの低圧タービン翼の耐摩耗肉盛 (単位: mm)
Fig. 8 Anti-fretting wear cladding on LPT blade in CF34 engine (unit: mm)

仕上げ加工も不要である。この部品は耐久試験に供試されて従来の溶接方法よりも摩耗が少ないという良い結果を得た。

実用化のために要求された、① フレッチングウェア試験 ② 常温引張試験 ③ インパクトウェア試験 ④ 耐酸化試験 ⑤ 熱疲労試験、も実施した。

(1) フレッチングウェア試験

肉盛層の耐摩耗性 (温度と摩耗量) を第9図に示す。従来の溶接法と MSCoating による摩耗量を比較し、表した。MSCoating では低温から高温まで、ほとんど摩耗しない。従来の溶接方法では、中温で大きく摩耗している。実機での部品では、高温にならない後段の部品で摩耗する例が報告されている。



第9図 温度と摩耗量
Fig. 9 Fretting wear to temperature

実機での耐久試験の結果とフレッチング試験の結果から、MSCoating されてエンジンに組み込まれた部品は、部品の寿命内では摩耗による修理は必要ないと推測される。修理不要であることは、新品との交換や修理のコストを考慮すると環境負荷が小さい。

試験条件

| | |
|-------|-------------------|
| 面 圧 | 3 ~ 7 MPa |
| 振 幅 | ±1 mm |
| サイクル数 | 100 万回 (at 40 Hz) |

(2) 常温引張試験

基材に厚く肉盛し、その上に接着剤で引張治具を接着して試験機で引っ張った。処理条件によって異なるが 60 MPa の結果を得た。ただし、引張試験の結果がある数値より低いと表面直下ではく離摩耗し、ある数値より高いと潤滑性が低下して凝着摩耗する。

大気中で 650°C 以上に加熱すると、引張強度は格段に向上すると同時に、耐摩耗性も向上する。

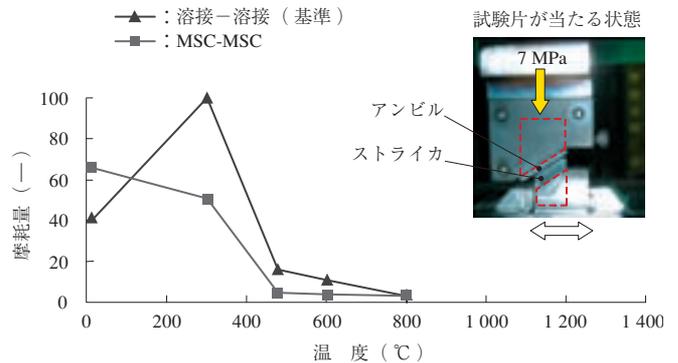
(3) インパクトウェア試験

ストライカの面をアンビル (衝突される試験片) の面に斜めに衝突させ、その後、一定の圧力でこすり、摩耗量と内部の割れの有無を調査した。

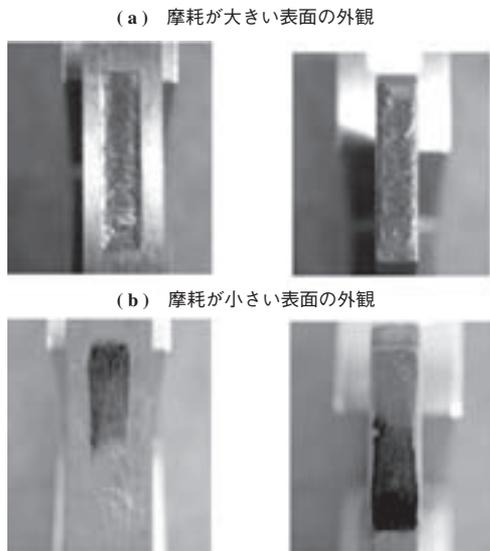
試験条件

| | |
|--------|---------------------------|
| 衝 撃 力 | 約 883 N (当たり面: 3 × 14 mm) |
| 面 圧 | 7 MPa |
| スライド距離 | 1 mm / サイクル |
| サイクル数 | 100 万回 (at 34 Hz) |

摩耗量を第10図に示す。MSCoating は従来の溶接よりも性能が良い。摩耗したときの衝撃摩擦面 (表面) を第11図に示す。第11図-(a)に摩耗が大きい表面を、第11図-(b)に摩耗が小さい表面を示す。



第10図 インパクトウェア摩耗
Fig. 10 Impact wear to temperature



第 11 図 インパクトウェア試験片の摩耗
Fig. 11 Appearance of sliding surface after impact wear test

(4) 耐酸化試験

大気中において 1 000℃で 100 時間保持後、寸法の変化、引張強度を測定した。寸法は減少せずわずかに増大する。また、極めて引張強度が大きくなる。内部まで酸化することで体積が増大すると同時に拡散が進み、強固な組織に変化するためである。

いったん高温にすると、層内の酸化物が増え固体潤滑剤として働き、中温での耐摩耗性も向上する。このためフレッチングウェア試験ではほとんど摩耗しない。

(5) 熱疲労試験

肉盛した試験片を約 11 分加熱して、870℃に昇温し 1 分間保持する。その後、約 3 分間空冷して 250℃に下げるサイクルを 500 回行った。肉盛層の厚さは、酸化によるはく離がなく変化しない。また被処理材との境界ではく離も発生しない。

6.2 金属肉盛の高温耐摩耗の例 2

燃焼器に燃料を噴射するノズルのはめ合い部の修理に、高温耐摩耗性金属の肉盛を適用した。第 12 図に燃料噴射ノズルの修理の様子を示す。噴射ノズルは、燃焼器の穴に緩いかん合状態ではめ込まれているので、エンジンの振動によって 400 ~ 600℃の環境でぶつかり合い、大きく摩耗する。溶射で高温耐摩耗のコーティングが付けられているが、発電用ガスタービンの 1 年間の運転で、第 12 図 - (b) のように摩耗してしまった。摩耗によって肉厚が薄くなり、従来の方法では修理不可能で、廃却とされ新品と交換されていた。燃料油、燃料ガス、水を噴射でき、かつ燃料の微粒化のため空気で攪拌する構造であ



(注) *1 : 運転 1 年後の摩耗の様子
*2 : こすった跡があるが摩耗はなし

第 12 図 燃料噴射ノズルの修理
Fig. 12 Repair of fuel nozzle

り高価な部品である。しかも、ガスタービンには多数の噴射ノズルが付いている。

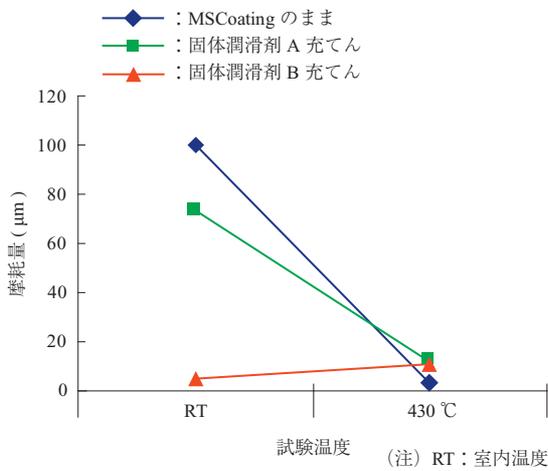
MSCoating で肉盛修理 (第 12 図 - (c)) を行ってガスタービンに組み込んだところ、ほとんど摩耗しなくなった。相手の部品には MSCoating の肉盛を行っていない。第 12 図 - (d) に、運転 4 か月後の様子を示す。もし新品に最初から適用しておけば、エンジンの寿命内では修理の必要がないことが期待できる。部品交換も修理も不要となれば環境負荷は小さい。

なお、この外径、内径の摩耗は、燃料を微粒化するための空気の流れを減少させ、均一な燃焼を阻害し、エンジン性能の低下の原因になる。

6.3 金属肉盛の低・中温度耐摩耗の例

MSCoating 処理された面同士のごすり合せでは、低温から中温においても摩耗が少ないが、片方のみに処理すると、未処理の部品は大きく摩耗して MSCoating 処理が適さないことがある。室温でニッケル合金とステライトの MSCoating に対して、フレッチング摩耗試験を行った結果、片面が大きく摩耗した。この対策として、多孔質な MSCoating 層に固体潤滑剤を含浸させてみた。固体潤滑剤 A と B を含浸させた試験片の低・中温度耐摩耗性 (摩耗量) を第 13 図に示す。

INCONEL718 との組合せ試験でも固体潤滑剤 B を含浸させた試験片は、室温でも中温でも摩耗しない。圧縮機周りのはめ合い面への適用によって、エンジン性能の低下と、修理または新品への交換を防止できる。この



第 13 図 低・中温度での摩擦量 (INCONEL718 と MSCoating のこすり合わせ)
 Fig. 13 Fretting wear in low to medium temperature (INCONEL718 vs. MSCoating)

技術の適用は、広く一般産業でも役に立つと期待できる。

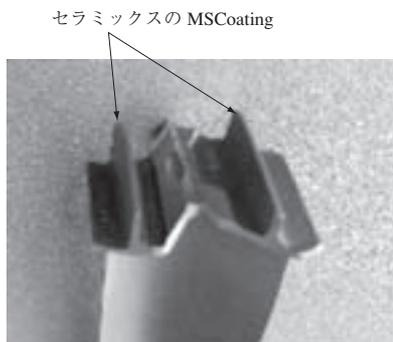
6.4 タービン翼先端のアブレシブコーティングの例

低圧タービン動翼のシュラウドのラビリンス・シール先端部にセラミックスを MSCoating した (第 14 図)。厚さ 0.7 mm の先端形状は、変形せず形状どおりにコーティングされている。

動翼のシュラウドのラビリンス先端部が静止部品のハニカム・シール部をこすったときは、相手のハニカムを削り取り、自らは摩擦しない。現状ではコーティングがないので摩擦するとともに、ハニカムに溶着しメタルトランスファーが起きることもある。メタルトランスファーを防止するため、チップクリアランスを大きくするとエンジン性能を低下させる。MSCoating を適用するとこれらを防ぐことができる。

6.5 圧縮機部品のアブレシブコーティングの例

圧縮機動翼先端の腹側の曲面に厚さ 15 μm のセラミックス



第 14 図 低圧タービン動翼先端のアブレシブコーティング
 Fig. 14 Abrasive coating on tip seal on LPT blade

ックスを MSCoating した (第 15 図)。また、エアシール用のラビリンスの先端部 (回転体) に厚さ 15 μm のセラミックスを MSCoating した (第 16 図)。

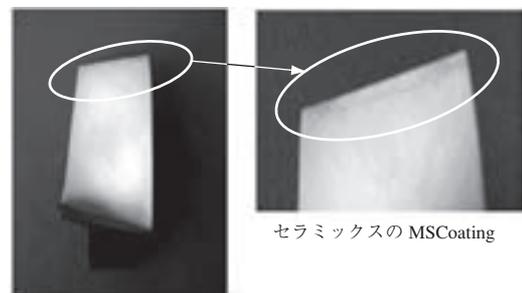
いずれの部品も、静止部品のシール部をこすったときは、相手のシールを削り取り、自らは摩擦しない。ラビリンス先端が摩擦すると、エンジン性能が低下するため定期的に検査を実施し、肉盛修理を行っている。しかし、このコーティングをすれば、クリアランスが大きくなり、エンジン性能の低下を防ぐことができる。また、肉盛修理の頻度を飛躍的に減少できると期待される。

従来の技術では、ボラゾン (cBN) をめっきで付ける、または、セラミックスを溶射で付けるが、剥がれやすいこと、および、前処理と後処理が必要でコストが高いことが欠点である。

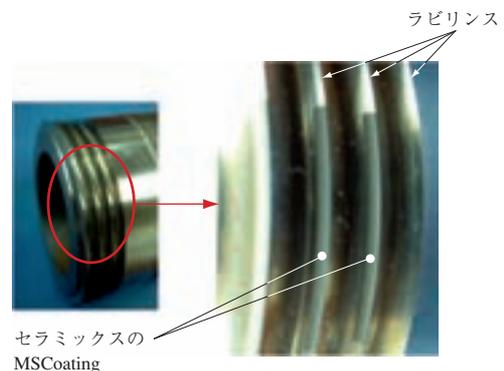
6.6 肉盛修理の例 1

圧縮機のニッケル合金製動翼の先端に、コバルト合金を MSCoating によって、厚さ 0.4 mm に肉盛した (第 17 図)。翼先端では、前縁と後縁では厚さが 0.2 mm と薄い、その肉厚のまま、先端に肉盛することが可能である。

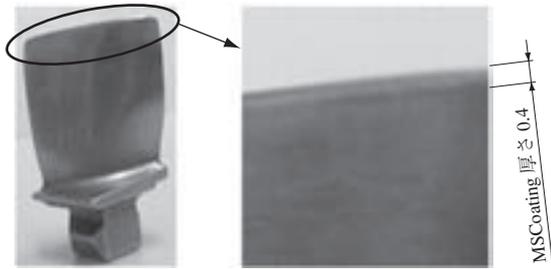
肉盛で形状復帰するだけでなく、肉盛と同時にアブレ



第 15 図 圧縮機動翼先端のアブレシブコーティング
 Fig. 15 Abrasive coating at airfoil near tip on compressor blade



第 16 図 回転体へのアブレシブコーティング
 Fig. 16 Abrasive coating on labyrinth seal of rotating part



第 17 図 薄肉先端への肉盛修理 (単位: mm)
Fig. 17 Metal cladding repair on tip of thin blade (unit: mm)

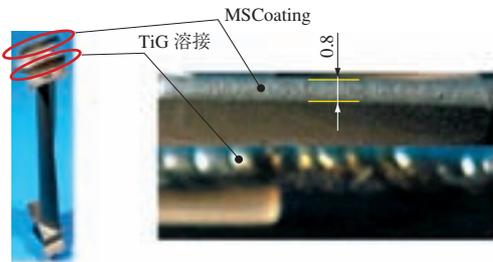
シブ性能を付けることができる。

6.7 肉盛修理の例 2

一方向凝固のニッケル合金製タービン動翼の先端に、コバルト合金を MSCoating によって、厚さ 0.8 mm に肉盛した (第 18 図)。一方向凝固ニッケル合金は、溶接が極めて困難であるが、溶接割れなく、先端形状のまま肉盛することができた。これにも肉盛と同時にアブレイブ性能を付けることができる。

6.8 肉盛修理の例 3

高圧タービン動翼の先端とこすり合うニッケル合金製セグメントの組付け溝の側面が摩耗する。溝幅 3 mm、深さ



第 18 図 一方向凝固材のタービン動翼先端への肉盛修理 (単位: mm)
Fig. 18 Metal cladding repair on tip of DS casting blade (unit: mm)

5 mm の側面である。従来の方法では、狭すぎて肉盛ができない。そこで、MSCoating によって肉盛修理を行った (第 19 図)。この結果、狭い溝でも C/B が接近できるならば、肉盛およびコーティングは可能である。

なお、内径 4 mm の穴の内面に、深さ 40 mm まで肉盛することができた。

6.9 肉盛修理の例 4

ニッケル合金の外径部に小さい C/B を使い、被処理部品を回転させながら、MSCoating で均一に金属の肉盛を行った (第 20 図)。小さな C/B を移動しながら大きな面積に肉盛することが可能である。

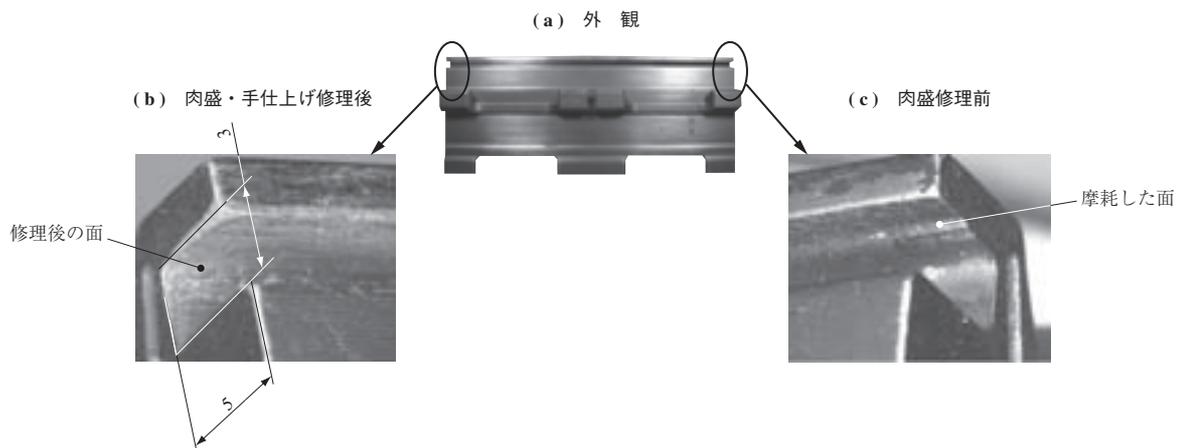
6.10 肉盛修理 (補修) の例 5

この技術は、変形が許されない完成部品の補修、修理に極めて有用である。

第 21 図に示す部品は実際の部品に適用した例である。鳥かごのような構造であり、しかもベアリングを組み込むハウジングである (第 21 図 - (a))。加工ミスで内外に貫通する穴を開けてしまった (第 21 図 - (b))。完成間際であり、ベアリングを組み込む内径も完成しており、変形が許されない補修が必要であった。従来の技術では



第 20 図 外径への金属の厚い肉盛修理
Fig. 20 Cladding repair on outer diameter of ring

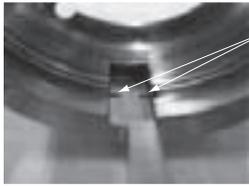


第 19 図 タービン部品の細溝の修理 (単位: mm)
Fig. 19 Cladding repair on side of narrow groove of turbine segment (unit: mm)

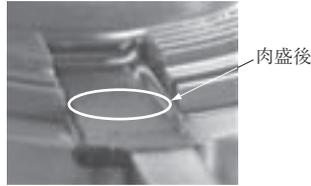
(a) 外観



(b) 補修前(貫通穴)



(c) 補修後



第 21 図 ベアリングハウジングの穴埋め補修

Fig. 21 Cladding repair to infill through holes on bearing housing

不可能であったが、MSCoating で貫通穴を埋め、変形せずに形状を復帰した (第 21 図 - (c))。ベアリングの組み込みは問題なく行え、潤滑油の漏れも発生しなかった。従来は廃却にするしかなかった部品を補修することができた。

6.11 肉盛修理の例 6

薄い板の端面に肉盛することは、従来の技術では困難である。第 22 図に薄肉板端面、ハニカムへの肉盛の様子を示す。MSCoating で、0.1 mm 厚さの板の端面に肉盛を行った例である (第 22 図 - (a))。板を曲げてはく離しない。シールに使われるハニカム先端の修理に使うこ

(a) 0.1 mm 厚さの板の端面への肉盛



(b) ハニカム先端への肉盛



第 22 図 薄板端面、ハニカムへの肉盛 (単位: mm)

Fig. 22 Build-up on end of thin plate and honeycomb (unit: mm)

とが期待される (第 22 図 - (b))。

6.12 取付具の受圧面の耐摩耗

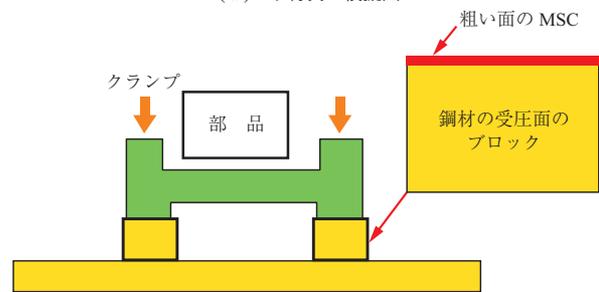
セラミックスの耐摩耗性を利用して、部品加工のための取付具、検査具の摩耗しやすい面 (受圧面) に、MSCoating でセラミックスを付けた例を第 23 図に示す。従来は、超硬をロー付けして研削仕上げを行い、寸法を確保していた。MSCoating の適用で、焼入れされ完成寸法になった面に常温耐摩耗のコーティングを付けることができる (第 23 図 - (a))。このため、後処理の研削加工を省くことができた。しかも、滑らかな小さな硬い突起がある梨地状の面にできるので、保持性が良くかつ切削液の排出性が良くなり、理想的な受圧面になった (第 23 図 - (b))。

7. 今後の展開

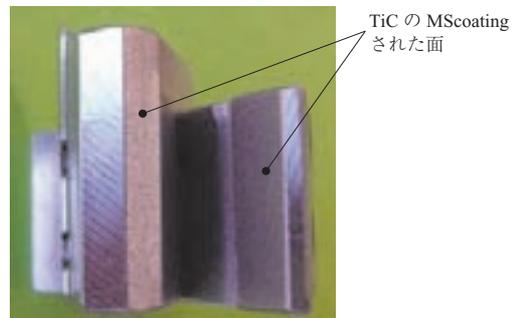
この技術を航空機エンジンに適用してエンジン性能の低下を防ぎ、摩耗による部品交換および修理コストを削減する。また修理に適用して、新品へ交換せずに修理を可能にする。この技術をライセンス提供を通じて世界に普及させ、エンジン性能の低下による燃料消費の削減、修理コストの削減によって環境負荷の低減に貢献する。

次に自動車や医療機器など航空宇宙以外の分野に向けて拡大していく計画である。耐摩耗性を生かした一般産業製品の開発にも着手している。

(a) 取付具の模擬図



(b) TiC の MSCoating



第 23 図 取付具の受圧面への耐摩耗セラミックスコーティング (TiC)

Fig. 23 Anti-wear ceramics coating on loading surface of fixture

8. 結 言

新技術 MSCoating は、コーティングと溶接において新分野を切り開く可能性をもった革新的な多用性のある汎用性の高い技術である。ジェットエンジン部品を対象にして、各種の適用を試み、その性能を調査した。

この結果、さまざまな機能の被膜を実現できる可能性を示すことができた。また、実際の低圧タービン翼に適用し、今までに実現できなかった広い温度域で耐摩耗性のあるコーティングおよび肉盛を実現できた。

本技術は、生まれたばかりの技術である。技術実証ができる部品への適用の機会が与えられることを切望する。

ジェットエンジンへの適用には、認定のために多くの費用と時間が掛かる。当社だけで適用を広げるのは困難である。メリットの大きい修理メーカーの多くに、認定のための作業に参加していただくことを期待する。

また、公的認定を必要としないガスタービンでの適用によって実績をあげることが、ジェットエンジンにおける適用の推進に役立つ。ガスタービン業界に適用の機会を与えてくださることをお願いしたい。

— 謝 辞 —

本技術の開発と適用に当たっては、三菱電機株式会社の方々をはじめ、航空宇宙事業本部の多数の関係者との協力によって実現できた。また、技術開発本部などのプロジェクト関係各位からの多大な支援のお陰である。ここに記し、深く感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) 毛利尚武, 齋藤長男, 恒川好樹, 初山英教, 宮川昭彦: 放電加工による表面処理—複合構造体電極法—精密工学会誌 Vol. 59 1993年4月 pp. 625 - 630
- (2) 後藤昭弘, 眞柄卓司, 三宅英孝, 今井祥人, 齋藤長男, 毛利尚武: 放電加工による硬質被膜の形成電気加工学会誌 Vol. 31 No. 68 1998年11月 pp. 26 - 33
- (3) 落合宏行, 渡辺光敏, 荒井幹也, 吉澤廣喜, 齋藤吉之: 放電を利用した革新的なコーティングおよび肉盛技術 MSCoating の開発 石川島播磨技報 Vol. 45 No.2 2005年6月 pp. 72 - 79