

平成 22 年度戦略的基盤技術高度化支援事業
「環境配慮に適応した溶射技術高度化の開発」

研究開発成果等報告書概要版

平成 23 年 3 月

委託者 中部経済産業局

委託先 財団法人中部科学技術センター

目 次		頁
第1章	研究開発の概要	2
1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	5
1-2	研究体制	6
	（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	
1-3	成果概要	10
1-4	当該研究開発の連絡窓口	12
第2章	本論	13
2-1	溶射面粗度向上のための試験と評価	13
2-2	パウダー付着率向上及び跳ね返り率低減のための試験と評価	25
2-3	ロボット現有機に対するプログラム開発・制御方法の開発	30
2-4	複雑形状ワークによる皮膜の評価	31
2-5	複雑形状ワークによる皮膜面粗度の評価	34
2-6	溶射管理技術の開発	42
第3章	全体総括	45
付録】	専門用語の解説	51

環境配慮に適応した溶射技術高度化の開発

第1章 研究開発の概要

複雑形状部品への適用課題である溶射におけるワーク温度特性等の基礎データの取得と評価、ワーク温度を正確にモニターする技術、ワークの効率的な冷却方法と疲労強度の安定化を図り、パウダーの付着率及び跳ね返り率の向上を図る。その上で、実際の加工方法の課題である膜厚均一/均質な皮膜の形成技術、面粗度の制御技術について、複雑形状部品に適応した溶射ロボットのプログラム開発を行う。溶射ガンスピード等の各種溶射条件パラメーターの最適化により課題を克服し、安定的な製造プロセス及び環境配慮に適応した溶射技術を確立する。

具体的には以下の8つのサブテーマについて研究開発を進める。

- 1-1 溶射中のワークの温度分布調査
- 1-2 溶射面温度モニタリングの精度向上と母材への影響評価
- 1-3 ワークの冷却効率向上と母材の耐疲労強度の安定化
- 1-4 金属パウダーの付着率及び跳ね返り率の向上・面粗度の向上
- 2-1 複雑形状に適応した溶射ロボットの動作研究・プログラム開発と制御開発
- 2-2 膜厚均一/均質な皮膜形成の評価実験
- 2-3 複雑形状品の皮膜面粗度の向上
- 3 安定した品質の作り込みのための溶射管理技術の開発

本年度は、以下の項目の研究開発課題に取り組んだ。

<金属パウダーの付着率及び跳ね返り率の向上・溶射面面粗度向上>

①-1 パウダー付着率向上及び跳ね返り率低減のための試験と評価

(実施機関名：国立大学法人九州工業大学・旭金属工業株式会社)

これまで研究を進めてきたパウダー（WOKA3653）を用い、付着率、跳ね返り率にとって有利と考えられる溶射温度が高くなるようなガス条件で T/P を対象に試験を行った。また、金属パウダーを従来に比べ粒子の細かいものに変更した試験も行った。

付着率および跳ね返り率は、ワークに対する溶射角度 90° を基本とし、平板では付着率の目標 20%をほぼ達成したが、跳ね返り率は目標を一桁上回っていたため新たに 35%以下を目標として試験を実施した。また、丸物においても付着率と跳ね返り率の目標値を設定し、横方向軸の回転装置を導入するなど溶射方法の追加により、T/P を縦方向および横方向に回転させて溶射する試験を行った。

①-2 溶射面粗度向上のための試験と評価

(実施機関名：国立大学法人北海道大学・旭金属工業株式会社)

パウダーを粒子の細かいものに変更して溶射を行い、表面粗度を計測し、現状の $6\mu\text{m}$ 前後に対して $4\mu\text{m}$ 以下を目標とした。また、噴射ノズルからの金属パウダーの放射拡散制御の研究では、穴板保持板の材質を高融点金属に改良して試験を継続した。

跳ね返り率および表面粗度を評価した結果、好成績の T/P については、断面を観察し、皮膜特性に問題がないか確認した。また、粒子の細かい新パウダーでは、疲労強度にとって有利な表面粗度向上および皮膜組織の緻密化が期待できるため、溶射 T/P について疲労試験による強度確認を行って 100,000 サイクル以上での破断を確認した。さらに、皮膜の構造調査と、疲労試験片破断品の解析も行った。

<複雑形状に適応した溶射ロボットの動作研究・プログラム開発と制御開発>

② ロボット現有機に対するプログラム開発・制御方法の開発

(実施機関名：国立大学法人九州工業大学・旭金属工業株式会社)

部品形状に沿った CATIA データ上の稜線を検出し、部品形状変化部では稜線を分割する必要があるため、分割数と溶射角度データを設定することで自動的にジョブ（溶射ロボットプログラム）が生成するようなシステム（ソフトウェア）を製作するとともに、評価を行った。

<膜厚均一／均質な皮膜形成の評価実験>

③ 複雑形状ワークによる皮膜の評価

(実施機関名：国立大学法人北海道大学・国立大学法人九州工業大学・旭金属工業株式会社)

上記ソフトウェアにより作成したプログラムを用いて、実機ベースに適応した複雑形状ワークに溶射し、膜厚均一／均質な皮膜形成状況の確認・評価を行った。

ここでの実施・評価項目は以下の通りである。

- ・ 複雑形状ワークの製作
- ・ 複雑形状ワークにおけるマスク治具の製作
- ・ 複雑形状ワークへの溶射
- ・ 複雑形状ワーク溶射部断面の皮膜性状評価

<複雑形状品の皮膜面粗度の向上>

④ 複雑形状ワークによる皮膜面粗度の評価

(実施機関名：旭金属工業株式会社)

③で製作した溶射品について面粗度の評価を行い、目標値 $4\mu\text{m}$ に満たない場合は③の研究開発項目に戻り皮膜再形成を行った。

<溶射管理技術の開発>

⑤ 安定した品質作込みのための溶射管理技術の開発

(実施機関名：旭金属工業株式会社)

事業化に向けて、要素技術研究開発の成果を統合し、実機レベルの溶射に適応した、以下の項目を含む溶射管理技術のスペックを作成した。

- ・ 溶射条件（温度、距離、速度、膜厚、角度、パウダー流量、各ガス流量）
- ・ 溶射方法
- ・ 冷却方法とその維持管理
- ・ 溶射手順
- ・ 溶射プログラムおよび関連データの保存・管理方法
- ・ プログラム作成手順
- ・ プログラム改良履歴の保管方法
- ・ 品質要求事項
- ・ 品質保証方法
- ・ CF カードの記名方法および保管方法
- ・ プログラム作成用パソコンの管理方法
- ・ 日常点検方法
- ・ 定期点検方法
- ・ 装置の維持管理方法
- ・ 治具の維持管理方法
- ・ 金属パウダーの管理方法
- ・ ガスの管理方法
- ・ スペックの改正記録保管方法

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

ランディングギア、フラップ等の航空機部品は、使用環境が過酷なため高い耐久性・耐摩耗性が要求され、またR o H S規制等の流れを受け、環境負荷が少ない新たな生産方法の確立が求められている。

本研究開発は、従来のクロムめっきに替り採用されたHVOF溶射（高速フレーム溶射）について、母材への影響を極力無くし、膜厚均一/均質な皮膜形成及び面粗度の精度向上を図り、クロムめっき以上の機能性を確保しつつ複雑形状部品への適用を可能とすると共に環境負荷の低減を図り且つ生産性の向上を図ることを目的とする。

以下に目標を示す。

<金属パウダーの付着率及び跳ね返り率の向上・面粗度の向上>

- ・ 付着率 20%以上、跳ね返り率 35%以下とする。
- ・ 丸モノに対して付着率及び跳ね返り率を設定する。
- ・ 溶射皮膜の表面粗さを $4\mu\text{m}$ 以下とする。
- ・ 疲労試験による破断サイクル数を 100,000 以上にする。

<複雑形状に適応した溶射ロボットの動作研究・プログラム開発と制御開発>

- ・ ワークデータ（CATIA形式）を取り込み、ロボット動作プログラムを生成するソフトを開発する。
- ・ 溶射待機時間/総溶射時間を 15分/30分以下にする。

<膜厚均一/均質な皮膜形成の評価実験>

- ・ 開発プログラムによる複雑形状部品に対して、膜厚均一/均質な皮膜を得る。

膜厚均一： $125\pm 25\mu\text{m}$ 、

均質：ポロシティー、酸化物、未溶融粒子：1%未満

<複雑形状品の皮膜面粗度の向上>

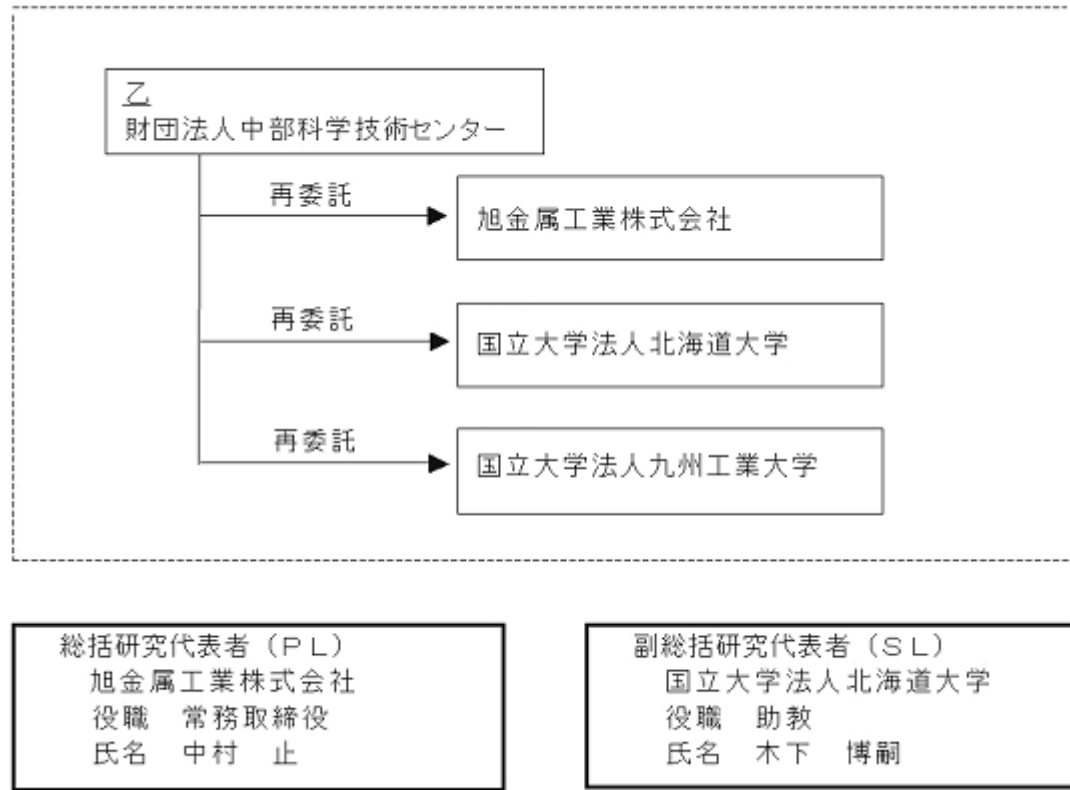
- ・ 開発プログラムによる複雑形状部品に対して、面粗度 $4\mu\text{m}$ 以下にする。

<溶射管理技術の開発>

- ・ 実機に適応した溶射管理技術を確立する。

1-2 研究体制（研究組織・管理体制・研究者氏名・協力者）

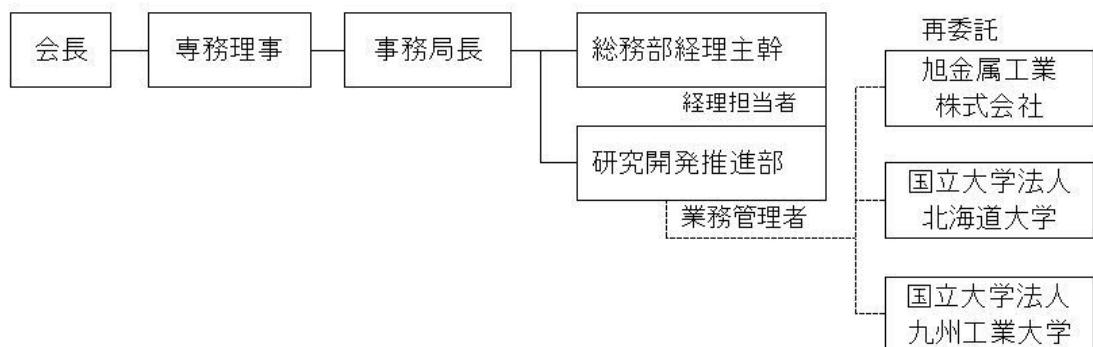
1-2-1 研究組織



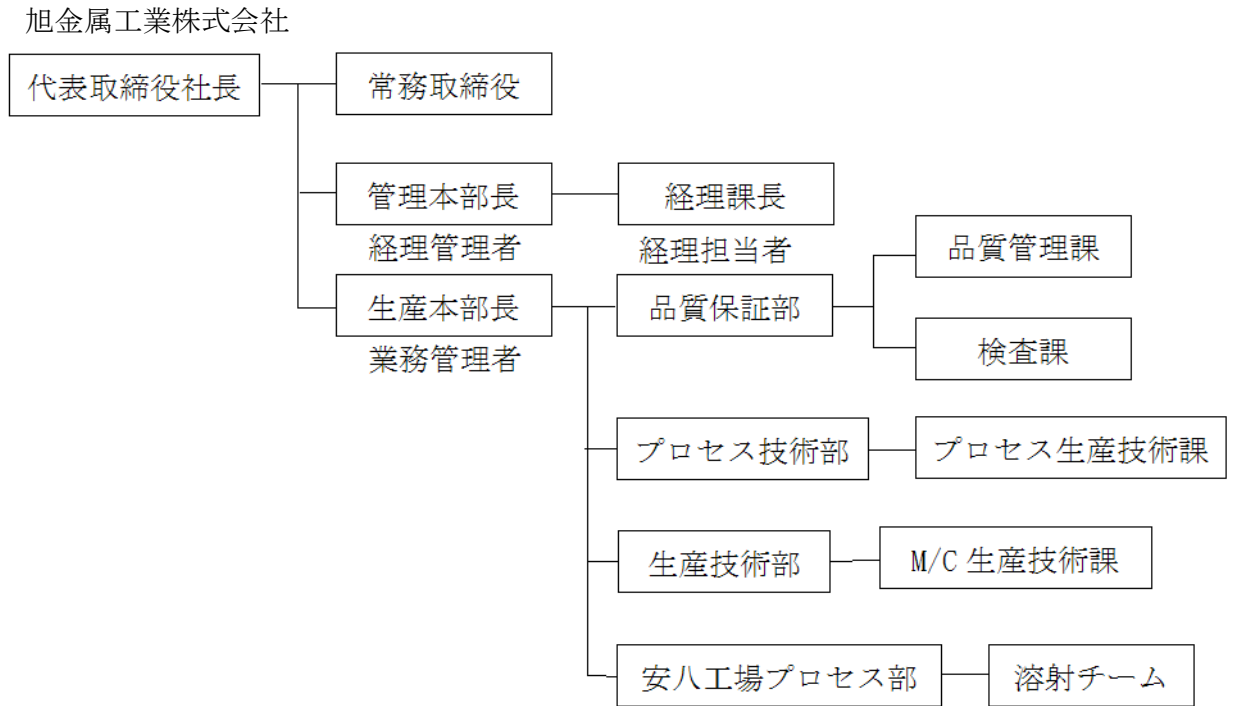
1-2-2 管理体制

(1) 事業管理者

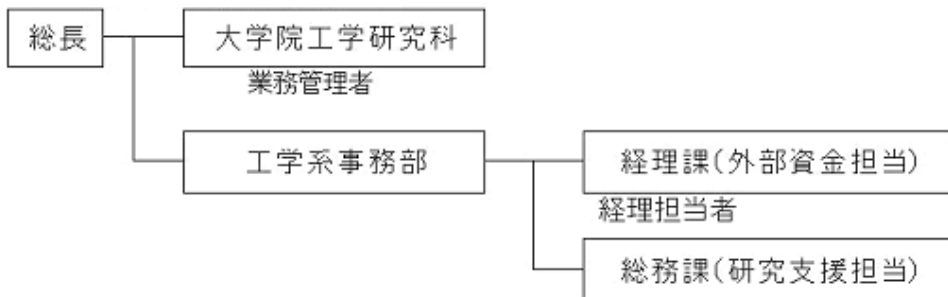
財団法人 中部科学技術センター



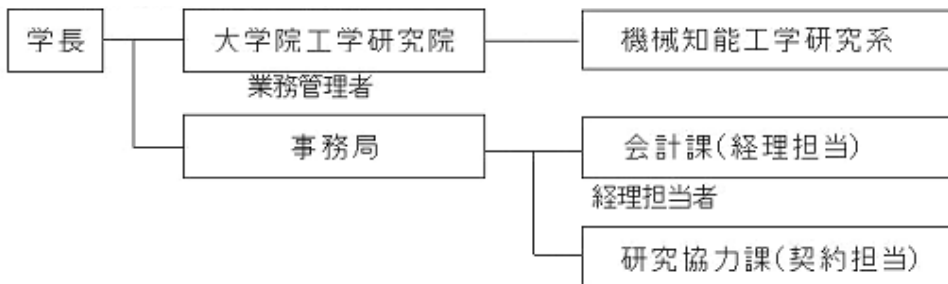
(2) 再委託先



国立大学法人北海道大学



国立大学法人九州工業大学



1-2-3 研究者氏名

旭金属工業株式会社

氏名	所属・役職
中村 止	常務取締役
助定 良臣	取締役生産本部長
辻本 克也	プロセス技術部長
本間 守	品質管理課長
水野 茂樹	プロセス生産技術課員
高木 陽一	プロセス生産技術課員
高田 幸士	溶射チーム員
篠田 正弘	M/C生産技術課員
和田 智和	品質管理課課員
大橋 弘幸	検査課員
加納 憲彦	検査課員

国立大学法人 北海道大学

氏名	所属・役職
木下 博嗣	大学院工学研究科 材料科学専攻 助教

国立大学法人 九州工業大学

氏名	所属・役職
相良 慎一	大学院工学研究院 機械知能工学研究系 知能制御工学部門 准教授

1-2-4 協力者

アドバイザー、オブザーバー

氏名	所属・役職
神島 尚文	三菱重工業株式会社 名古屋航空宇宙システム製作所 大江工作部 生産技術課 主席チーム統括
坂梨 誉文	川崎重工業株式会社 航空宇宙カンパニー 技術本部 研究部 材料技術課 主事
林 宗浩	株式会社島津製作所 航空機器事業部 技術部長
斉藤 英文	株式会社島津製作所 航空機器事業部 技術部 主任 技師
近藤 靖彦	社団法人中部航空宇宙技術センター 専務理事
安場 尚一	株式会社ヴィッツ 会長
岡本 正弘	中部経済産業局 産業部 製造産業課長
堀 卓郎	中部経済産業局 産業部 製造産業課
萩田 弘朗	中部経済産業局 産業部 製造産業課
彦坂 謙二	中部経済産業局 参事官 (航空宇宙・バイオ産業担当)

1-3 成果概要

1-3-1 得られた成果

①-1 パウダー付着率向上及び跳ね返り率低減のための試験と評価

- (1) WOKA、フジミパウダーについて、冷却を十分にきかせることで付着率が向上し、平板では共に付着率の目標値 20%以上を達成した。
- (2) 跳ね返り率は付着率と相反する関係にあるため、付着率だけで評価できることが分かった。

①-2 溶射面粗度向上のための試験と評価

- (3) 表面粗度に対しては粒子温度を高くすると有利であることが分かった。
溶射品質向上のための一条件が明らかにできた。
- (4) 新たなパウダーとして使用した株式会社フジミインコーポレーテッドの **DTS-W675-30/10** (以下フジミパウダーという) の最適ガス条件が分かった。
(酸素 700 FMR、プロピレン 800 FMR)
- (5) フジミパウダーを使用することで、表面粗度の目標値 $4\mu\text{m}$ 以下を達成した。
今後、研磨なしで製品出荷する道が開かれ、コスト削減、納期短縮、品質向上が可能となった。
- (6) フジミパウダーは、従来の **WOKA 3653** パウダー (以下 WOKA という) と比べ皮膜硬度が同等以上で、ポロシティー、酸化物が少ないことが分かった。フジミパウダーの製品への適用では、皮膜組織の面でも有利であることが確認できた。
- (7) 溶射皮膜の SEM 観察、回折の結果、WOKA は WC 粒子の粒界が明瞭であり、粒界からの割れが発生しやすいのに対し、フジミパウダーは WC が溶融し平滑層を形成し、アモルアス化が進行していることが確認できた。
良質な皮膜構造形成に関する一メカニズムが確認でき、今後のパウダー選定の有力な参考データが得られた。
- (8) 放射拡散制御治具による溶射では、表面粗度が主にパウダー粒子サイズで決まるため、穴径の寸法には依存しないことが確認できた。
- (9) 15-5PH 材の疲労試験では、フジミパウダーの方が従来の WOKA に比べ疲労強度が高いことから、疲労強度安定化に向け一歩前進することができた。
今後の製品溶射への可能性が高まった。
- (10) フジミパウダーで溶射した 15-5PH 材の疲労試験片 (以下試験片を T/P という) は、ポロシティー、酸化物、未溶融粒子、及び皮膜硬度がそれぞれ目標値 1% 以下、HV1000 以上を満たしていた。
- (11) 上記では、破断サイクル数が目標の 100,000 サイクル以上を達成し、事業化に向け有利な条件が多数確認できた。

② ロボット現有機に対するプログラム開発・制御方法の開発

(12) オフラインソフト開発では、CATIAデータ取り込み、稜線検出機能追加により溶射ジョブファイル自動作成が可能となった。

(13) ペンダントの機能が多く使用できるようになり、オフラインでの作業性が大きく向上した。

生産を止めることなく机上で正確なプログラム作成、干渉チェックができるようになり、生産の合理化が可能となった。

③ 複雑形状ワークによる皮膜の評価

(14) 複雑形状ワークの溶射面に対するガン角度を均等にすることにより膜厚が均一になることが確認でき、膜厚要求値 $125 \pm 25 \mu\text{m}$ を満たすことができた。

皮膜組織に関してもポロシティー、酸化物、未熔融粒子、及び皮膜硬度がそれぞれ要求値 1%以下、HV1000 以上を満たしていた。

今後の製品溶射の基礎データとして役立てることができる。

④ 複雑形状ワークによる皮膜面粗度の評価

(15) フジミパウダーの使用で、表面粗度を目標値の $4 \mu\text{m}$ 以下にすることができた。

(16) 今回の試行範囲では、表面粗度に対する複雑形状ワークへのガン角度の影響は小さいことが確認できた。

⑤ 安定した品質作り込みのための溶射管理技術の開発

(17) 平成 20 年度から実施してきた要素技術の研究開発の成果を集大成し、実機レベルの溶射に適応したHVOF溶射のプロセス仕様書を作成した。

1-3-2 未達成事項および今後引き続き研究開発が必要な事項

①-1 パウダー付着率向上及び跳ね返り率低減のための試験と評価

(1) フジミパウダーはWOKAと比較して、溶射面の状態は優れているが付着率が低い。

パウダーの違いによる付着率変化の要因として、パウダーの材質・粒径分布、粒子構造、溶射中の燃焼等が考えられるが、解明できていない。

(2) 平板と比較して丸モノの付着率が低い。付着率向上のため、丸モノに対する効率的な冷却方法を開発する必要がある。

(3) 付着率の評価では、丸モノも含めT/Pサイズと溶射方法の再標準化が必要である。

(4) WOKAの最適溶射条件に基づいてフジミパウダーとWOKAの溶射面の状態を比較した結果、総合的にフジミパウダーがすぐれていることが明らかとなった。今後、フジミパウダーの最適溶射条件を実験的に明らかにしていく必要がある。

①-2 溶射面粗度向上のための試験と評価

(5) WOKAによる溶射では皮膜の表面粗度を $4 \mu\text{m}$ 以下にできなかった。

表面粗度がパウダーの持つ特性（パウダーの材質・粒径分布、粒子構造等）により決定される場合は、パウダーの仕様も考慮した研究を進める必要がある。

③ 複雑形状ワークによる皮膜の評価

- (6) オフラインソフトによる複雑形状ワークへの溶射方法では、試行パターンが十分でない。曲線部も有する複雑形状ワーク等も含めて、さらに多くの条件で試験・比較する必要がある。
- (7) 複雑形状ワークのマスク治具について、効果確認が不十分であり、構造も含め検討が必要である。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

- ・ 財団法人 中部科学技術センター 研究開発推進部長 永田達也
TEL : 052-231-3043 FAX : 052-204-1469 E-mail : t.nagata@cstc.or.jp

- ・ 旭金属工業株式会社 常務取締役 中村 止
TEL : 0584-64-5061 FAX : 0584-64-5324 E-mail : tnakamura@akg.co.jp

- ・ 国立大学法人北海道大学 工学研究科 助教 木下博嗣
TEL : 011-706-6765 FAX : 011-706-6324
E-mail : kinosita@ufml.caret.hokudai.ac.jp

第2章 本論 (実施計画書では2-2が先になっているが、試験実施手順に従って記述した。)

2-1 溶射面粗度向上のための試験と評価

(実施機関名：国立大学法人北海道大学・旭金属工業株式会社)

試験・評価は、最適な溶射条件を効率的に見つけるため、21年度の最適ガス条件と、22年度に高性能カメラ計測で得た粒子温度・速度が大きくなる条件を参考にして平板 T/P に溶射を行い、表面粗度の良好条件を順次絞り込んだ後、各種試験を行う方法とした。

以下に各段階の試験結果を示す。

2-1-1 溶射フレームの粒子温度、粒子速度および表面粗度の測定

これまで使用してきたWOKAは、酸素 700FMR、プロピレン 700FMR が最良であることが判明しているため、フジミパウダーについて各種ガス条件で測定を行った。

測定の結果、表面粗度は、図1に示すように酸素 700FMR、プロピレン 800FMRの条件が最良であった。

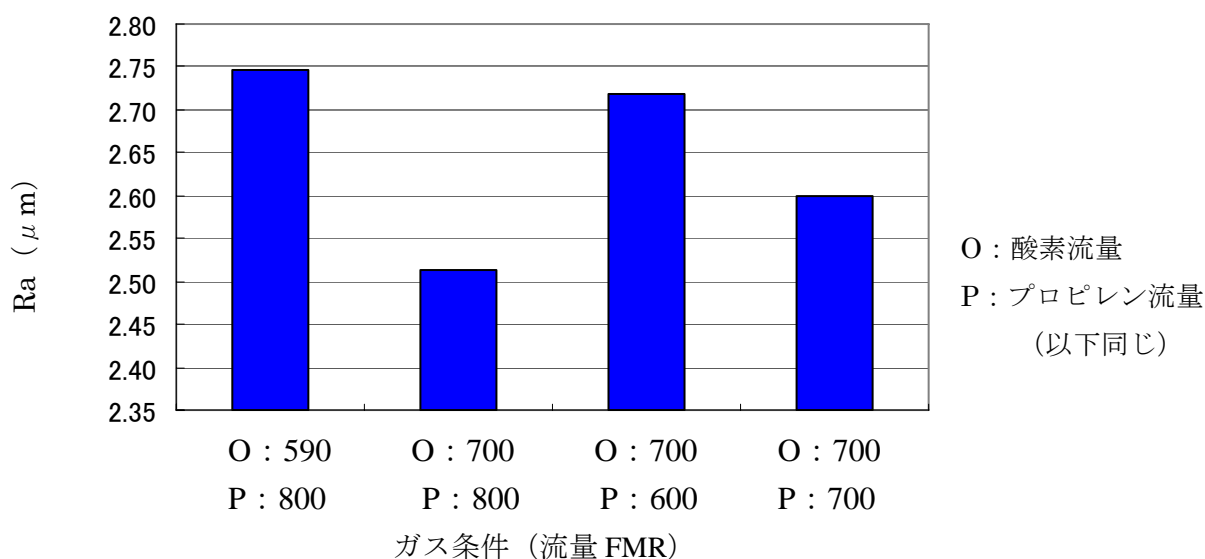


図1 フジミパウダーによるガス条件と表面粗度の関係 (溶射距離 230m)

・考察および成果

- ① フジミパウダーの粒子温度と粒子速度は、総合的に見て酸素 700FMR、プロピレン 800FMRの条件が最良であり、表面粗度に対しては粒子速度より粒子温度の影響が大きいことが分かった。
- ② 粒子温度・速度について、最良のガス条件は、パウダーの種類により傾向が異

なっていた。

2-1-2 最良溶射条件による溶射皮膜の調査

2-1-2 (1) 皮膜のマイクロ組織と硬度

最良溶射条件によるWOKAおよびフジミパウダー溶射皮膜の結果を図2に示す。いずれも要求値を満たしていたが、フジミパウダーはWOKAに比べポロシティー、などの欠陥が少なく、皮膜が緻密であった。硬度は同等であった。

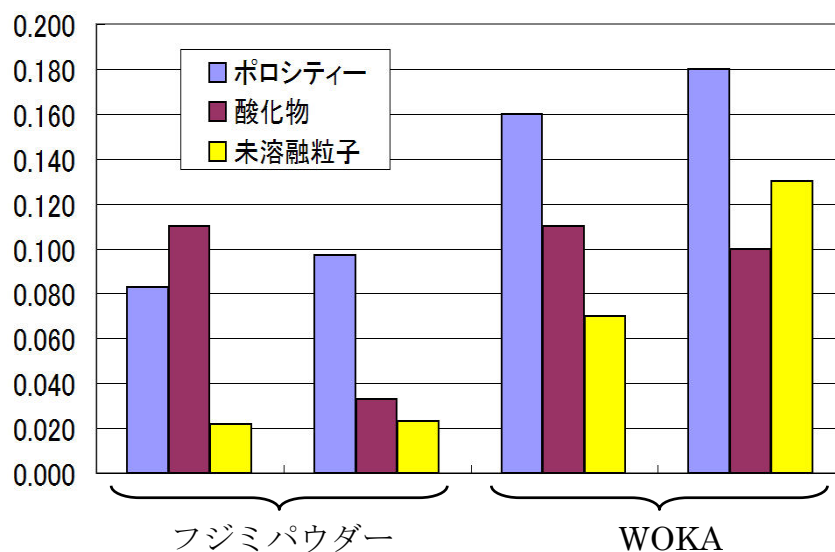


図2 ミクロ組織の比較結果

2-1-2 (2) 皮膜のSEM観察

上記最良溶射条件によるWOKAおよびフジミパウダー溶射皮膜のSEM観察では、WOKA溶射品はWCの粒界が明瞭に出ており、WC粒子が堆積して皮膜を形成しているが、フジミパウダー溶射品はWCが溶融し、層状の平滑層を形成していた。

・考察および成果

最適ガス条件で溶射した場合の皮膜特性は、WOKAよりフジミパウダーの方が緻密で勝っていた。

2-1-3 放射拡散制御治具を用いた溶射による表面粗度の測定

WOKAとフジミパウダーについて、制御なし(穴板なし)、φ25穴板使用、φ20穴板使用の3条件における表面粗度は、WOKA、フジミパウダーともに穴径との間に明瞭な傾向はなく、治具による表面粗度向上の効果は認められなかった。(図3参照)

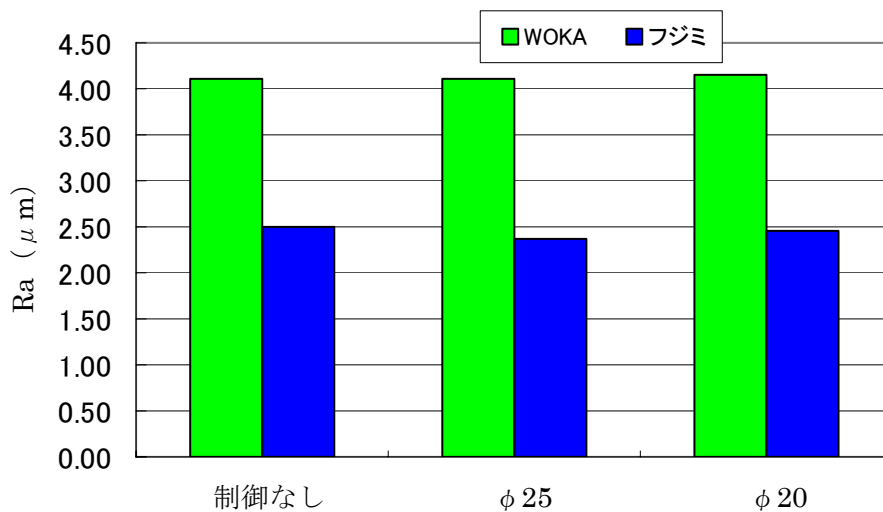


図3 放射拡散制御治具の穴径と表面粗度との関係

・考察および成果

上記の結果、放射拡散制御治具には表面粗度の向上効果は確認できず、主にパウダ一粒子サイズの要因が大きいことが分かった。

2-1-4 フジミパウダー溶射 T/P の疲労強度確認

2-1-4 (1) 疲労試験の条件

疲労 T/P は、フジミパウダーで横回転治具による溶射後 SN 曲線を求めるもの (ア) と、比較用応力条件の縦回転治具によるもの (イ)、WOKA 溶射で縦回転治具による疲労限度確認用の応力条件で行なうもの (ウ) の 3 通りを実施した。

材質 15-5PH の丸棒 T/P を用いて下記条件で疲労試験を行った。

・ 前処理

ショットピーニング条件

メディア : ASH-230 (ハード)

カバレッジ : 200%

WPC (ニューマブラスター) 処理条件

使用粉末 : 95Ni5Al、150~270mesh

エア一圧 : 0.42MPa

- 溶射および皮膜処理条件
 - 溶射方法：横回転、縦回転（比較用）
 - 溶射パウダー：フジミパウダー、WOKA（比較用）
 - T/P 表面温度：300℃
 - 膜厚：110 μ m 前後
 - 溶射皮膜の研磨：なし

- 試験条件
 - 試験温度：室温
 - 環境：大気中
 - 制御方式：荷重制御
 - 試験機：電気油圧サーボ疲労試験機
 - 試験機容量：±200kN
 - 最小応力：69MPa（一定）
 - 最大応力：797～1182MPa（比較用：1050MPa）
 - 繰返し波形：正弦波
 - 繰返し速度：10～15Hz
 - 最大繰返し数：N_{max}=1.0×10⁷ サイクル

- 溶射 T/P の表面粗度
 - フジミパウダー：Ra=2.5 前後
 - WOKA：Ra=4.5 前後

2-1-4 (2) 疲労試験 T/P の破断サイクル数評価

- 回転方向の比較（図4 ア、イ）

フジミパウダーによる縦方向回転（●）と横方向回転（○）では、ほとんど同等の疲労強度であり、回転方向で差がないことが分かった。

- パウダーの比較（図4 ア、ウ、エ）

回転方向による疲労強度への影響は縦横同等であることから、フジミパウダー（○）と、21年度のWOKA（△）との比較が可能となる。これによりフジミパウダーはWOKAに比べ疲労強度が向上していることが確認できた。また、疲労限度もWOKA（▲）が788 MPa 付近の値であるのに対し、フジミパウダー（○）は、821MPa 付近を示しており、フジミパウダーの強度が勝っていた。

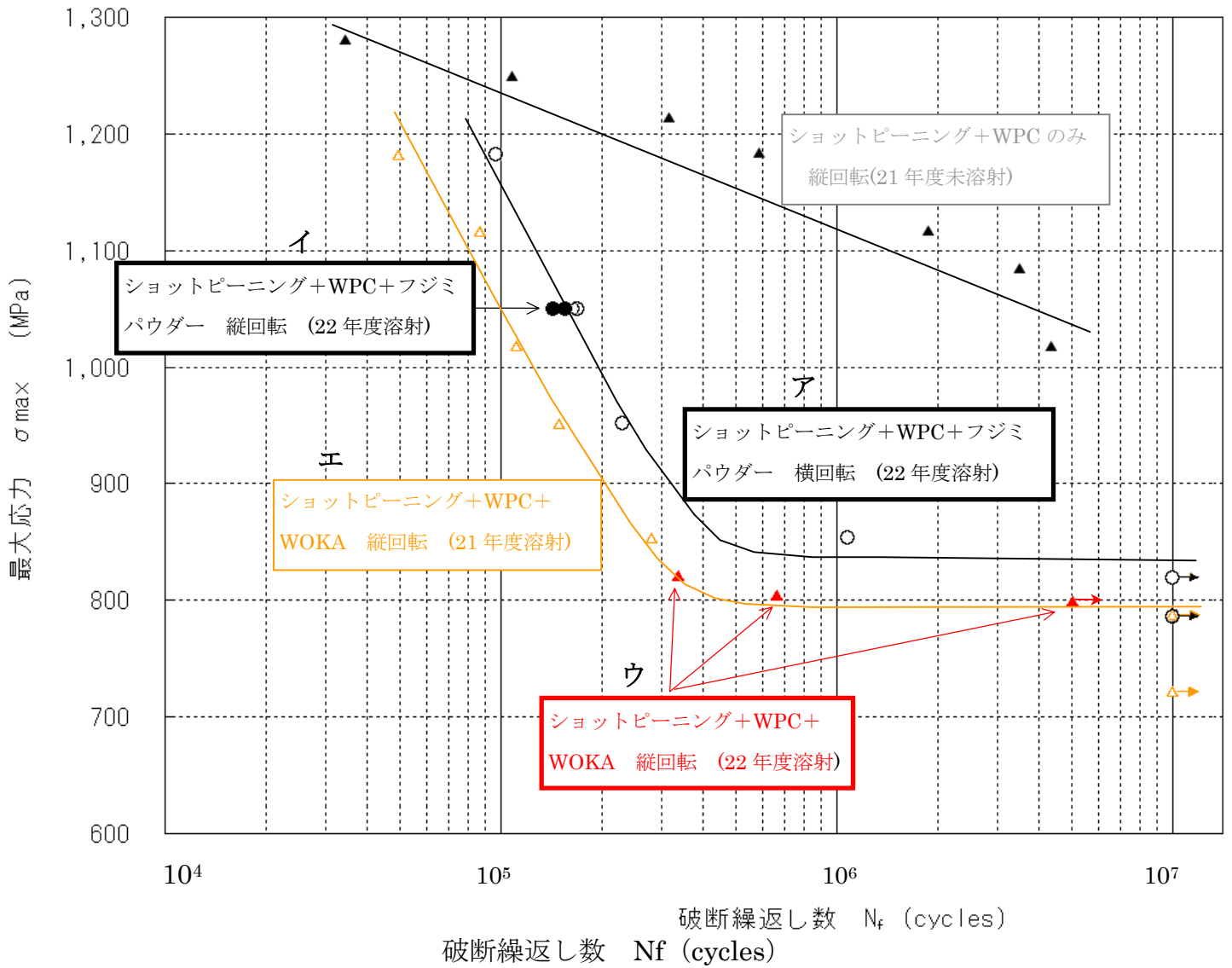


図4 疲労強度の比較 (22年度分は太枠で表示)

(注) プロット箇所につけられた右向き矢印は、未破断中止のものを示す。

・考察および成果

- ① フジミパウダーによる縦回転と横回転で疲労強度に差がないことが分かった。
- ② 下記の 2 点から、フジミパウダーはWOKAに比べ疲労強度が高いことが分かった。
 - ・ 縦回転・横回転同等であることから、フジミパウダーとWOKAを、回転方向に関係なく比較できる。
 - ・ フジミパウダーは SN 曲線がWOKAより破断サイクル数の多い方向にシフトしており、疲労限度も高い。
- ③ フジミパウダーはWOKAに比べ粒度が細かく、溶射粒子温度が高い、表面粗度が小さい、皮膜が緻密であることなど、疲労強度にとって好条件であったことが影響している。

2-1-4 (3) 疲労試験 T/P の破断部表面と破面の観察

破断面は、平滑な疲労破面と粗い急速破断面から成り、サイクル数が少ないものから多いもの（負荷応力の大きいものから小さいもの）にかけて疲労破面の割合が増加する傾向が明瞭に認められた。（破面直径の 35%前後から 60 前後に増大している）

起点側の表面（試験片側面）は疲労き裂発生に伴う緩やかな進展領域のため、溶射皮膜がほとんど残留しているが、最終破断部は、急速破断による塑性変形の影響から大きくはく離していた。

・考察および成果

- ① 破面は、負荷応力が増大すると、それに伴って破断サイクル数、疲労破面割合が減少する傾向が明瞭に認められた。
- ② ねじ部で破断した 2 本の T/P は、T/P 端部から 32mm と 38mm の箇所破断しており、試験実施機関からの 30~40mm ねじ込んで試験を行っていたとの報告とつき合わせると、破断位置がほぼ一致し、応力の厳しい箇所であったことが確認できる。

2-1-4 (4) 疲労試験 T/P 断面のマイクロ組織観察、硬度測定（表 1、図 5 参照）

疲労試験 T/P はすべて使用したので、未試験品のデータは得られないが、比較的 low 応力で試験した T/P と、未破断品を対象として、中央平行部の断面について組織と硬度を調べた。その結果を表 1 に示す。

ポロシティ、酸化物、未溶融粒子、皮膜硬度はすべて要求値を満足しており、母材

硬度にも問題は見られなかった。

表1 疲労試験 T/P 断面のマイクロ組織と硬度測定結果

最大応力 (MPa)	ポロシテ ィー (%)	酸化物 (%)	未溶融粒子 (%)	皮膜硬度 HV	母材硬度 HV
821 ねじ部で破断	0.21	0.03	0.07	1195	420
788 ねじ部で破断	0.16	0.03	0.09	1234	421
788 未破断中止	0.23	0.04	0.09	1239	420
要求値	1%以下			1000 以上	390~422

比較用の応力条件で行った T/P の観察では溶射皮膜と母材の境界にピットが認められたが観察断面上では破断起点部にピットの存在は見られなかった。

また、材料、溶射皮膜のマイクロ組織に異常は見られなかった。

ここで、ピット発生に関して確認するため、フジミパウダーと WOKA に対する腐食の影響を比較した。材質 15-5PH 材に疲労 T/P と同じ WPC 処理を施し、溶射した T/P の耐食試験を行った。方法は、JIS Z2371 の塩水噴霧試験方法 (中性) に準拠して 96 時間の試験を行った。

その結果を図 5 に示したが、フジミパウダー、WOKA の皮膜表面に灰黒色の模様が見られたが、通常鋼材の湿食で発生する茶褐色錆は目視上、確認できなかった。

また、断面組織も調べたが、ピットなどの腐食の影響は認められなかった。

・考察および成果

- ① 母材表面にピットが存在していたが、疲労試験結果を見ると、再現性、SN 曲線形状に問題はなく、疲労試験に対するピットの影響は比較的小さかったものと思われる。
- ② フジミパウダー溶射 T/P は、マイクロ組織、皮膜と母材の硬度など、すべて要求値を満たしていた。
- ③ 溶射皮膜の耐食性は WOKA、フジミパウダー共に差がなく、腐食の発生も認められないことから、同等の耐食性であることが確認できた。

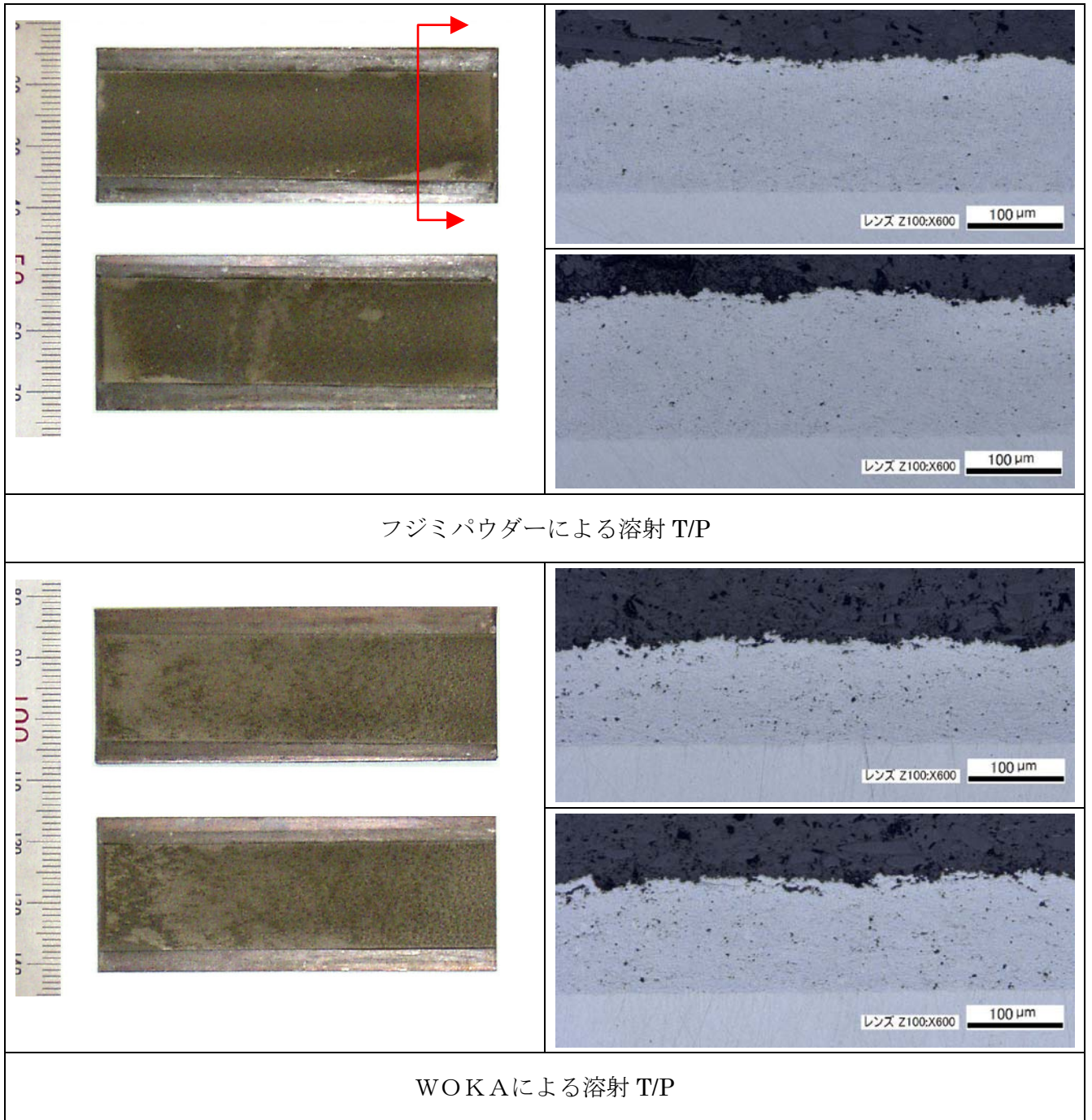


図5 耐食試験 T/P の外観状況と断面皮膜部の状況
赤線は観察断面を示す、他の T/P も同様箇所を調査

2-1-4 (5) 疲労試験T/P破面のSEM観察

図6では、破面が起点から放射状に進展している様子が見られ、起点付近では、溶射皮膜と母材とが密着し、両者の面位置に差が少ないことから、溶射皮膜表面にき裂が発生し、近傍の母材へと進展したものと考えられる。

き裂進展域には疲労破面特有のストライエーションが見られ、最終破断域の近くでは、断面積減少による強度低下から急速破断したことを示す延性破壊によるディンプルが混在していた。

・考察および成果

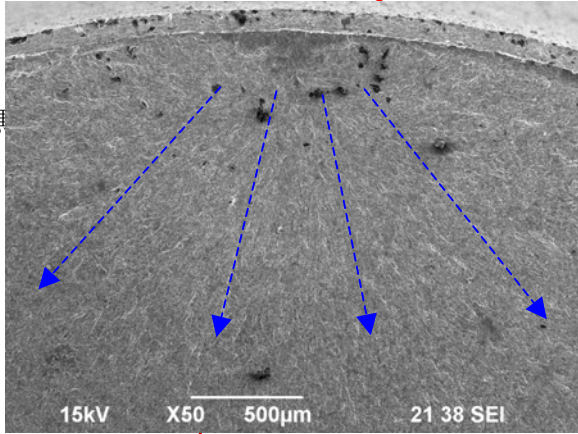
- ① 起点部側の溶射皮膜は母材に密着し、破面の面位置が母材に近いことから、疲労き裂は溶射皮膜表面に発生し、近傍の母材へと進展したものと考えられる。
- ② 破面上には、疲労き裂発生からき裂進展域、不安定破壊による急速破断域と、次第にき裂が成長し破断に至った履歴が残されており、典型的な疲労破壊の破面形態を示していた。



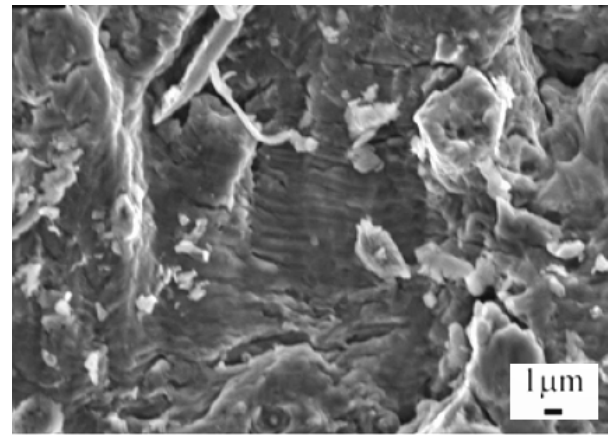
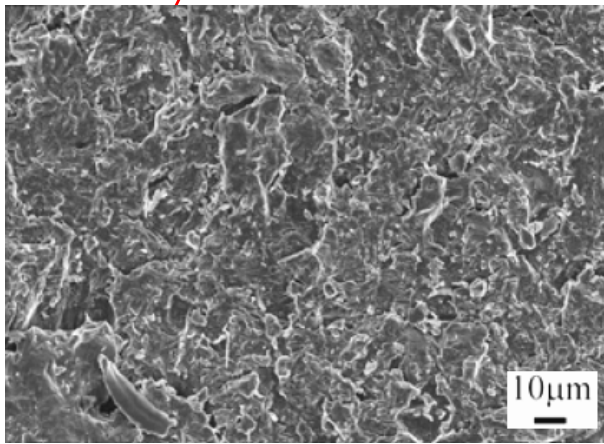
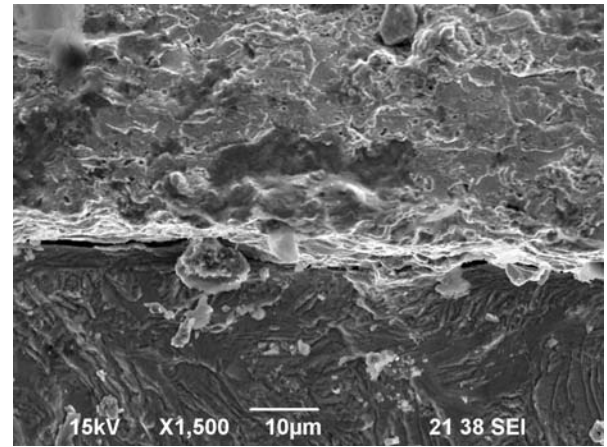
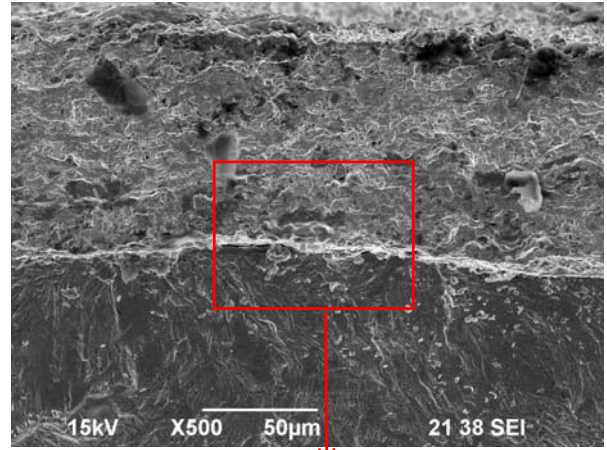
ショットピーニング+WPC+
フジミパウダー（横回転溶射）
試験応力：Max853MPa
破断サイクル数： 1.08×10^6

②

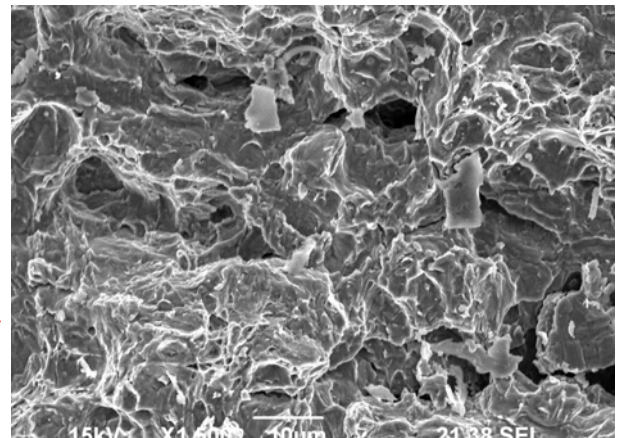
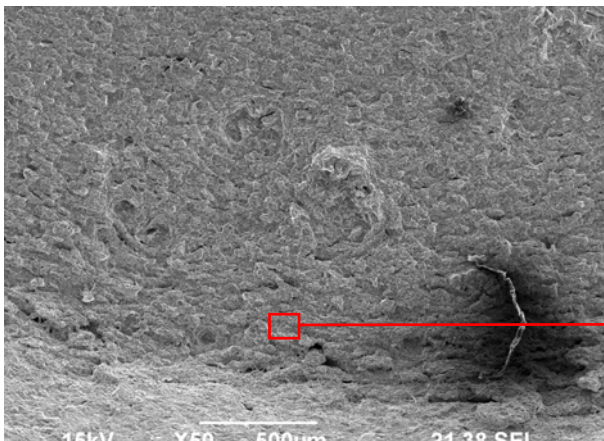
き裂が放射状に進展



① 起点部



上から下に進展するストライエーション



② 疲労破面と急速破断面の境界付近

ディンプルが混在

図6 破面のSEM観察 (T/P記号 E)

2-1-4 (6) 疲労試験T/P断面のSEM観察(図7、8参照)

図7の起点部①では、溶射皮膜が大きく損傷しているが、母材表面に密着していることから、フジミパウダーの密着性が優れていることが分かる。②の箇所ではき裂が分岐し、水平方向に進展していた。

図7は、図8の比較のために示したWOKAの溶射皮膜である。aが溶射皮膜層全体を示し、その表層から内部にかけての拡大像を順にb、c、dで示す。

WOKAの場合、WC粒子の堆積によって形成された溶射皮膜が、WCより弱いCo層(粒界にあたる)で破断し、き裂進展している。

一方、図8に示すように、a、b、c、dの位置関係は上記と同じであるが、フジミパウダーでは溶射皮膜が層状になっているため、き裂進展は直線的ではなく、層状の溶射皮膜に沿って進展しているものと、WC相とCo相の界面を進展するものの2通りがある。

・考察および成果

- ① フジミパウダーは密着性がよい。
- ② フジミパウダーはWOKAに比べき裂の進展が分岐を伴っているため、母材に達しにくい特性があると考えられる。

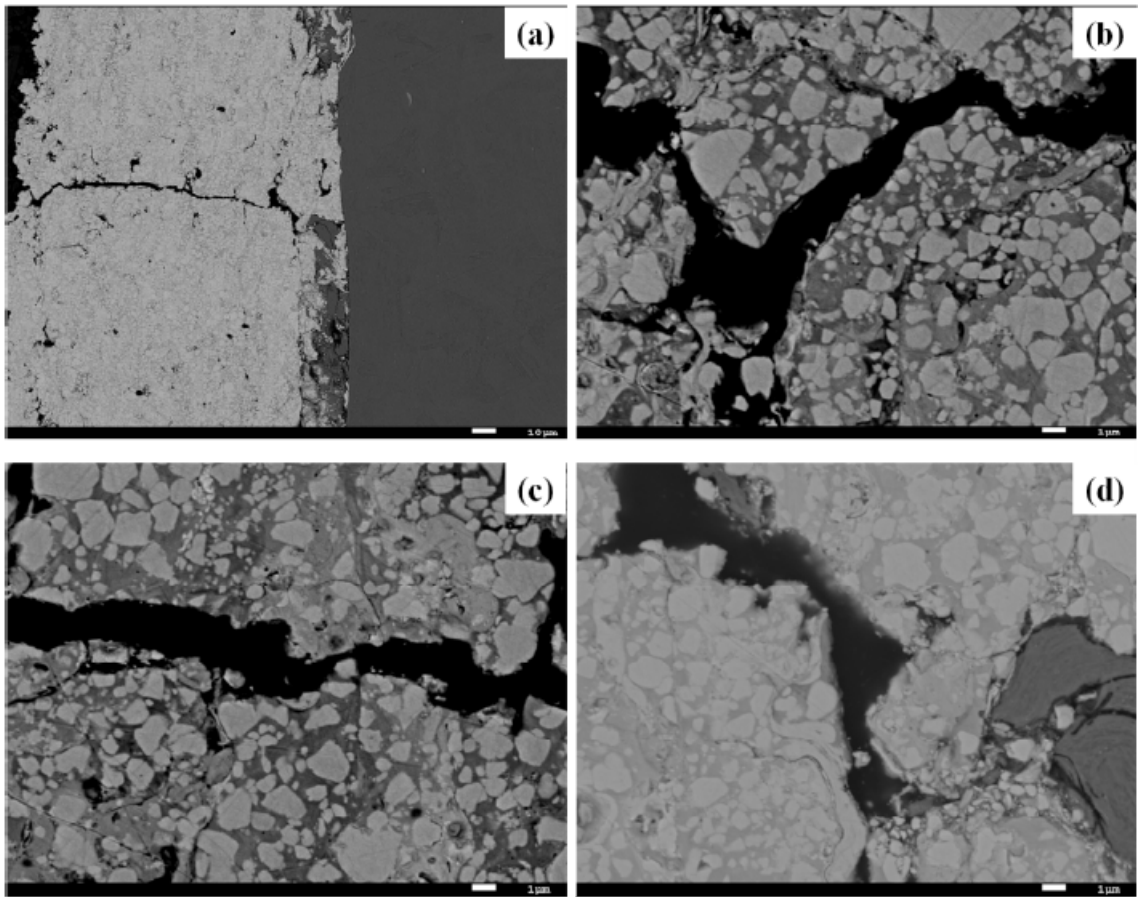


図7 WOKA 溶射皮膜断面組織 ショットピーニング+WPC+300℃溶射

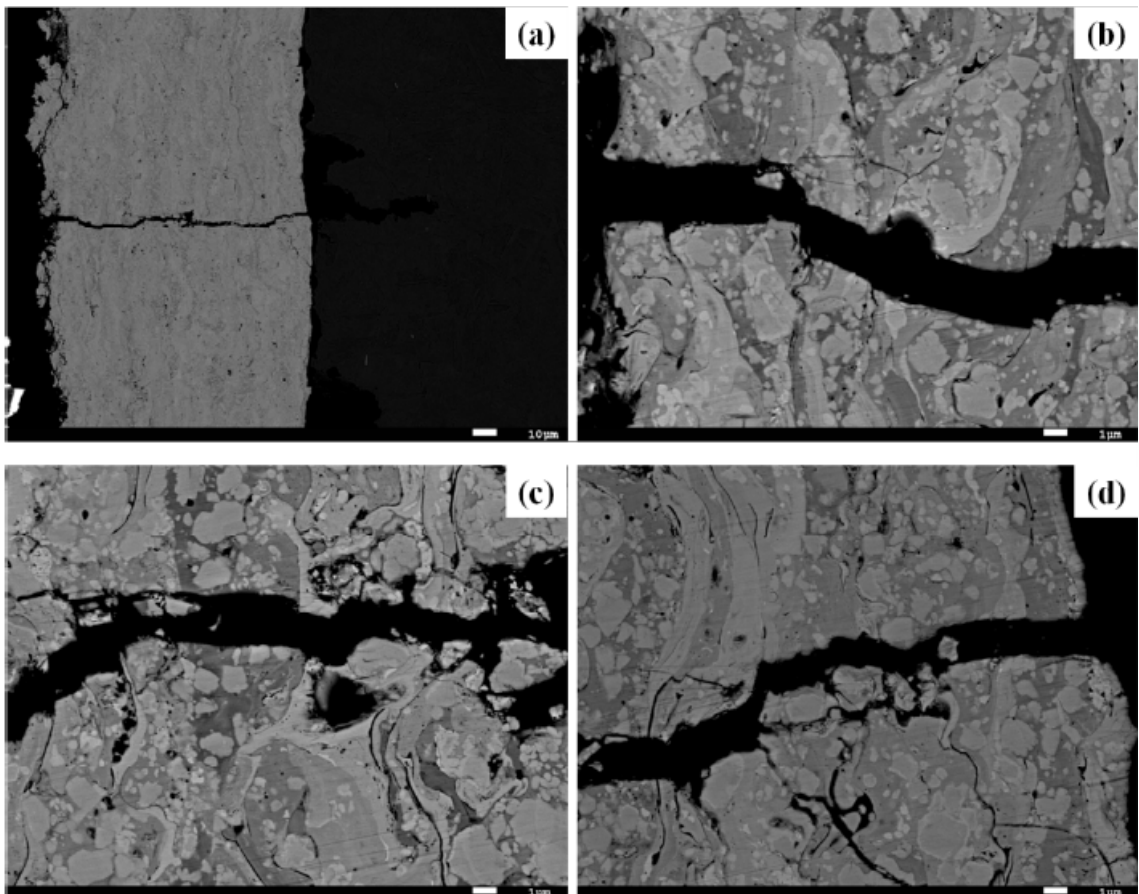


図8 フジミパウダー溶射皮膜断面組織 ショットピーニング+WPC+300℃溶射

2-2 パウダー付着率向上及び跳ね返り率低減のための試験と評価

(実施機関名：国立大学法人九州工業大学・旭金属工業株式会社)

付着率、跳ね返り率は図9に示すように平板と丸モノに対して実施した。なお、T/Pのサイズは平板 80×141.5×t1.6、丸モノ φ48.6×φ44×L300 (t2.3) とした。

パウダーと対象物、周辺の関係

- ・パウダー供給開始から溶射終了までの全時間 T
- ・T/Pだけに溶射された時間 t
- ・ホッパーのパウダー全使用量 M
- ・T/Pの溶射だけに使用した正味の使用量 m
($m = M \times t / T$)

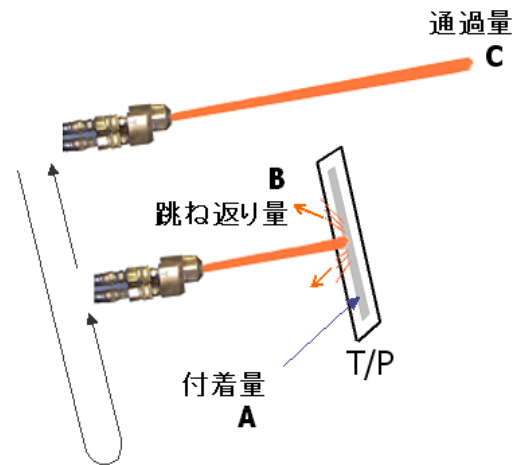
付着量A=試験片溶射前後の重量差

跳ね返り量B=m-A

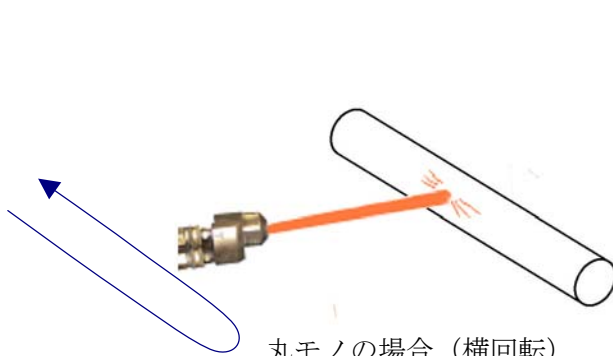
跳ね返り率=B/m×100

付着率=A/M×100

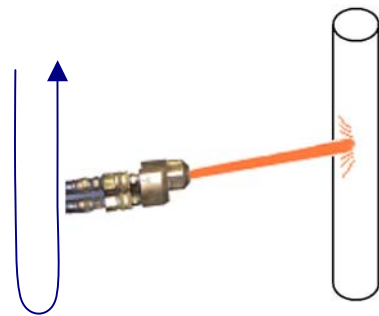
通過量C=M-A-B (M=A+B+C)



平板の場合



丸モノの場合 (横回転)



丸モノの場合 (縦回転)

目標値	
平板	付着率： 20%以上 跳ね返り率： 35%以下
丸モノ	試験後に設定

図9 付着率、跳ね返り率の定義

2-2-2 跳ね返り率確認治具による計測 (図10, 11参照)

跳ね返り率確認治具の T/P 取り付け部を溶射範囲より少し大きめに切り抜き、エア冷却のみと、エア冷却+スパイラルクーラーの2条件の試験を、何れも十分冷却できる条件で行った。(図10参照) なお、スパイラルクーラーとエア配管は圧縮空気の供給元(コンプレッサー)が同じであり、併用時の圧力低下を抑えるために、スパイラルクーラーは4本使用とした。

試験結果はすべて、跳ね返り率は目標の35%を大幅に上回っていたが、付着率はフジミパウダー、WOKA共に目標の20%以上を満足した。(図11参照)

また、スパイラルクーラーを併用することで、エアのみに比べ付着率が向上し、跳ね返り率が低下した。これにより、冷却を十分きかせると付着率、跳ね返り率に効果があることが分かった。

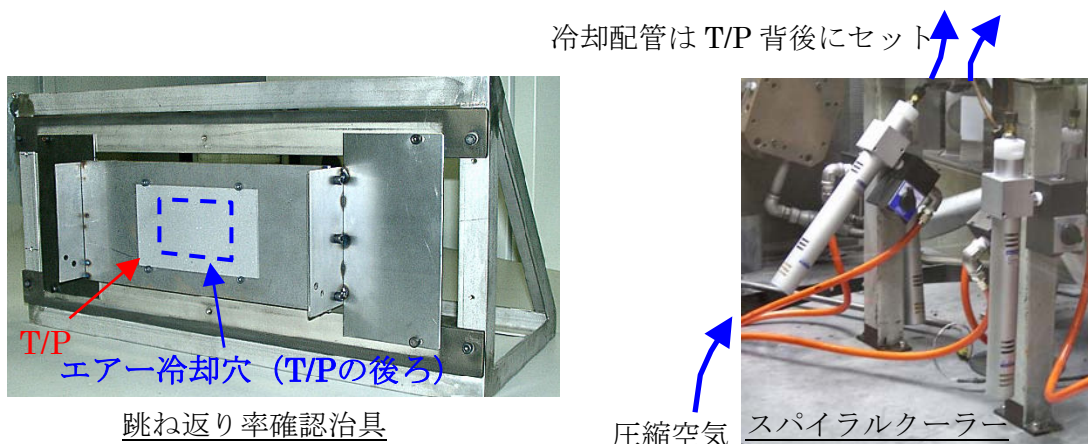


図10 跳ね返り率確認治具による平板の付着率、跳ね返り率

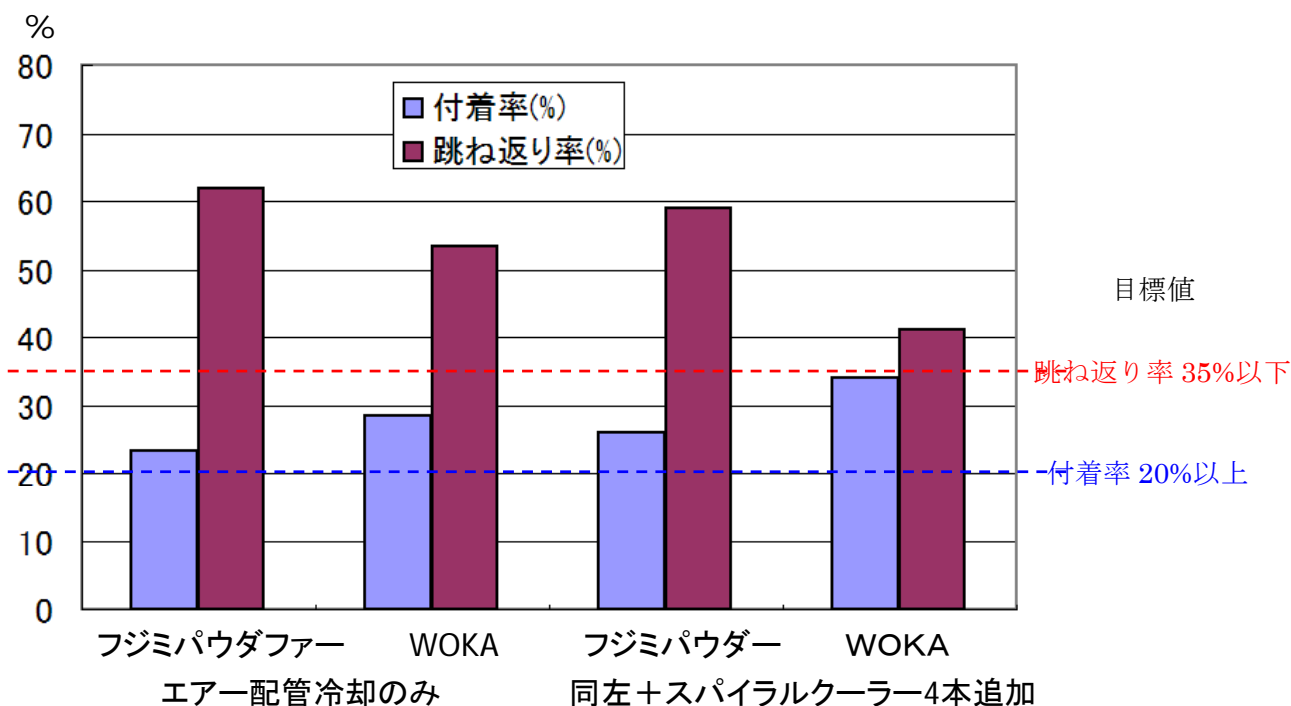


図11 跳ね返り率確認治具による平板の付着率、跳ね返り率

2-2-3 回転装置による計測 (図12、13参照)

回転方向を横・縦の2通りで実施した。その結果、付着率は回転方向では縦>横、パウダーではWOKA>フジミパウダー(跳ね返り率はそれぞれ逆)の関係が確認できた。

縦横での付着率の差異はばらつきの可能性もある。

付着率の目標値 20%を満足できたのは、WOKAのみであり、平板に比べると冷却が難しく、付着率も低い。

目標値の設定については、丸モノの径の問題、T/P 標準化の問題もあり、今後の検討が必要である。

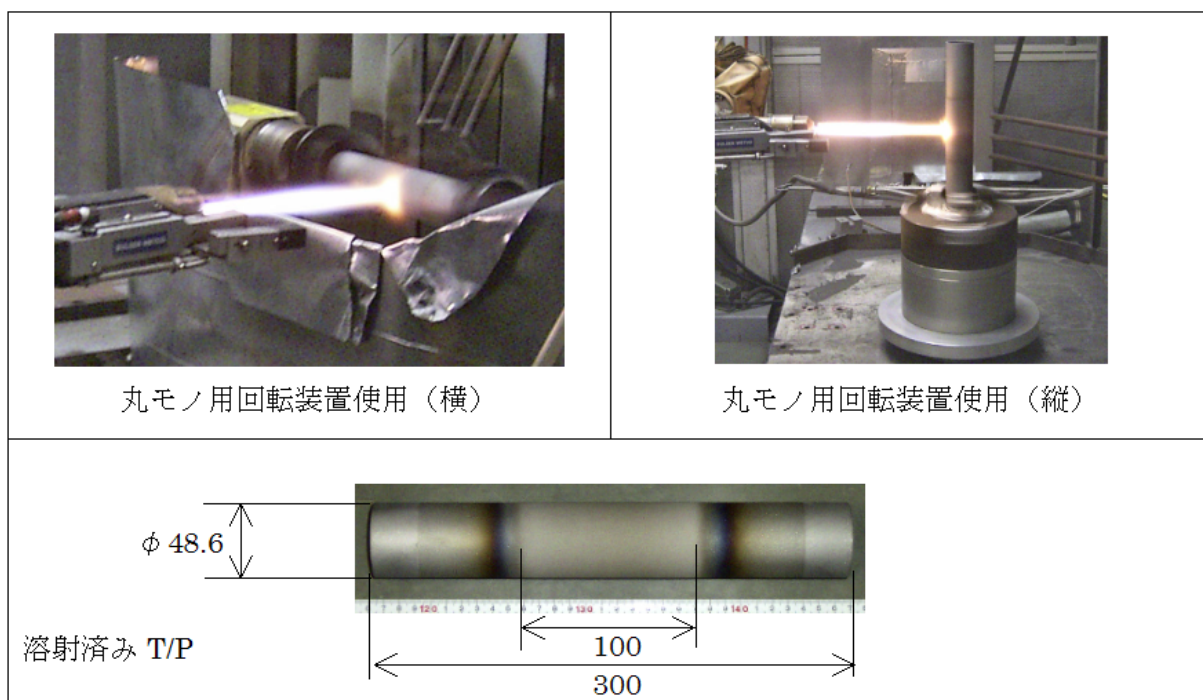


図12 横型回転装置および縦型回転装置による溶射風景と溶射 T/P の外観

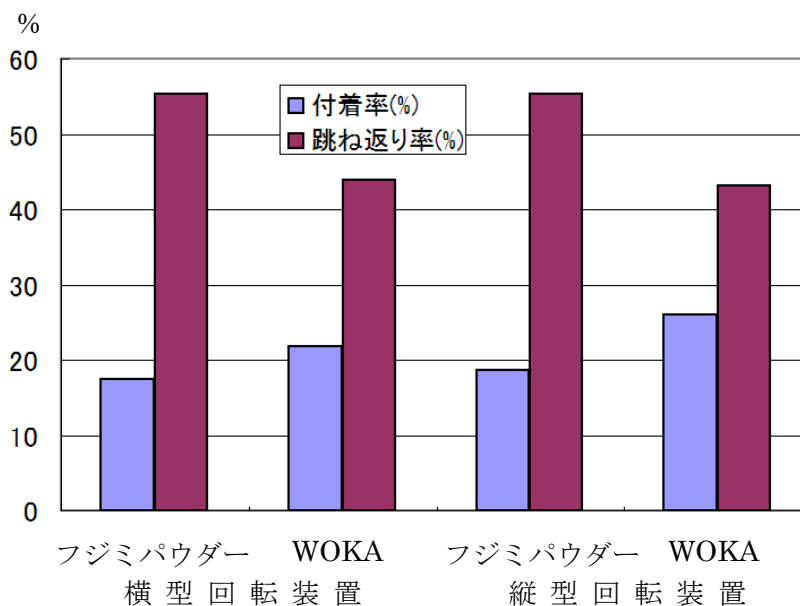


図13 回転速度 295rpm での付着率、跳ね返り率

2-2-4 溶射距離を変えた場合のフジミパウダーの付着量、皮膜特性

フジミパウダーはWOKAに比べパウダー粒子が細かく付着率が低いため、溶射距離230mm以外に最適な距離が存在する可能性がある。

そこで、溶射距離を190mm、210mm、230mm、250mm、270mmの5種類とし、それぞれ2枚ずつ試験を行った。溶射条件は次の通りである。

ガン速度：750mm/sec、ガス条件：酸素 700FMR、プロピレレン 800FMR、表面処理：ブラスト、T/Pサイズ 65×25×t1.27、材質 15-5PH材

なお、付着率はT/Pサイズに依存して値が変わるため、ここでは付着量で比較した。

図14に示す結果から、付着量と表面粗度については、溶射距離の違いによる差は見られなかったが、皮膜硬度は溶射距離が250mm以上で低下する傾向が見られた。

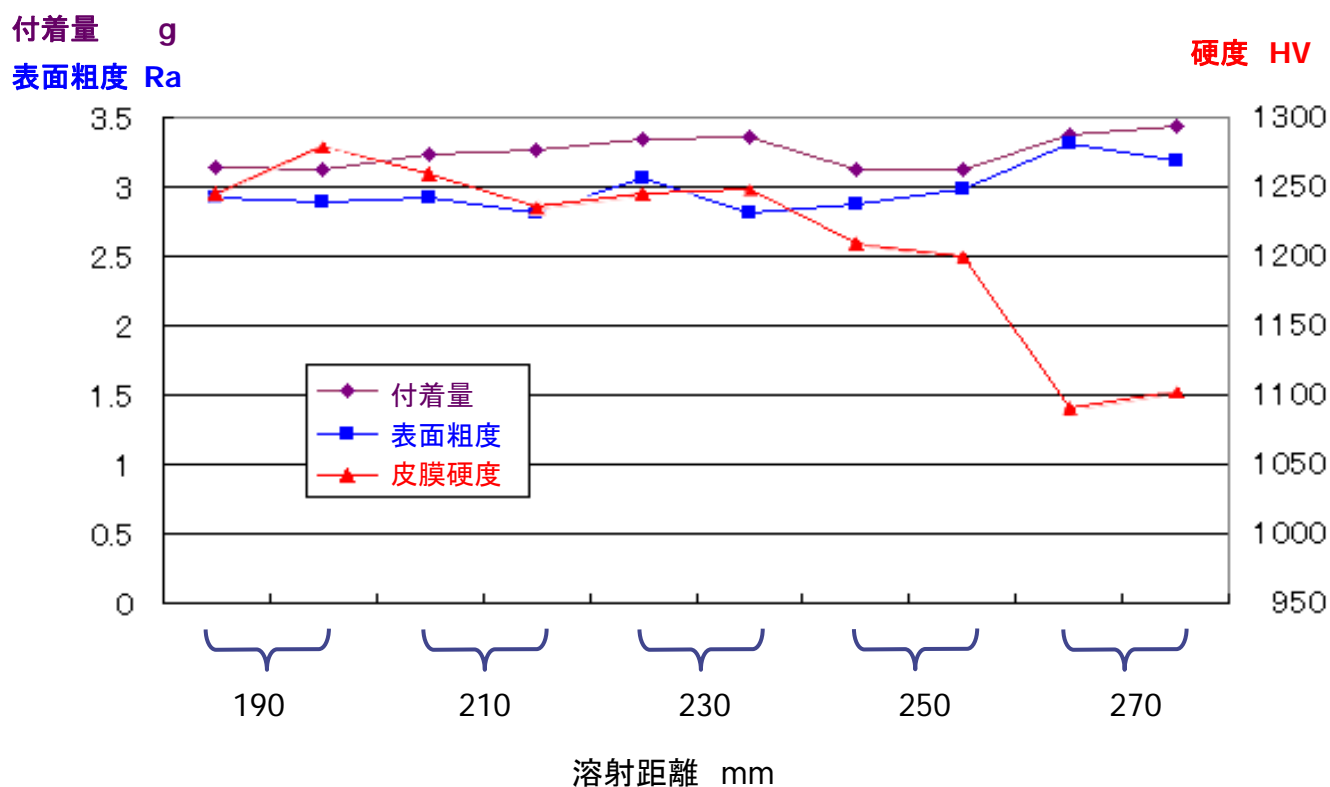


図14 溶射距離と付着量、表面粗度、皮膜硬度の関係

・考察および成果

- ① 平板の場合、冷却を十分にきかせると付着率が上昇し、フジミパウダー、WOKA共に目標値 20%を超えることが確認できた。これは、退避時間が減少したことが大きく影響している。
- ② フジミパウダーは表面粗度、緻密性、疲労強度等、さまざまな点で優れた特性をもっているが、付着率の点ではWOKAよりやや低い傾向を示した。
- ③ 丸モノは冷却効率が低く、平板に比べ付着率も低いが、今後、冷却方法だけでなく目標値の設定、T/P標準化の問題もあり、検討が必要である
- ④ 跳ね返り率については、付着率と相反する性質があるため、付着率のみの評価で十分であることが分かった。
- ⑤ ジミパウダーの最適溶射距離を求めるため、溶射距離 230mm を挟んで上下2ポイント追加して試験を行ったが、最適な溶射距離は確認できなかった。皮膜硬度は要求値を満たしていたが、溶射距離 250mm 以上で低下する傾向が現れた。
今後、フジミパウダーの付着率が低い原因と合わせ、最適距離を求める必要がある。

2-3 ロボット現有機に対するプログラム開発・制御方法の開発 (図15参照)

(実施機関名：国立大学法人九州工業大学・旭金属工業株式会社)

前年度は、複雑形状部品に対応するCADデータ (IGES形式) をMottoSim E Gに取り込みCSVファイルとして①目標点データ (XYZ+狙い角) と、②ジョブ構成 (管理ジョブ、ループ回数指定) を入力してロボットプログラム (JBI) を自動生成するソフトウェアを開発した。

今年度は、MottoSim VRC内に取り込んだCADデータ (CATIA形式) から稜線を検出して溶射パスを作成し、補間種別、位置、姿勢、速度などの属性情報を編集して溶射ジョブを自動生成するソフトウェアを開発した。

補間種別とは、ガンの移動命令 (MOV 命令) に付加する機能で、直線補間、円弧補間などがあり、「一例：MOVL V=750」では、直線補間で速度 750mm/secであることを示す。位置、姿勢とは、ガンの座標位置を示し、距離、角度などの情報を含む。

新たに溶射ロボットを制御するペンダントの機能も備え、オフラインでの作業性が大きく向上した。

ソフトウェアの外観と、オフラインティーチングによる動作ポイントの実機での確認状況を図15に示す。

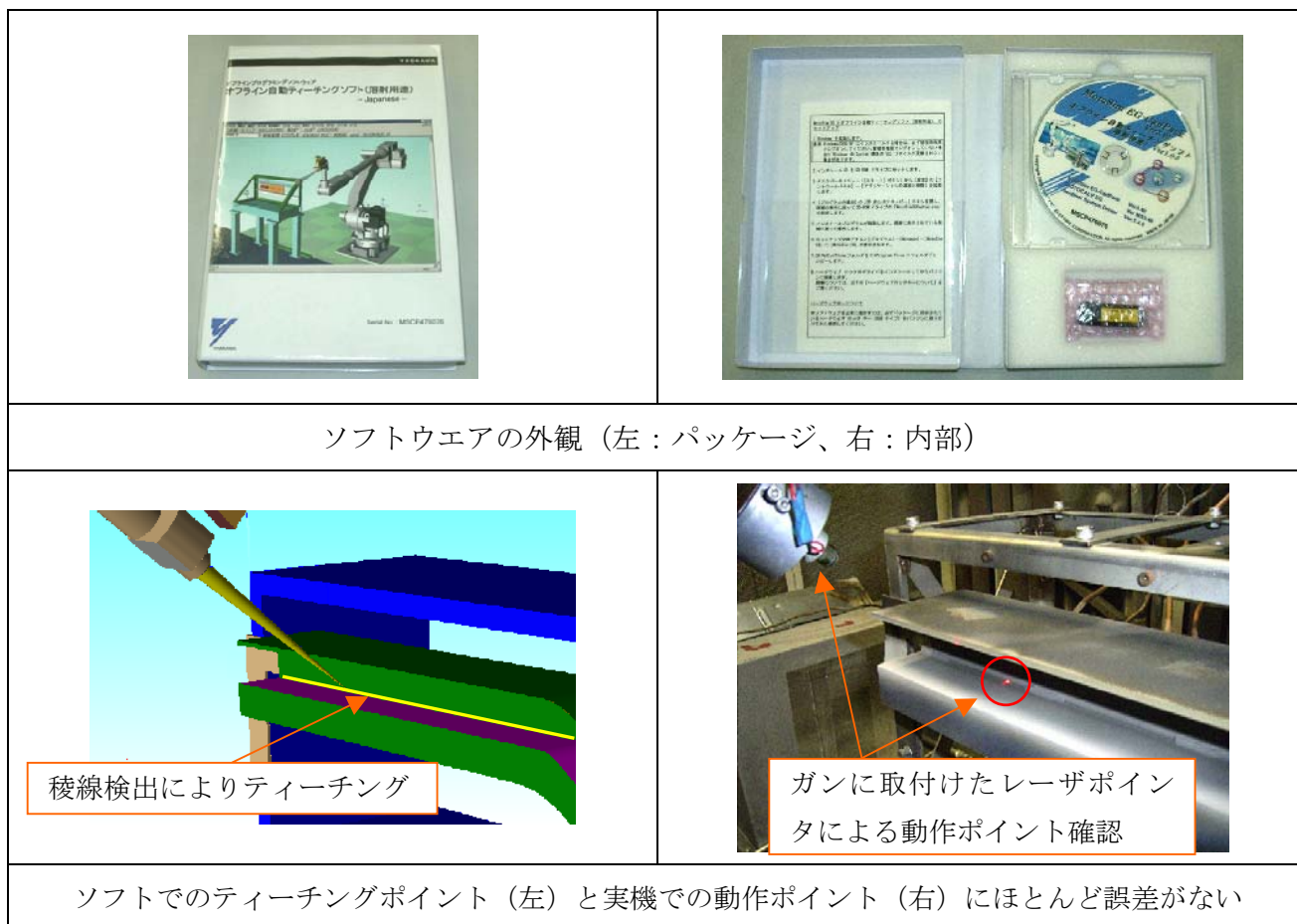


図15 ソフトウェアの外観とオフラインティーチングの状況

前年度は 3D ワークデータの他に目標点データ XYZ+狙い角として CSV ファイルを作成する必要があったが、今年度は、MotoSim VRC の中で作業し、ロボットプログラムを自動生成するよう改良が加えられた。

さらに、オフラインソフトも前年度の MotoSim EG からさらに上位機能を持つ MotoSim VRC に代わり、実機のペンダントが持つ多くの機能が加わった。

上記オフラインソフト開発により、下記のような合理化が可能となった。

- ① ティーチング時間が短縮できる。
- ② 複雑形状ワークに対して、正確なプログラムができる。
- ③ 生産を止めることなく机上でプログラム作成・修正ができる。
- ④ 生産を止めることなく机上でプログラムの干渉チェック、軌跡確認ができる。
- ⑤ 製品、治具がなくてもプログラム作成ができる。
- ⑥ 納期が短縮でき、品質向上、コスト削減の点で有利である。

2-4 複雑形状ワークによる皮膜の評価

(実施機関名：国立大学法人北海道大学・国立大学法人九州工業大学・旭金属工業株式会社)

2-4-1 複雑形状ワークの製作

図 1 6 に示す複雑形状ワークを使用した。

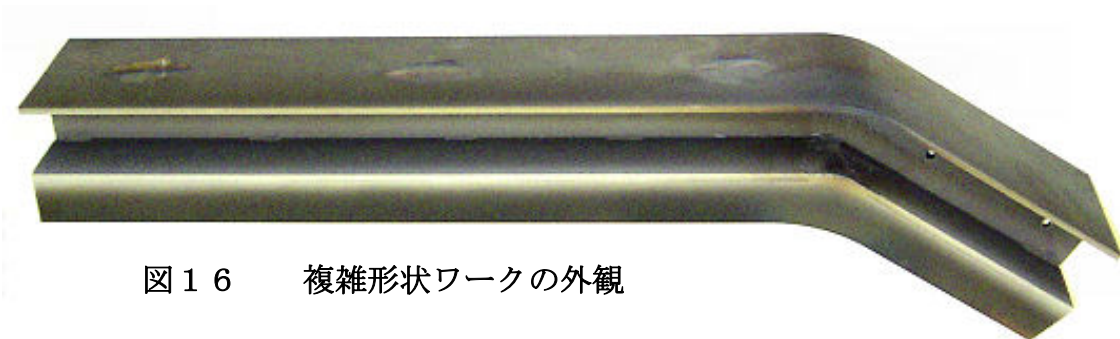


図 1 6 複雑形状ワークの外観

2-4-2 複雑形状ワークへの溶射

複雑形状ワークに対して、前年度実施した方法（ここでは No.1 の方法とする）の結果を元に、今年度は次に示す 4 つの方法（No.2～5 の方法）を実施した。（図 1 7 参照）

No.2～No.5 までの溶射方法を以下に示す。

・ No.2

No.1 では、ガンが曲がり部を中心側とするよう円弧状に回転することと、曲がり部でガン姿勢が変わることにより溶射面上におけるフレームの移動速度が低下し、溶射時間が増大して過熱状態となり、皮膜剥離を生じた。そこで、水平面に対して直角となる一定のガン姿勢で溶射を行った。さらに、溶射時には曲がり部で稜線に対してガンフレームの軌跡が Z 方向（図では下方向）にずれるため、ずれの量に相当する 5mm 分

を曲がり部外側（図で Z 方向上側）に補正することで膜厚の均一化を狙った。

• No.3

水平面、傾斜面ともに面とガンとのなす角度が同じになるように、ワークの傾斜角度 33.3° の $1/2$ だけ溶射ガンを傾けて溶射を行った。

• No.4

溶射角度の条件は上記 No.3 と同じであるが、溶射速度をワークの端部でも一定となるようアプローチを増加した。

さらに、曲がり部における補正も行った。

• No.5

アプローチと曲がり部での補正は上記 No.4 と同じであるが、溶射面に対するガン角度を均等にするもう 1 つの方法として、溶射ガンの往復動作で行きは水平面に対して直角、帰りは傾斜面に対して直角となるようガン姿勢をワーク端部で入れ替えるようにした。

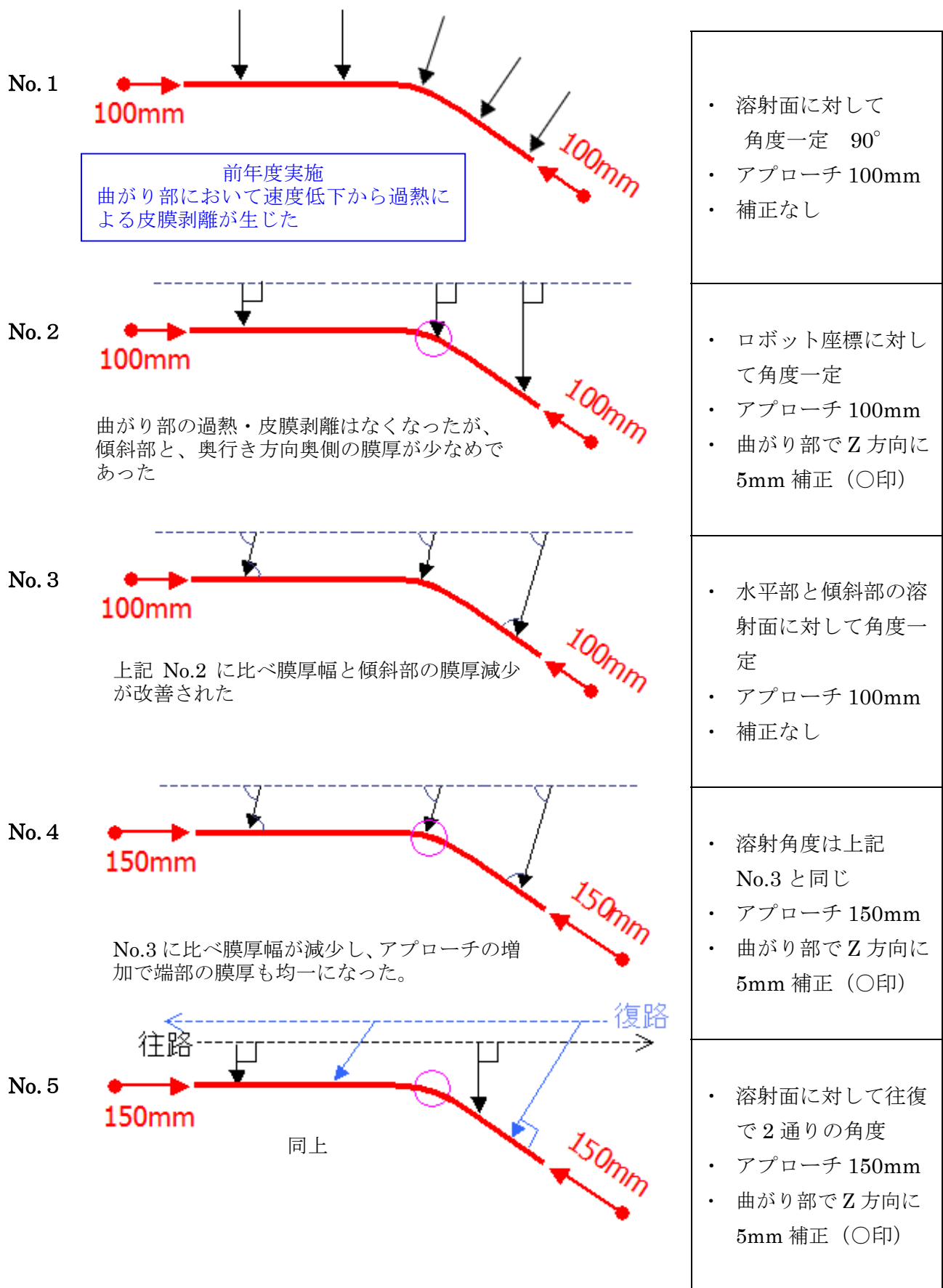


図 1 7 複雑形状ワークの溶射パターン

赤色の曲がった線は、複雑形状ワークの稜線を示す

2-4-3 複雑形状ワーク溶射部断面の皮膜性状評価

断面の皮膜性状評価は、表面粗度との関係を見る上でも両者合わせて表示した方が分かりやすいため、次節で評価したが、結果のみ以下に示す。

- ① WOKAを用いた No.4、No.5 の方法による溶射では、複雑形状ワークの長手方向、奥行き方向共に膜厚差が改善し、膜厚の要求値 $125 \pm 25 \mu\text{m}$ を満足した。
- ② WOKAを用いて No.3 の方法で溶射した複雑形状ワークの曲がり部の組織観察では、ポロシティー、酸化物、未熔融粒子、および皮膜硬度がすべて要求値（1%以下、HV1000 以上）を満足していたが、SEM 観察では複雑形状ワークの奥行き方向で、手前側より奥側の組織にポロシティーが多く分布していた。
- ③ フジミパウダーを用いた No.4、No.5 の方法による溶射では、WOKA同様複雑形状ワークの長手方向、奥行き方向共に膜厚の要求値 $125 \pm 25 \mu\text{m}$ を満足していた。WOKAとの膜厚の比較ではほぼ同等であった。
- ④ 上記複雑形状ワークの曲がり部を含む代表箇所 3 箇所から切出した試料断面についてマイクロ組織と硬度を調査したが、すべての箇所で要求値を満足した。
- ⑤ マスク治具を装着し、フジミパウダーを用いて No.4 の方法で溶射した射複雑形状ワークでは、治具の固着が発生し、膜厚も要求値の $125 \pm 25 \mu\text{m}$ から外れる箇所が見られた。

2-5 複雑形状ワークによる皮膜面粗度の評価

(実施機関名：旭金属工業株式会社)

図17の No.2~5 の方法で溶射したワークに対して、複雑形状ワーク用の特注マイクロメータによる膜厚計測、表面粗度計測、皮膜断面マイクロ計測を行った結果を以下に示す。なお、溶射面の膜厚、表面粗度測定位置は図18に示すように、ワーク左端から10mm、200mm（一部250mmの箇所あり）、400mm、曲がり部頂点、ワーク右端から100mm、10mmの6箇所を対象とし、手前から奥にかけて13mm間隔で測定した。

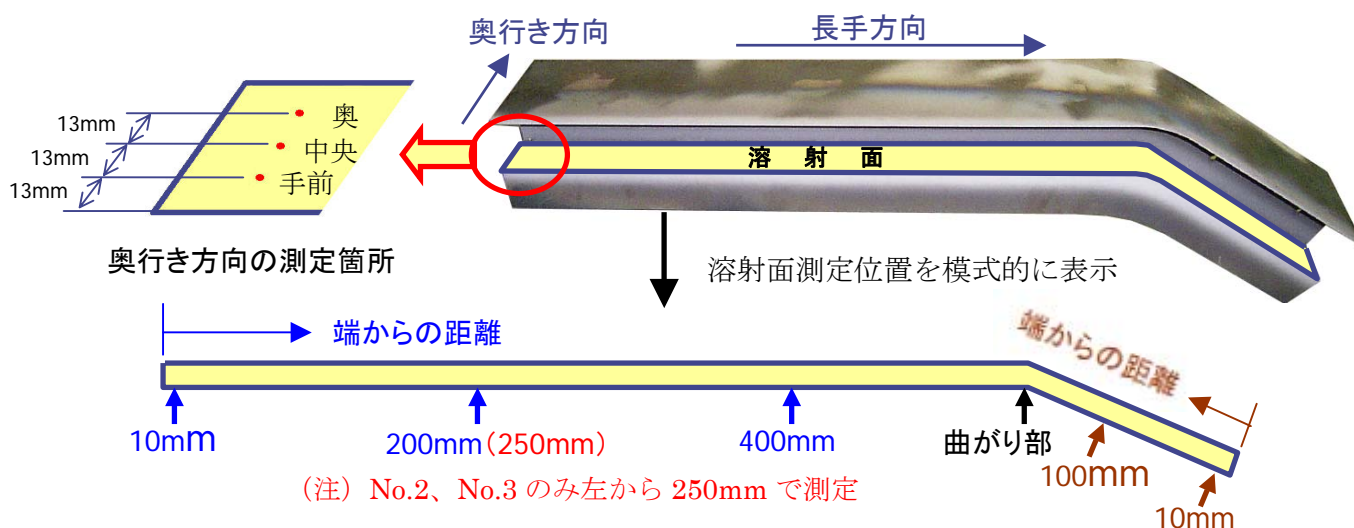


図18 溶射面の測定・観察位置

2-5-1 WOKAによる溶射皮膜面粗度の評価

表2にWOKAを用いて No.2~.5 の4通りの方法で溶射したワークの膜厚と表面粗度の計測結果を示す。

表2より、まず No.2 では曲がり部の温度上昇、皮膜剥離がなくなったが、傾斜面の膜厚が他の箇所比べて薄く、奥行き方向では手前から奥にかけて薄くなる傾向が見られた。また、No.3 では膜厚差は減少したが、奥行き方向では手前から奥にかけて薄くなる傾向が見られた。

一方、No.4 と5 では、長手方向、奥行き方向共に膜厚差が改善した。

なお、表面粗度はいずれの方法でも差がなく、目標値の $Ra 4\mu m$ 以下は達成できなかった。

表2 WOKA 使用時の膜厚と表面粗度の結果 (単位: μm)

No.	溶射条件			奥行き方向 測定箇所	左から 10mm		左から 200mm		左から 400mm		曲がり部		右から 100mm		右から 10mm	
	角度	補正	アプローチ		膜厚	Ra	膜厚	Ra	膜厚	Ra	膜厚	Ra	膜厚	Ra	膜厚	Ra
2	90°	有	100mm	奥	160	4.44	160	4.66	—	—	130	4.22	—	—	90	4.56
				中央	150	4.24	170	4.04	—	—	140	4.70	—	—	120	3.96
				手前	170	4.56	170	4.82	—	—	160	4.94	—	—	100	4.62
3	2面 に対し一定	なし	100mm	奥	121	4.32	110	4.56	—	—	—	—	—	—	100	4.74
				中央	130	4.54	110	3.96	—	—	—	—	—	—	112	4.26
				手前	134	4.02	120	4.48	—	—	—	—	—	—	142	4.92
4	一定	有	150mm	奥	120	4.32	120	4.72	120	4.78	120	4.80	130	4.34	120	4.20
				中央	120	4.20	120	4.52	120	4.66	140	4.54	130	4.04	120	4.82
				手前	120	4.80	120	4.14	110	4.56	120	4.40	110	4.30	120	4.56
5	往復 別角度	有	150mm	奥	100	4.92	100	4.32	110	4.84	100	4.48	110	4.78	100	4.70
				中央	120	4.86	100	4.42	110	4.72	110	4.66	120	4.20	120	4.20
				手前	120	4.46	100	4.70	110	4.68	120	4.74	110	4.76	120	4.34

(注) No.3 の両端 10mm の膜厚が 3 桁出ているのは、デジタルマイクロメータ使用による

赤色文字は、左から 250mm の箇所を測定した

次に、No.3 の方法で溶射したワークの曲がり部を切り出し、断面組織と硬度を調べた。その結果、ポロシティーが 0.12%、酸化物が 0.02%、未熔融粒子が 0.07%であり、皮膜の硬度は HV1218 で、すべて要求値（前者：1%以下、後者 HV1000 以上）を満足していた。

同じく曲がり部断面の SEM 観察では、手前側は比較的緻密な皮膜組織であるのに対し、奥側はポロシティーが多く皮膜性状に差が認められた。その結果を図 19 に示す。

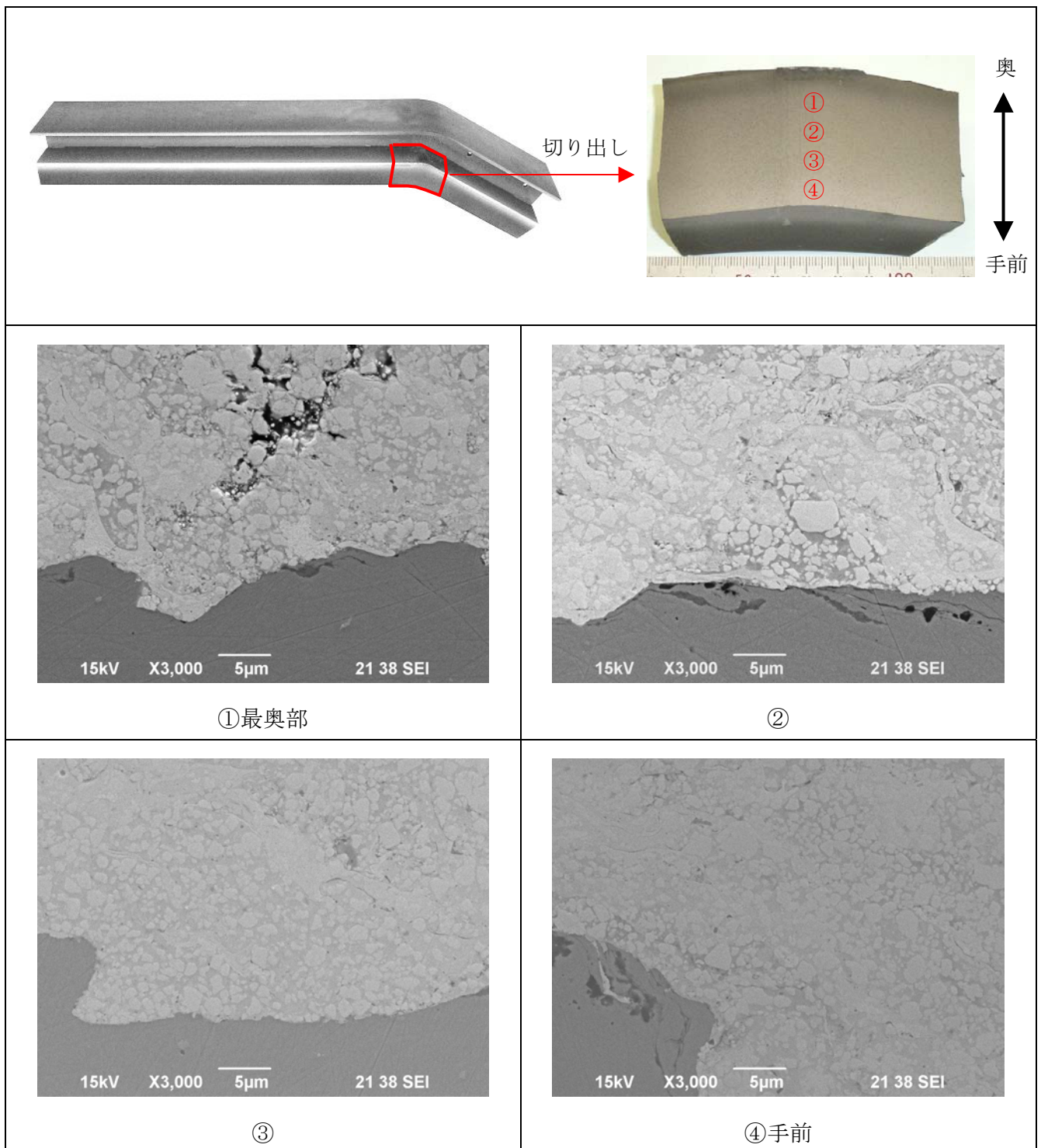


図 19 複雑形状ワークの断面組織 SEM 観察

2-5-2 フジミパウダーによる溶射皮膜面粗度の評価

膜厚に関して良好な結果が得られた No.4、5 の方法によりフジミパウダーを使用して溶射を行った。膜厚と表面面粗度の結果を表3に示す。

膜厚は長手方向、奥行き方向共に均一な値を示し、表面粗度もすべて目標値の Ra 4 μm 以下を達成した。

なお、溶射方法の違いによる表面粗度への影響は認められなかった。

表3 フジミパウダー使用時の膜厚と表面粗度の結果 (単位: μm)

No.	溶射条件			奥行き方向測定箇所	左から10mm		左から200mm		左から400mm		曲がり部		右から100mm		右から10mm	
	角度	補正	アプローチ		膜厚	Ra	膜厚	Ra	膜厚	Ra	膜厚	Ra	膜厚	Ra	膜厚	Ra
4	2面に対し一定	有	150mm	奥	120	2.52	120 125.7	2.80	120	2.58	140 148.5	2.98	120 127.2	2.80	130	2.82
				中央	120	2.70	120 127.2	2.42	120	2.64	130 137.1	2.52	120 110.2	2.92	130	2.78
				手前	120	2.72	110 120.0	2.56	110	2.44	130 126.2	2.78	120 105.5	2.76	110	2.98
5	往復別角度	有	150mm	奥	120	2.72	120 124.7	2.76	120	2.80	140 129.3	2.64	120 130.3	2.98	130	2.94
				中央	120	2.88	120 128.3	2.76	120	2.82	110 120.5	2.82	110 116.9	2.78	120	2.64
				手前	120	2.64	120 114.3	2.74	120	2.72	130 120.5	2.80	110 114.8	2.88	120	2.88

(注) 赤色文字で示した膜厚は、以下で調査した切断面での測定値を示す

次に、ワーク左端から 200mm、曲がり部、ワーク右端から 100mm の 3 箇所を切り出し、断面についてマイクロ組織と皮膜硬度を調べた。その結果を表4に示し、皮膜の断面組織を図20、21に示す。すべての測定結果で、要求値を達成した。

表4 溶射皮膜のミクロ組織と硬度

測定箇所		左から 200mm				曲がり部				右から 100mm			
項目		P	O	U	HV	P	O	U	HV	P	O	U	HV
要求値		1%以下			1000 以上	1%以下			1000 以上	1%以下			1000 以上
No. 4	平均値	0.09	0.16	0.16	1282	0.10	0.04	0.21	1316	0.12	0.10	0.19	1244
	測定値 の範囲	0.06	0.07	0.09	1149	0.03	0.03	0.13	1226	0.05	0.04	0.17	1109
		0.14	0.13	0.20	1391	0.14	0.05	0.30	1391	0.23	0.18	0.20	1363
No. 5	平均値	0.08	0.04	0.13	1306	0.15	0.07	0.13	1330	0.10	0.04	0.17	1259
	測定値 の範囲	0.06	0.03	0.09	1261	0.09	0.04	0.09	1250	0.04	0.02	0.15	1129
		0.09	0.04	0.15	1350	0.24	0.10	0.18	1391	0.13	0.04	0.19	1391

(注) P : ポロシティー、O : 酸化物、U : 未溶融粒子、HV : ビッカース硬度

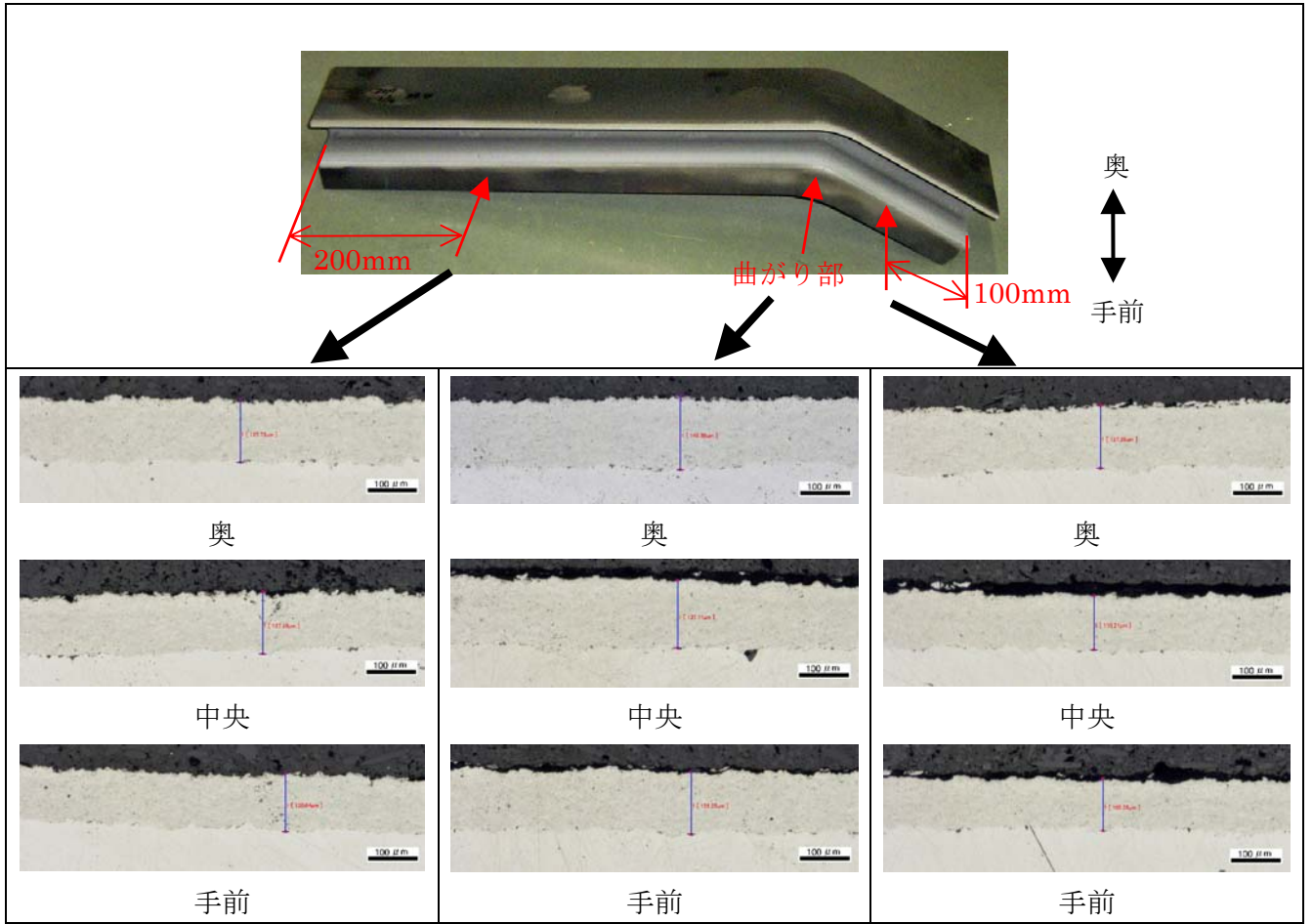


図 2 0 複雑形状ワークの断面マイクロ組織 溶射方法 : No.4

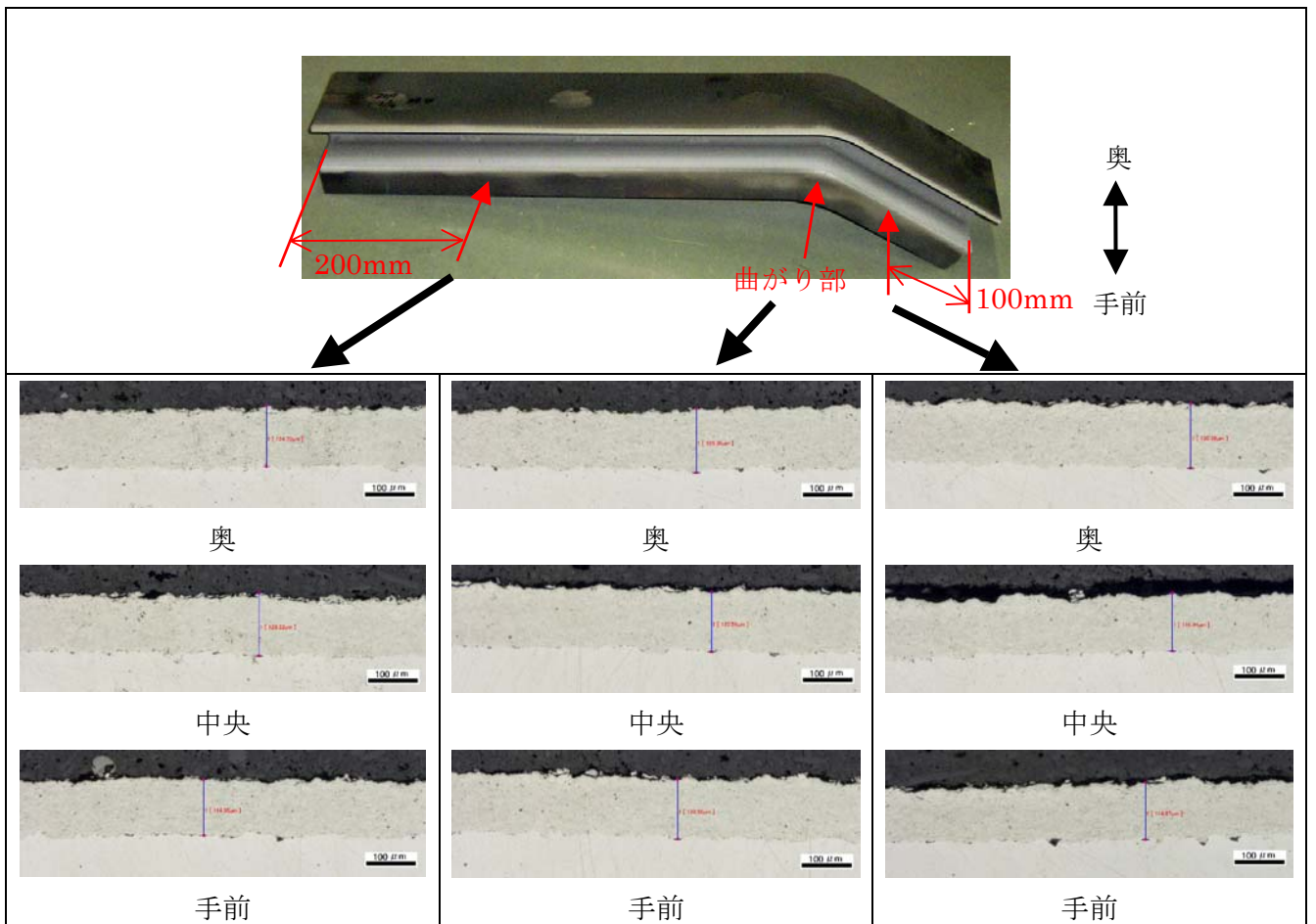


図 2 1 複雑形状ワークの断面マイクロ組織 溶射方法 : No. 5

2-5-3 複雑形状ワークのマスク治具による溶射

ワークの垂直面は溶射しないため、マスクが必要である。そのため、複雑形状ワークに対して、試作したマスク治具を装着して No.4 の方法で溶射を行った。

溶射により治具が固着してワークの奥側ではバリができ、マイクロメータが正確に装着できなくなったため、奥の測定は省略した。

表 5 に膜厚測定結果を示す。バリの生成、部分的な膜厚減少などの問題点が認められ、一部膜厚の要求値 $125 \pm 25 \mu\text{m}$ から外れる箇所が見られた。

表 5 フジミパウダーによるマスク治具使用時の膜厚 (単位: μm)

No.	溶射条件			奥行方向測定箇所	左から 10mm	左から 200mm	左から 400mm	曲がり部	右から 100mm	右から 10mm
	角度	補正	アプローチ		膜厚	膜厚	膜厚	膜厚	膜厚	膜厚
4	2面に対し一定	有	150mm	中央	120	80	110	90	120	130
				手前	120	100	90	90	120	120

・考察および成果

- ① No.4、No.5 のように溶射面に対する角度を均等にすると、膜厚が長手方向、奥行き方で均一になることが分かった。($125 \pm 25 \mu\text{m}$ を達成)
- ② アプローチを 100mm から 150mm に増やすことによりワーク端部のガン速度が一定となり、膜厚が均一化した。
- ③ WOKA は表面粗度の向上が見られず目標値の $4 \mu\text{m}$ を上回ったが、フジミパウダーでは目標値以下を達成した。
- ④ 今回の試行データの範囲内では、溶射方法の違いによる表面粗度への影響は小さいことが確認できた。
- ⑤ 溶射方法 No.4、No.5 による結果では、硬度には差異が認められず、ともに要求値 HV1000 以上を満たした。
- ⑥ 上記について、膜厚、表面粗度、ミクロ組織の結果を図 22 にまとめたが、大差は認められず、ともに目標値、要求値を満たした。(膜厚の断面計測では、若干 No.5 が均一な値を示していた)

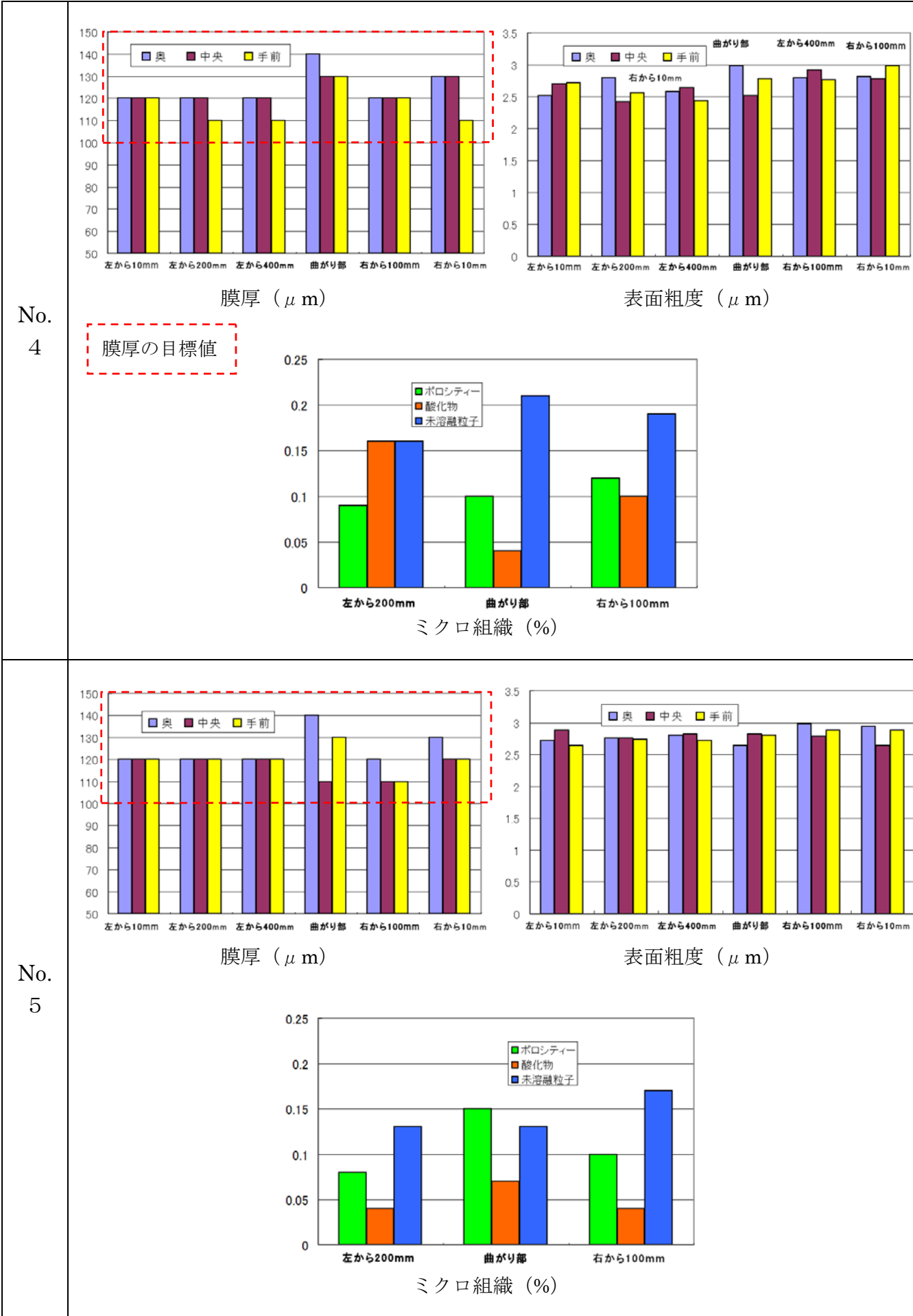


図 2 2 No.4、No.5 の溶射方法による測定結果のまとめ

2-6 溶射管理技術の開発

平成 20 年度から 22 年度にかけて実施してきた評価項目には下記のものがある。

- ① 溶射温度パラメータによる結果
- ② 溶射距離パラメータによる結果
- ③ 溶射速度パラメータによる結果
- ④ 溶射膜厚パラメータによる結果
- ⑤ 溶射面温度モニタリング測定精度向上
- ⑥ 溶射皮膜構造に関する基礎データの結果
- ⑦ 熱拡散効果確認試験の結果
- ⑧ 冷却方法を採用した取付治具による T/P の評価結果
- ⑨ パウダー付着率向上及び跳ね返り率低減のための試験結果
- ⑩ ロボット現有機に対するプログラム開発・制御方法の開発
- ⑪ 溶射面粗度向上のための試験結果
- ⑫ 複雑形状ワークによる皮膜の評価結果
- ⑬ 複雑形状ワークによる皮膜面粗度の評価結果

これらの評価結果から得られた研究開発の成果を集大成し、実機レベルの溶射に適応したHVOF溶射のプロセス仕様書を作成した。以下にその目次を示す。

1. 適用：

この仕様書は、磨耗、熱、腐食を防止することを要求している金属部品に対するサーマル・スプレー・コーティング（HVOF: High Velocity Oxygen-Fuel）の要求事項を設定する。

2. 関連文書：

以下の文書の最新版は、本仕様書に規定されている範囲において、本仕様書の一部となる。

ASTM C 633 - Adhesion or Cohesive Strength of Flame Sprayed Coating

ASTM E 384 - Micro hardness of Materials

3. 目次：

<u>Section</u>	<u>Subject</u>	<u>Page</u>
1	適用	1
2	関連文書	1
3	目次	1
4	材料管理	3
4. 1	パウダー	3
4. 2	ガスと燃料	3
4. 3	ブラスト粉末	3
4. 4	ニューマ・ブラスター粉末	3
5	設備管理	3
5. 1	スプレー・コーティング装置	3
5. 2	ブラスト装置	3
5. 3	ニューマ・ブラスター装置	3
5. 4	冷却装置	4
5. 5	温度計	4
5. 6	パウダー貯蔵装置	4
5. 7	コンプレッサー	4
6	製造管理	4
6. 1	洗浄	4
6. 2	ブラスト洗浄及びWPC処理	4
6. 3	溶射のマスク治具	5
6. 4	溶射	5
6. 5	後処理	5
7	設備の維持管理	6

3. 目次：(続き)

<u>Section</u>	<u>Subject</u>	<u>Page</u>
7. 1	HVOF設備の日常点検	6
7. 2	HVOF設備の定期点検	6
7. 3	高圧ガス設備の日常点検	6
7. 4	高圧ガス設備の定期点検	6
8	品質要求事項	6
8. 1	外観	6
8. 2	厚さ	6
8. 3	表面粗さ	6
8. 4	密着性	6
8. 5	ミクロ組織	6
8. 6	硬度	7
8. 7	疲労強度	7
9	試験方法	7
9. 1	密着性試験	7
9. 2	接着強度試験	8
9. 3	ミクロ組織	9
9. 4	硬度	9
9. 5	疲労強度	10
10	溶射プログラムの作成と管理	10
10. 1	プログラム作成手順	10
10. 2	オフライン自動ティーチングソフトでのプログラムティーチング	10
10. 3	プログラムの管理方法	10
Appendix A	表1 溶射条件表	11
	別紙1 HVOF設備メンテナンス要領書	
	別紙2 プロピレンガス製造設備定期自主検査基準	
	別紙3 プロピレンガス製造設備日常点検基準	
	別紙4 酸素ガス製造設備定期自主検査基準	
	別紙5 酸素ガス製造設備日常点検基準	
	別紙6 水素ガス製造設備定期自主検査基準	
	別紙7 水素ガス製造設備日常点検基準	
	別紙8 窒素ガス製造設備定期自主検査基準	
	別紙9 窒素ガス製造設備日常点検基準	
	別紙10 溶射プログラム作成・管理要領書	

最終章 全体総括

1. 平成20年度 「環境配慮に適応した溶射技術高度化の開発」

<溶射中のワークの温度分布調査>

① 溶射用 T/P の設計・製作

- ・母材組織、溶射組織、硬度分布、界面形状、表面粗さ用試験片と疲労試験用の平板 T/P および丸棒 T/P の設計と製作を行った。

② T/P による基礎試験とデータ収集・評価

- ・溶射温度は上限 300℃まで良好であった。
- ・溶射距離はメーカー推奨の 230mm が良好であった。
- ・溶射速度は、500mm/sec、750mm/sec が良好であった。
(溶射時間も考慮すると、750mm/sec が最良)
- ・溶射膜厚は 100 μ m、200 μ m とともに良好であった。
- ・上記最適条件による溶射では、表面粗さを除きすべての要求基準を満たしていたが、4130 材、Ti-6Al-4V 材も同様であった。
- ・15-5PH 材の丸棒 (φ 37.1×280mm、試験部 φ 12.7mm) と平板 (114mm×19mm×3.175mm) の疲労試験による破断サイクル数は、前者が 83,745 サイクル、後者が 33,024 サイクルで、共に目標の 100,000 サイクル未満であった。
- ・ワーク温度の材料内部分布データを得ることはできなかった。

③ 溶射面温度モニタリングの測定精度向上

- ・接触温度計を基準にして測定温度に対する放射率を求めた。精度向上は未達成であった。
- ・黒体を用いて放射温度計の温度を求める試験を行ったが、黒体塗料の劣化による影響で満足なデータは得られなかった。

<ワークの冷却効率の向上>

④ 冷却方法を採用した取付治具の設計・製作

- ・回転物用のフィン付き冷却治具と、銅電鍍治具を製作し、これを用いて溶射試験を行った。治具の仕様に問題ないことを確認した。

⑤ 熱拡散効果確認試験の準備および T/P 製作

- ・ニューマ・ブラスター装置により、95Ni-5Al、-150/+270 メッシュの研磨材を用い処理 (WPC 処理) した T/P を溶射した。その結果、皮膜の密着強度はアルミナブラスト (ホワイトアルミナ #60 メッシュ) によるものと同等の値を示し、共に要求値の 10,000psi 以上を満足し、バンド試験でも合格であった。

<複雑形状に適合した溶射ロボットの動作研究・プログラムの開発>

⑥ ロボットプログラム開発の準備と現有機の調査・モデリング

- ・シミュレーション中であり、溶射皮膜の断面形状特性や、高性能カメラによる溶射距離、角度などの基礎データを取得して準備を進めた。

2. 平成21年度 「環境配慮に適応した溶射技術高度化の開発」

<溶射中ワークの温度分布調査>

① 基礎データの評価1

- ・溶射皮膜の SEM 観察、TEM 観察および EPMA 分析、電子線回折の結果から、W 相が結晶相、Co 相がアモルファス相として存在している可能性が確認できた。

<ワークの冷却効率向上と母材の耐疲労強度の安定化>

<膜厚均一／均質な皮膜形成の評価実験>

②-1 熱拡散効果確認試験用の T/P の製作・評価

- ・溶射皮膜と母材境界部近傍の母材は、加工変質層のため温度に対して敏感であることから、マイクロビッカース硬度計で読取り誤差を小さくできる限界位置として境界部から 30 μ m の母材を測定した。その結果、WPC 処理はブラスト処理に比べて低温域、高温域共に硬度低下が大幅に少ないことが判明した。これは、母材表面に付着した Ni の熱拡散効果によって母材の硬度低下を抑制したことが原因の1つと考えられる。

②-2 冷却方法を採用した取付治具による T/P 製作と TP の評価

- ・フィン治具は冷却効果が高く、特に回転フィン治具ではエアーナシでも大きな冷却効果が確認できた。
- ・銅電鍍治具は T/P が結露するほど冷却効果が高く、特に板物に対しては大きな冷却効果を発揮することが分かった。
- ・銅管巻付け治具は、構造的な問題から冷却効果が不十分であった。
- ・チラーは冷却水の設定温度 5 $^{\circ}$ C、水圧 0.2MPa で十分な冷却効果が得られた。
- ・各種冷却治具での溶射 T/P 確認試験では表面粗度を除き、すべて良好な皮膜特性を示した。
- ・WPC 処理 T/P は母材表面強化以外に Ni が母材表面に拡散することにより皮膜の密着強度の点でも有利であることが分かった。
- ・4130 材の丸棒（ ϕ 37.1 \times 280mm、試験部 ϕ 12.7mm）の疲労試験では、全ての T/P が数百サイクル（未溶射でも 8,950 サイクル）の桁違いに少ない回数で破断した。材料のもつ焼き入れ特性によるもので、中心までの硬化が不十分なことが原因であった。

- ・掴み部 M20、試験部 φ10mm の ASTM に準拠した材質 15-5PH 材の疲労 T/P を使って試験を行った結果、破断サイクル数は目標の 100,000 サイクル以上を達成した。
- ・上記について、皮膜研磨することにより破断サイクル数が 2 倍程度に伸びることが確認できた。
- ・上記結果から、300°C でも製品に適用できることが確認できた。
- ・WPC 処理はブラスト処理に比べ、190°C、4 時間ベーキング品の疲労強度低下が少なく、疲労強度安定化に有利であることが確認できた。
- ・疲労試験前後の破断部近傍側面は、WPC 処理の方がブラスト処理より硬度が高く、疲労試験後の表面強度低下が少ないことが確認できた。
(通常、高強度材料は疲労の影響で硬度が低下する)

< 金属パウダーの付着率及び跳ね返り率の向上・面粗度の向上 >

< 複雑形状品の皮膜面粗度の向上 >

③ 付着率及び跳ね返り率向上と溶射面粗度向上のための試験

- ・パウダー粒子温度を上げると、表面粗度が向上することが分かった。
- ・WOKA の最適ガス条件は、酸素 700FMR、プロピレン 700FMR であった。
- ・付着率は目標の 20% を達成したが、跳ね返り率は未達成であったため、新たに 35% 以下を目標値とした。
- ・放射拡散制御治具による溶射では、鋼製の穴板保持板が溶融したため、次年度に穴板保持板を改良し、再試験することになった。

< 複雑形状に適応した溶射ロボットの動作研究・プログラム開発と制御開発 >

④-1 T/P を用いた溶射皮膜付着状況確認試験

- ・平板に対して溶射速度 750mm/sec、3mm ピッチ、6 パスの条件で、1 サイクル、3 サイクル、5 サイクルの溶射を行った結果、表面が平滑になるのに 5 サイクル以上必要であることが確認できた。

④-2 ロボット現有機に対するプログラム開発・制御方法の開発

- ・複雑形状ワークに対応する 3D ワークデータ (IGES 形式) を MotoSim に取り込み、CSV ファイルとして目標点データとジョブ構成を入力してロボットプログラム (JBI) を自動生成するソフトウェアを開発した。
上記により作成したプログラムを使用して複雑形状ワークに溶射したところ、曲がり部が過熱状態となり溶射皮膜が剥離した。原因は、ガンが曲がり部を中心側とするよう円弧状に回転することと、曲がり部でガン姿勢が変わることにより溶射面上におけるフレームの移動速度が低下し、溶射時間が増大して過熱状態となったこと

が考えられる。

<溶射面温度モニタリングの精度向上と母材への影響評価>

⑤ 接触温度計、放射温度計による溶射中ワークの温度測定技術の改善

- ・放射率を 0.59 に設定することにより、80℃～340℃までの範囲で目標の温度誤差 ±10℃以下に対して、±5℃以下を達成した。

3. 平成22年度 「環境配慮に適応した溶射技術高度化の開発」

<金属パウダーの付着率及び跳ね返り率の向上・面粗度の向上>

①-1 パウダー付着率向上及び跳ね返り率低減のための試験と評価

- ・冷却を十分にきかせると退避時間が減少し、付着率上昇により、フジミパウダー、WOKA共に目標値の20%を超えることが確認できた。
- ・フジミパウダーは表面粗度、緻密性、疲労強度等、さまざまな点で優れた特性をもっているが、付着率がWOKAより低いことが確認できた。これは、パウダーの特性によるものと考えられる。
- ・丸モノは平板に比べ冷却効率が悪いいため、付着率も低い、今後 T/P の標準化、目標値の設定だけでなく、冷却方法の検討が必要である。
- ・跳ね返り率については、付着率と相反する性質があるため、付着率のみの評価で十分であることが分かった。
- ・フジミパウダーの溶射距離は230mmが最適とは限らないため、溶射距離230mmを挟んで上下2ポイント（Min190mm、Max270mm）を追加して試験を行ったが、最適な溶射距離は確認できなかった。皮膜硬度は要求値を満たしていたが、溶射距離250mm以上で低下する傾向が現れた。

①-2 溶射面面粗度向上のための試験と評価

- ・フジミパウダー粒子の温度と速度は、酸素700FMR、プロピレン800FMRの条件が最良であり、表面粗度に対しては粒子速度より粒子温度の影響が大きいことが確認できた。
- ・SEM観察の結果、最適ガス条件で溶射した場合の皮膜特性はWOKAよりフジミパウダーの方が緻密で勝っていた。
- ・放射拡散制御治具では、前年度に溶融した鋼製の穴板保持板を、高融点材料で製作し直し試験を行った。制御なし（穴板なし）、穴径φ25mm、穴径20mmまでの試験の結果、放射拡散制御による表面粗度の向上は確認できず、主にパウダー粒子サイズの要因が大きいことから、放射拡散制御治具は不要であることが確認できた。
- ・掴み部M20、試験部φ10mmのASTMに準拠した材質15-5PH材の疲労T/Pに

フジミパウダーで 300℃で溶射し、試験を行った。その結果、溶射時の回転方向は縦回転、横回転ともに疲労強度に差異は認められなかった。

- ・上記について、SN 曲線を比較すると、フジミパウダーは WOKA よりも疲労強度が高いことが確認できた。
- ・フジミパウダー溶射 T/P は、マイクロ組織、皮膜硬度などすべて要求値を満たしていた。
- ・フジミパウダーと WOKA の溶射 T/P について、母材（15-5PH）腐食への影響を見るため、耐食試験として中性塩水噴霧試験を 96 時間行ったが、母材の腐食は認められなかった。
- ・疲労試験 T/P の断面 SEM 観察では、フジミパウダーは WOKA に比べ皮膜が層状構造のため、き裂の分岐が多く存在し、母材に達しにくい特性があると考えられる。

<複雑形状に適応した溶射ロボットの動作研究・プログラム開発と制御開発>

② ロボット現有機に対するプログラム開発・制御方法の開発

MotosSimVRC 内に取り込んだ CAD データ（CATIA 形式）から稜線を検出して溶射パスを作成し、補完種別、位置、姿勢、速度などの属性情報を編集して溶射ジョブを自動生成するソフトウェアを開発した。オフラインソフトも前年度の MotosSimEG からさらに上位機能を持つ MotosSimVRC に代わり、実機のペンダントが持つ多くの機能が使用できるようになった。

その結果、下記のような合理化が可能となった。

- ・ティーチング時間が短縮できる。
 - ・複雑形状ワークに対して、正確なプログラムができる。
 - ・生産を止めることなく机上でプログラム作成・修正ができる。
 - ・生産を止めることなく机上でプログラムの干渉チェック、軌跡確認ができる。
 - ・製品、治具がなくてもプログラム作成ができる。
- 納期が短縮でき、品質向上、コスト削減の点で有利である。

<膜厚均一／均質な皮膜形成の評価実験>

③ 複雑形状ワークによる皮膜の評価

- ・溶射面に対してガンの角度が均等になるように溶射すると、皮膜が長手方向、奥行き方向共に均一になることが確認できた。
- ・アプローチを 100mm から 150mm に増やしたことにより、ワーク端部の膜厚が均一化した。
- ・フジミパウダーにより溶射面に対してガンの角度が均等になるように溶射したワークでは、膜厚、硬度、マイクロ組織の結果が目標値、要求値を満たしていた。

- ・マスク治具を用いた溶射では、治具がワークと固着した。今後、溶射方法、治具について検討が必要である。

<複雑形状品の皮膜面粗度の向上>

④ 複雑形状ワークによる皮膜面粗度の評価

- ・WOKA は表面粗度が目標値 $4\mu\text{m}$ を上回ったが、フジミパウダーは目標値 $4\mu\text{m}$ 以下を達成した。
- ・今回の試行データの範囲内では、溶射方法の違いによる表面粗度への影響は小さいことが確認できた。

<溶射管理技術の開発>

⑤ 安定した品質作込みのための溶射管理技術の開発

- ・これまでに得られた要素技術研究開発の成果を集大成し、実機レベルの溶射に適応した HVOF 溶射のプロセス仕様書を作成した。

<事業化計画>

航空機部品については、ROHS 規制等の動きから、脱クロムの流れとして環境負荷の少ない溶射技術が高い注目を集めている。

こうした状況下、現状の B737、GX、ERJ をはじめ、B787、MRJ など次世代航空機においては溶射による適用部品が今後増加し、JAL、ANA 等の修理品も含めると、今後溶射技術の重要性はますます高まる見込みである。

本研究開発で得られた溶射技術の成果は、川下事業者の支援を仰ぎつつ世界の航空機メーカーへの販路拡大、溶射技術の高度化を推し進めながら、本特殊工程の適用部品の拡大を図っていくことが必要である。

本研究開発の成果によってコストダウンが図られた製品を、アドバイザーでもある主要取引先の三菱重工業（株）、川崎重工業（株）及び（株）島津製作所に提供するとともに、各メーカーの協力会社等に広く情報提供することにより、協力会社等における溶射技術の高度化及び経済性の向上を通じて、各メーカーの国際競争力が強化され、国際市場におけるシェア拡大を図ることが可能である。

旭金属工業（株）は、日本で初めて Nadcap（Coating）を取得した企業であり、こうした地位も活用しながら海外メーカーに直接受注活動を行い、機械加工からの一貫受注をめざす。

さらに、他産業への展開については（社）中部航空宇宙技術センターのネットワークを活用しながら溶射学会における発表等を通じて研究開発によって得られた経済性を広く情報発信し、取引先の拡大を行う。なお、本研究の成果は、航空機以外の一般民生品の溶射にも応用することができるため、この分野の販路拡大にも努めていく。

【付録】 専門用語の解説

・ FMR (Flow Meter Reading)

流量単位の SCFH (Nft³/h) で表した場合に各ガスの値は以下のようになる。

酸素： FMR×0.9443

プロピレン： FMR×0.1886

窒素： FMR×0.9691

空気： FMR×17.8587

SCFH×0.02832 で m³/h (at15°C、101kPa) となる。

・ ストライエーション (striation)

疲労破面が伝播する過程で破面上に形成される縞模様で、繰返応力のサイクルに対応している。

・ ディンプル (dimple)

延性破壊に特徴的な破面で、過大な応力が加えられて破壊する過程で形成されることが多い。

これは、塑性変形に伴い材料中の介在物や析出物の微粒子が核となって多数の微小空洞が形成され成長・合体して破壊にいたるためにできるとされている。

・ Nadcap (National Aerospace and Defence Contractors Accreditation Program)

米国の航空機メーカー及びエンジンメーカーのプライム各社がメンバーとなって PRI (Performance Review Institute) という非営利目的の機関を設立し、1990 年から運用を開始した品質保証及び特殊工程の監査・認証プログラムのことである。当初は米国航空機製造業者を対象に認証活動を行ってきたが、2000 年よりヨーロッパ、2004 年にアジアと展開が進み、旭金属工業は 2004 年の「非破壊検査」を初めとし、認証の対象工程を取得している。