

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「航空機部材の耐摩耗性・耐食性を向上するHVOF
溶射を用いた高効率なWC皮膜処理技術の確立」

成果報告書概要版

平成23年9月

委託者 中部経済産業局

委託先 財団法人岐阜県産業経済振興センター

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 -----	3
1-2 研究体制 -----	4
(研究組織及び管理体制)	
1-3 当該研究開発の連絡窓口 -----	5
第2章 本論 -----	6
2-1 チルトパレット構造の設計・製作 -----	6
2-2 チルトパレット制御システムの開発 -----	7
2-3 パレットチェンジシステムの稼働率等の評価 -----	7
2-4 治具形状と溶射方法の検討 -----	8
2-5 溶射実証実験によるマスク治具の確立 -----	11
2-6 マスク治具の設計基準作成 -----	12
最終章 全体総括 -----	13

第1章 研究開発の概要

HVOF 溶射は耐摩耗性が要求される部位を対象に、ロボット操作の溶射ガンを通して、固定したワーク外表面に皮膜形成させていたが、本研究開発ではワークそのものの位置・角度を変えて高効率・高精度な溶射を行う溶射技術の確立に取り組んだ。

パレット（治具固定用テーブル）チェンジ構造を導入し、溶射位置再現性及び溶射工程に関する位置決め精度の向上を図るとともに、溶射装置稼働率の向上を達成する。また、応力集中による皮膜はく離防止の観点から、溶射適用部品の多くには、寸法精度を満足するようなランアウト（溶射皮膜終端の膜厚傾斜部）の要求が一般化してきているが、ランアウト形成に関しては、これまで手作業による研磨作業を行っており、低コスト化を維持しながら均一な皮膜成形を確保するため、溶射のみにより寸法精度を実現するランアウト形成技術を確立した。

具体的には、以下のテーマについて研究開発を進めた。

1 溶射工程の対応について

（実施機関：国立大学法人九州工業大学、旭金属工業株式会社）

将来的なパレットとロボットの同時制御システムの開発に向けて、本研究開発では、下記に示すようにパレットチェンジの再現性精度向上（現状：±10 mm→±5/100 mm）を図るため、パレットの制御システムの開発により溶射と外段取りの同時処理と部品セット時の再現性精度の向上、品質の安定、稼働時の効率化などに適応した生産ラインの確立に向けた研究開発を実施した。

- (1) チルトパレット構造の設計・製作
- (2) チルトパレット制御システムの開発
- (3) 小型試験片の実験による位置決め及び繰り返し精度、膜厚均一性の評価
（ $100 \pm 25 \mu\text{m}$ ）

2 ランアウト形成技術への対応について

（実施機関：旭金属工業株式会社）

溶射マスクの設計技術を上げることで溶射皮膜の均一性と終端膜厚傾斜部の寸法精度向上が可能になることから、その最適条件を含めランアウト形成を製品端末より Max2 mm、ランアウト距離 $1.5 \pm 0.5\text{mm}$ にするための開発を行い、下記項目に取

り組んだ。

- (1) 治具形状と溶射方法の検討
- (2) 溶射実証実験によるマスク治具の確立
- (3) マスク治具の設計基準作成

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

複雑で高強度、高機能性を要求される航空機部品では、現状においてクロムメッキ加工が多用されているものの、ボーイング社のB787機や三菱重工業社のMRJ機では、世界的な有害物規制により代替技術であるHVOF溶射が適用され、その技術確立が急務となっている。

そこで、本研究開発では、川下製造業者のニーズであるHVOF溶射における寸法精度と生産性の向上による低価格化推進のため、溶射皮膜端部の形成技術構築、マスク形状による溶射皮膜形成への影響把握、量産時に対応できる外段取り方法の導入、パレットの構造及び駆動系の検討などの研究開発を実施し、高品質かつ高効率な溶射技術を安定的に継続できる溶射システムを確立することを目的とする。

以下に目標を示す。

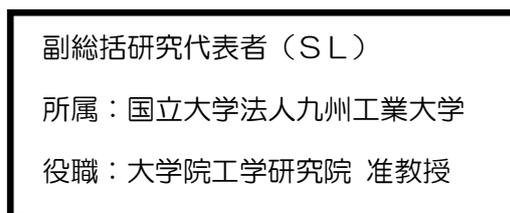
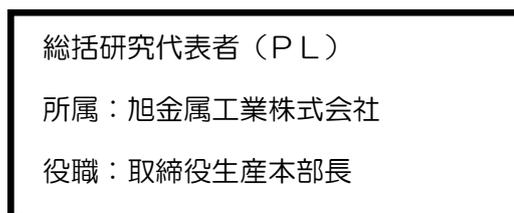
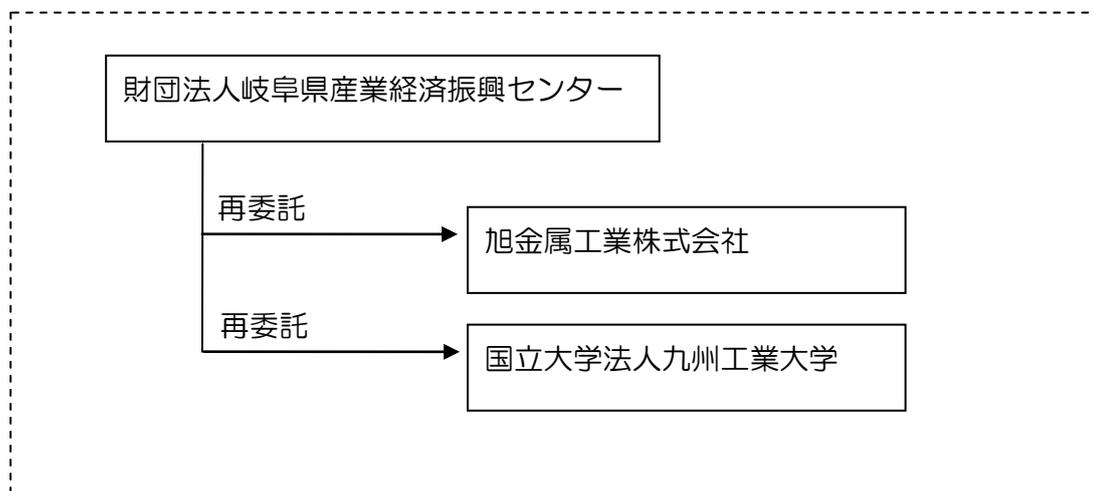
研究開発に係わる目標値

区分	現状	目標値
ランアウト形成溶射 (膜厚：100±25μm)	製品端末より MAX3 mm±2 mm ランアウト距離：90±70μm	製品端末 Max2 mm ランアウト距離：1.5±0.5mm
繰返しセット位置精度	±10 mm	±5/100 mm
溶射装置稼働率	25%以下/日	50%以上/日

1-2 研究体制

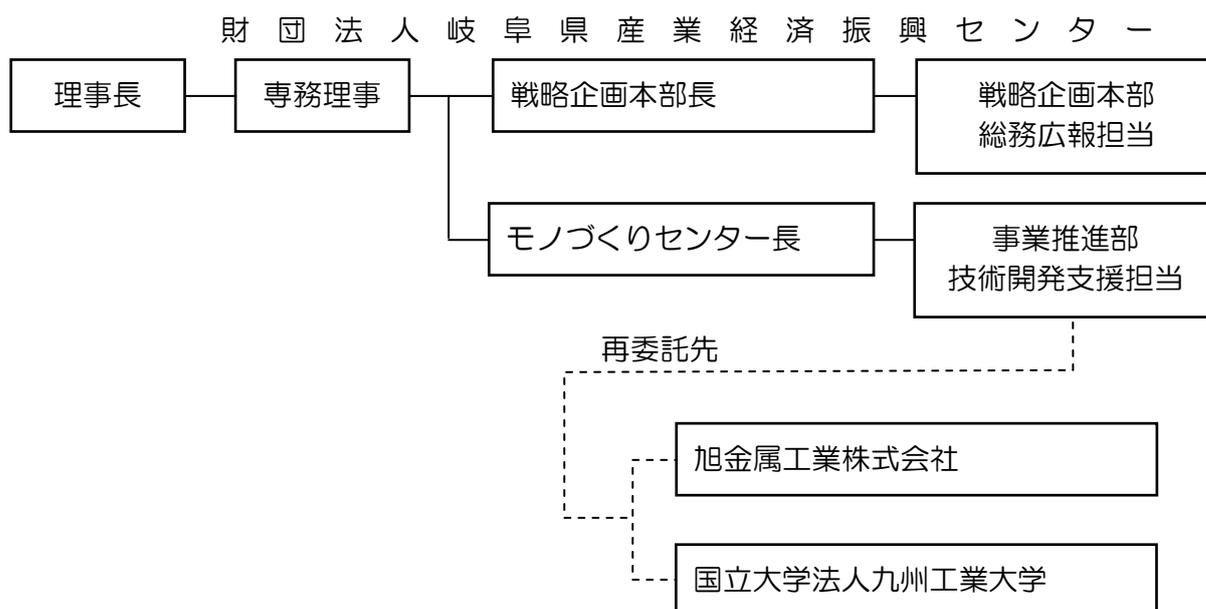
(1) 研究組織及び管理体制

1) 研究組織（全体）



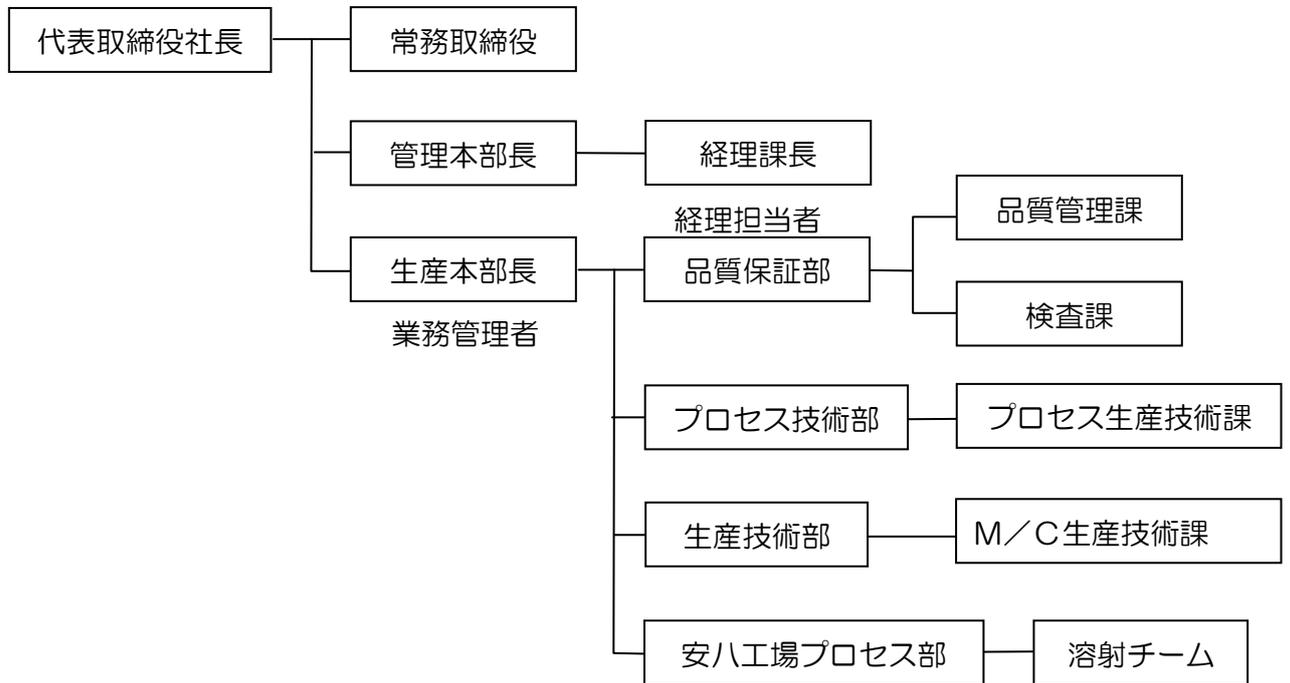
2) 管理体制

① 事業管理者

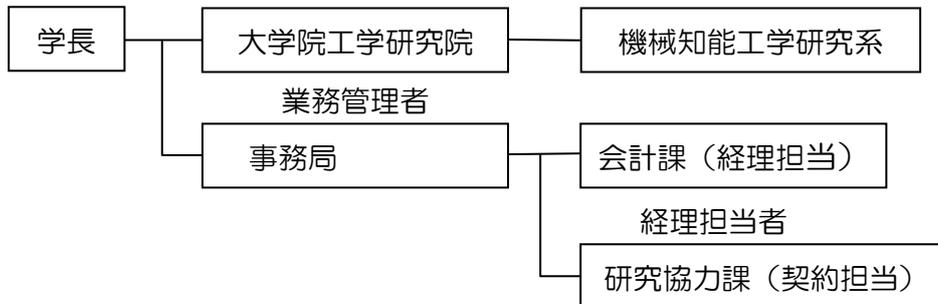


② 再委託先

旭金属工業株式会社



国立大学法人九州工業大学



1-3 当該研究開発の連絡窓口

財団法人岐阜県産業経済振興センター（岐阜県岐阜市藪田南5丁目14番53号）

モノづくりセンター 事業推進部

管理員 竹腰久仁雄

電話 058-277-1093

FAX 058-273-5961

E-mail gifu-sapoin@gpc-gifu.or.jp

第2章 本論

2-1 チルトパレット構造の設計・製作

チルトパレット構造は、図1に示すように制御装置、姿勢変換装置、パレット交換装置、パレット搬入搬出装置から成るシステム構成とした。

パレット交換装置とパレット搬入搬出装置は手動とし、姿勢変換装置は制御装置による駆動とした。パレットを姿勢変換装置にセットし、もう1台のパレットと交換した場合の位置決め再現精度は、X方向、Y方向ともに $\pm 0.02 \sim 0.03 \text{mm}$ 前後の値を示し、要求仕様の 0.05mm 以下を満足していた。

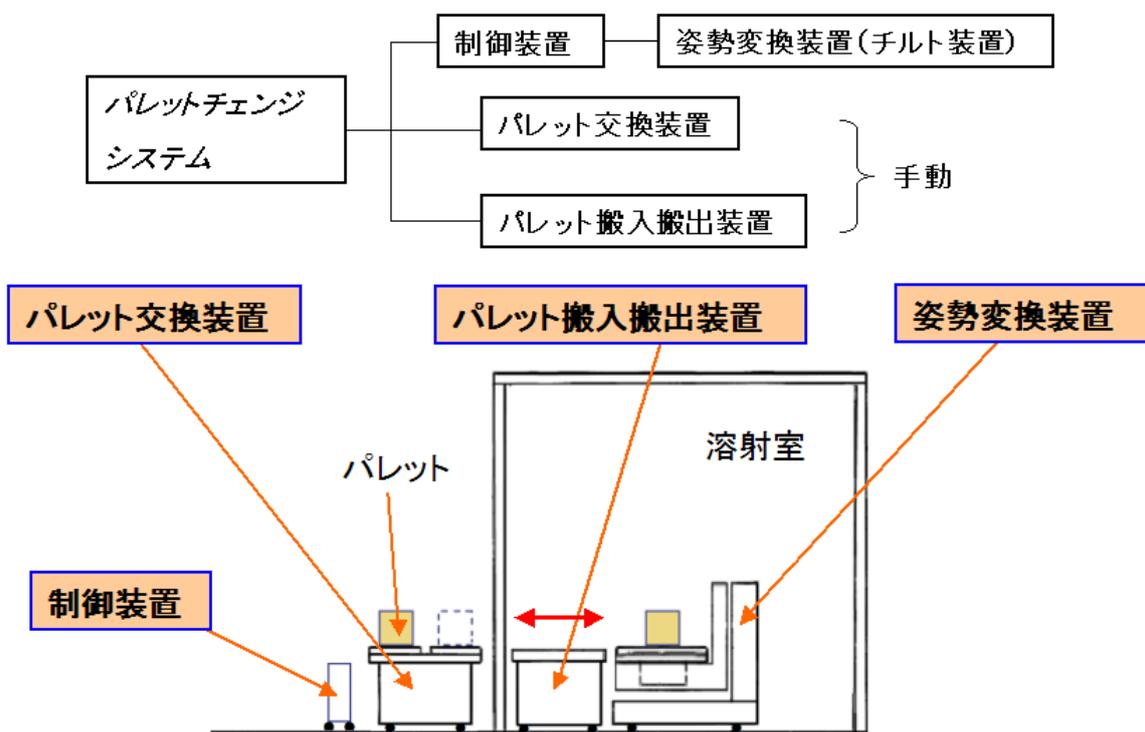


図1 パレットチェンジシステムの構成

2-2 チルトパレット制御システムの開発

小型の確認試験用模擬部品を用いて、溶射ガンは角度を変えず一定方向とし、下表に示す溶射条件で垂直軸 45° 50° 回転（溶射角度 45°、50°）の 2 通りの試験を行った。

その結果、パレットを交換した後の治具の位置決め繰り返し精度は 0.05mm 以上を示し、治具の固定方法を改善する必要があることが分かった。

溶射皮膜は、皮膜形状、膜厚均一性（ $100 \pm 25 \mu\text{m}$ ）ともに良好であった。

溶射の条件（以下の試験共通）

使用パウダー	(株)フジミインコーポレーテッド製 DTS-W675-30/10
溶射膜厚	100±25 μm 目標
温度設定	放射温度計により 150℃以上で退避
エアー冷却	T/P、模擬部品側とガン側（φ6の配管2本）からのエアー
溶射距離	230mm
ガン速度	750m/sec

2-3 パレットチェンジシステムの稼働率等の評価

確認試験用模擬部品を用い、現状設備とパレット装置による溶射実験を行い、稼働率の比較を行った。稼働率は下記の式で表される。

$$\text{稼働率} = \text{溶射時間} / \text{作業時間} \times 100$$

作業時間は溶射開始から次の溶射開始までの時間として求めた。稼働率の平均値は、現状設備では 22.6%、パレット装置では 35.9%となり、目標の 50%には満たなかったが、1.6 倍に改善された。

当初計画段階では、扉、パレット搬入搬出装置、パレット交換装置が油圧装置、モーターで駆動する予定であったが、すべて手動に変更となり、それに伴って扉全開でパレットを出し入れするため、付随する作業が増え、操作時間の増加から計画時（目標 50%）より稼働率は低下している。

稼働率は 1.6 倍に改善されたが、小さな模擬部品を対象としているため、溶射時間が短く、外段取の効果が十分に発揮されなかったことが、上記事情と合わせ目標に達しなかった原因と考えられる。

今後は自動化も含め稼働率向上に取り組む。

2-4 治具形状と溶射方法の検討

2-4-1 現状設備での試験

マスク治具によるセット状況断面と確認試験用の模擬部品（SS 材の溶接構造）を図2に示す。

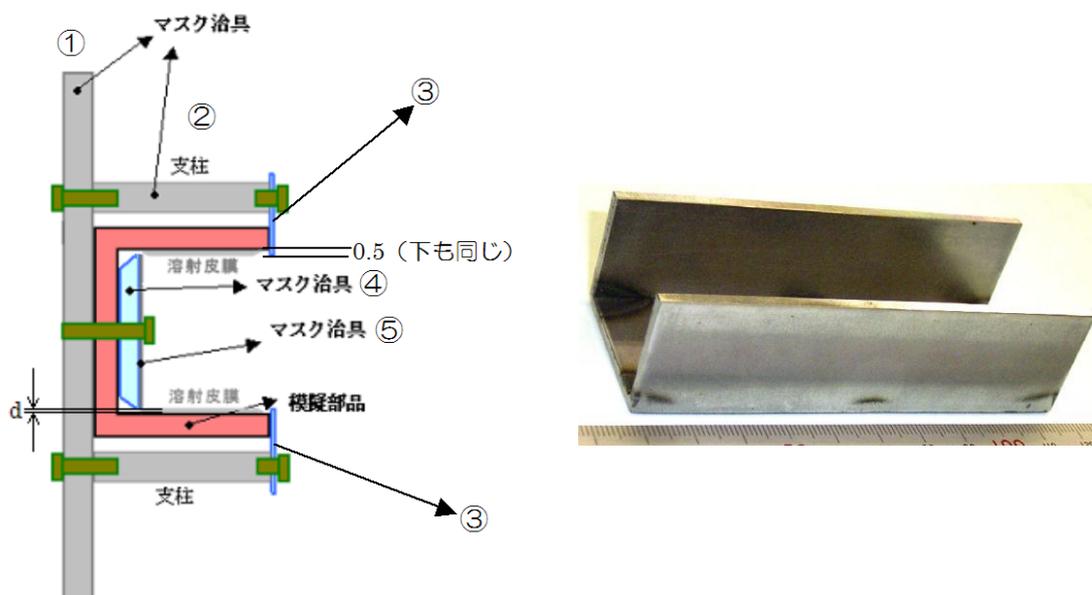


図2 模擬部品、マスク治具組付け時の断面状況と確認試験用模擬部品の外観

パレット装置導入前の現状設備で、ガンを溶射角度 45° となるよう傾け、マスク治具の角度 30° 、 45° 、 60° の3通りについて溶射試験を行った。

その結果、治具角度 45° 、 60° は溶射皮膜により模擬部品と治具が固着し、 30° のみ外観上良好な溶射皮膜が形成された。そこで、治具角度 30° での溶射品を対象として、断面形状測定器によるランアウトの計測を行った。

膜厚はすべて $100 \pm 25 \mu\text{m}$ を満足していたが、ランアウトが要求値の $1.5 \pm 0.5\text{mm}$ に対して不足していた。

なお、模擬部品の反対位置の模擬部品外側端部については、治具形状の問題から全般に皮膜終端部と部品端部が接近していて、ランアウトが形成されていない箇所が多く見られたため、今後の課題とした。

ランアウトが短く、要求値に満たなかった原因は、次の2-4-2の結果も考慮に入れて推定すると、溶射フレーム範囲が奥側になるほど治具にカットされる溶射端末付近と、そうでない箇所の溶射皮膜はともに厚みを増すことになり、結果として膜厚傾斜部が急勾配になったものと考えられる。

2-4-2 パレット装置による試験

先の結果では、ランアウトが不足していたため、これを踏まえ、下記条件による 4 通りのフレーム位置（ア～エ）でパレット装置による溶射を行った。

- ・溶射ガンの角度： 変えない
- ・パレット垂直軸： 45° 回転（溶射角度 45°）
- ・マスク治具角度： 30°
- ・部品-治具間の隙間 d： 0.1mm、0.2mm
- ・溶射フレームの範囲： 図3のア～エ

（前項の条件アから 1mm、2mm、3mm の位置）

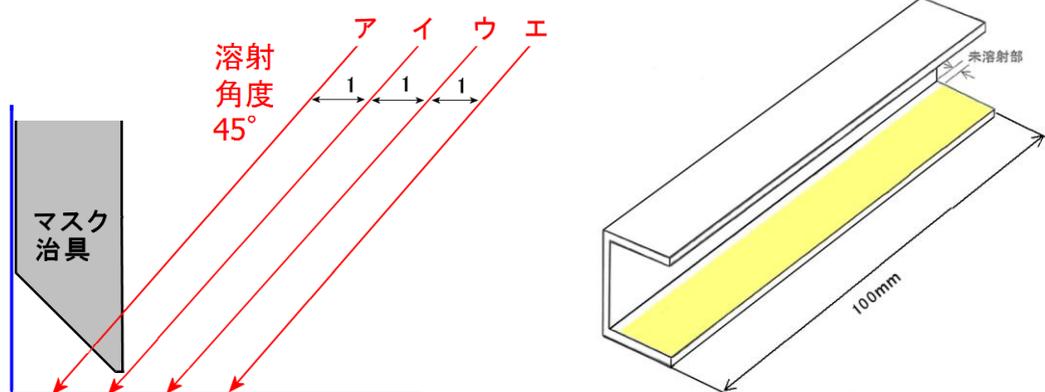


図3 断面から見た溶射状況とフレーム位置、確認試験用模擬部品形状

d=0.1mm では、フレームを治具から離すことでランアウトが長くなる傾向が見られたが、d=0.2mm では、中間（イ、ウ）でランアウトが減少するような傾向が見られた。

試験結果の中で、フレーム位置がイ（1mm 離す）、隙間 d=0.1mm の条件が良好であった。この条件の模擬部品を切断し、皮膜断面の硬度、ポロシティー（空隙、巣）、酸化物、未溶融粒子を調べた。

その結果、緻密な皮膜組織を示しており、いずれも硬度（HV）1000 以上、ポロシティー、酸化物、未溶融粒子がすべて 1%以下の要求値を満足していた。

d=0.1mm の隙間量で治具奥側溶射範囲がアからエと離れるに従ってランアウトが徐々に増加する（膜厚傾斜部が緩やかになる）傾向を示しており、フレーム流が安定した隙間量にあたり、イの条件がランアウトにとって良好な距離条件であったことが原因と思われる。

一方、隙間が 0.2mm では、フレイム流が治具隙間を通過しやすいため、アの段階で溶射パウダーは奥まで運ばれてランアウトが長くなり、治具奥側溶射範囲が離れるに従って隙間 d の影響が複雑に変化し、エの段階では d の影響が小さくなって、さらに離れると d による差がなくなる方向に変化するものと考えられる。

2-4-3 マスク治具使い捨て方式の検討

ランアウトの条件を満足するためには、マスク治具に付着した皮膜を頻りに剥離除去する必要がある。しかし、時間と費用の面で不経済であるため、治具本体または治具への貼り付け材の使い捨て方式を検討した。そこで、マスク治具全体と一部をそれぞれ耐熱樹脂で製作した。また、上記の他に耐熱テープも加え、下記 2 通りの試験を実施した。

(1) 鋼製の平板試験片に耐熱品を貼り付けた予備試験

(2) 模擬部品に耐熱樹脂製マスク治具や溶射用耐熱テープを貼ったマスク治具を使用した試験

その結果、(1) では耐熱テープ、耐熱離型剤には十分な効果は認められなかった。

溶射用マスクテープは用途を限定すれば使用できる可能性があるが、剥離しやすい欠点があるため、貼付け時に構造的な剥離防止策を講じる必要があることが分かった。また、ガン側からのエア冷却がないと、劣化が進行するため、当製品の使用方法については、こうした点を考慮する必要がある。

(2) では、すべての耐熱材に十分なマスク治具としての効果は認められなかった。

以上の結果から、次のステップとしては、より確実で安価な SPCC などの薄板を使用し、はめ込み式などの機械的な固定方法を検討する。

2-5 溶射実証実験によるマスク治具の確立

実証試験用模擬部品は、実際の飛行機部品を模擬するため、15-5PH 材の熱処理加工により製作したものを使用し、確認試験用模擬部品の試験結果を参考にして下記条件でパレット装置による溶射を行った。

- ・溶射ガンの角度： 変えない
- ・パレット垂直軸： 45° 回転（溶射角度 45° ）
- ・マスク治具角度： 30°
- ・部品-治具間の隙間 d： 0.1mm
- ・溶射フレームの範囲： 図4のオ、イ、カ（赤丸）

（確認試験用模擬部品での最良条件イを基準にして前後 0.5mm ずつ移動）

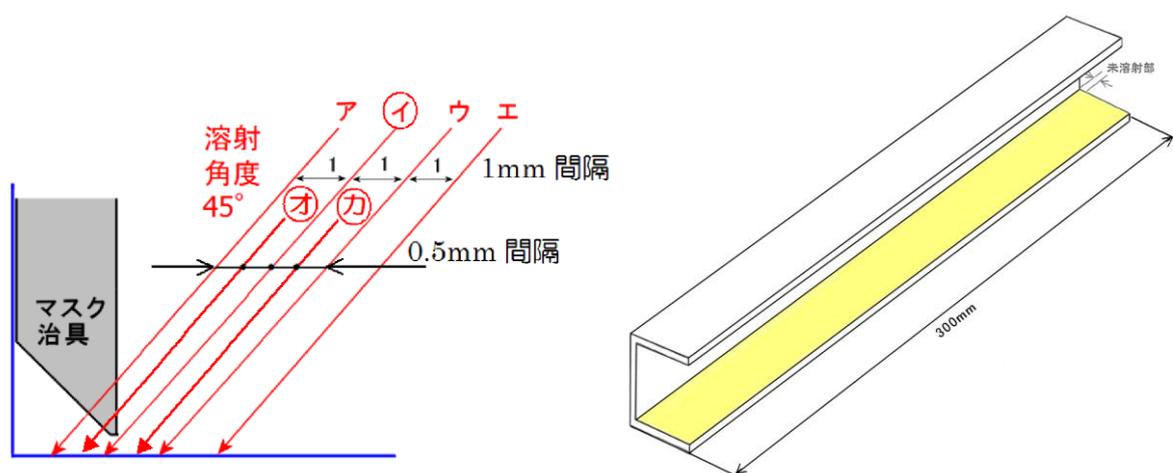


図4 溶射フレーム位置と実証試験用模擬部品形状

位置イ、カは全箇所ランアウトと、一部の膜厚で要求値から外れたが、位置オは、大半の調査箇所満足していた。

なお、模擬部品の反対位置の模擬部品外側端部については、確認試験用模擬部品と同様の原因でランアウトの形成が困難であったため、今後の課題とした。

以上の中で良好な結果を示した条件の代表 1 点（オ）を選び、皮膜断面の硬度、ポロシティー、酸化物、未溶融粒子を調べた結果、緻密な皮膜組織を示しており、いずれも硬度（HV）1000 以上、ポロシティー、酸化物、未溶融粒子がすべて 1%以下の要求値を満足していた。

今回の試験の結果、溶射角度 45°、治具先端角度 30°、隙間 d=0.1mm、溶射フレー

△範囲の治具側位置（図4オの条件）で、比較的よい結果が得られた。

ランアウト形成に影響する要因として、次の点があげられる。

- (1)治具先端の形状
- (2)治具先端の角度
- (3)治具先端ストレート部の長さ
- (4)治具先端斜面の長さ
- (5)部品と治具の隙間 d
- (6)溶射フレームの角度（製品形状により制約がある）
- (7)溶射フレーム範囲の治具側位置

今回の試験で十分なランアウト形成条件は確認できなかったため、今後、上記の点を考慮に入れ、追加の条件を設定して試験を行い、ランアウト形成技術を確立する必要がある。

2-6 マスク治具の設計基準作成

実証試験用模擬部品の試験では前述のように良好な結果が得られたが、全測定箇所でもランアウト、膜厚が要求値を満たしてはいなかった。

これまでの知見およびテストピースを用いたランアウト形成試験の結果から、設計基準に反映させる内容として明らかなことは、以下の5点である。

- ① マスク治具に溝をつける。（下記③では、他の形状も可能性がある）
- ② マスク治具に 1mm 以上のストレート部をつける。
- ③ 他のマスク治具形状でも、模擬部品-マスク治具の隙間 d と、部品奥側の溶射範囲の関係を適切に設定すれば、ランアウトと膜厚の要求値を満足する条件が得られる。
- ④ 溶射角度より治具角度を小さくする。
- ⑤ ランアウト寸法を満足するための条件は、治具だけの問題ではなく、溶射フレームの奥側位置も重要である。

溶射角度は製品形状によって決まるため、多種類の製品に対応するためには 45° ~ 90° の範囲で数段階の溶射角度別に設計基準を作成する必要がある。

今回は 45° 固定で検討したが、さらに追加の試験が必要であり、今後、治具側条件、溶射フレーム側条件を設定し、設計基準作成のため、データを取得する。

最終章 全体総括

① 溶射工程の対応について

①-1 チルトパレット構造の設計・製作

- ・ チルトパレット構造は、制御装置、姿勢変換装置、パレット交換装置、パレット搬入搬出装置から成るシステム構成とし、パレット交換装置とパレット搬入搬出装置は手動、姿勢変換装置は制御装置による駆動とした。
- ・ パレット装置の位置決め再現精度は、X方向、Y方向ともに $\pm 0.02\sim 0.03\text{mm}$ 前後を示し、要求仕様の 0.05mm 以下を満足していた。
- ・ 冷却配管はワンタッチで接続できるようにした。

①-2 チルトパレット制御システムの開発

- ・ パレットへに小型の確認試験用模擬部品を取付け、溶射ガンは角度を変えず一定方向とし、垂直軸 45° 50° 回転（溶射角度 45° 、 50° ）の2通りの試験を行った。
- ・ 姿勢変換装置は2軸制御でき、その内容をプログラムとして多数保存できるようにした。
- ・ パレット交換後の治具の位置決め繰り返し精度は 0.05mm 以上を示していたが、治具の固定方法を改善する必要がある。
- ・ 溶射皮膜の形状、 $100\pm 25\mu\text{m}$ の膜厚均一性は良好であった。

①-3 パレットチェンジシステムの稼働率等の評価

- ・ 確認試験用模擬部品を用い、現状設備とパレット装置による溶射実験を行った。稼働率の平均値は、現状設備では 22.6% 、パレット装置では 35.9% となり、目標の 50% には満たなかったが、 1.6 倍に改善された。
- ・ 小さな模擬部品を対象としているため、溶射時間が短く、外段取の効果が十分に発揮されなかったことが目標に達しなかった原因の一つと考えられる。

② ランアウト形成技術への対応について

②-1 治具形状と溶射方法の検討

- ・ パレット装置導入前の現状設備で、ガンを溶射角度 45° となるよう傾け、マスク治具の角度 30° 、 45° 、 60° の3通りについて溶射試験を行った。その結果、治具角度 30° ではランアウトが形成されていたが、 45° 、 60° では模擬部品とマスク治具が固着した。

- ・ランアウトが形成されていた治具角度 30° の模擬部品について形状測定を行ったところ、膜厚は $100 \pm 25 \mu\text{m}$ を満たしていたが、ランアウトが $0.440 \sim 0.660\text{mm}$ と要求値の半分程度であった。
- ・模擬部品外側は、マスク治具との隙間が一定とならず、ランアウトが形成されないため、今後の課題とした。
- ・上記現状設備での結果を参考に、治具角度 30° 、フレームの治具奥側の溶射範囲を 1mm 、 2mm 、 3mm と段階的に外側に離して、パレットによる溶射を行った。その結果、 $d=0.1\text{mm}$ 、元の溶射範囲より 1mm 離れた条件でランアウト、膜厚ともにほぼ満足できる値を示した。(最良の結果)
- ・フレーム位置を治具から離すことで皮膜の入込みとランアウトが増加する傾向が確認できた。
- ・耐熱品によるマスク治具の使い捨て方式の検討では、溶射用耐熱マスクテープが使用方法を工夫・限定すれば可能性があるが、その他の耐熱品は効果が認められなかった。
- ・治具使い捨てのための次のステップとしては、より確実で安価な SPCC などの薄板を使用し、はめ込み式などの機械的な固定方法を検討する。

②-2 溶射実証実験によるマスク治具の確立

- ・前項の最良結果（奥側のフレーム範囲を 1mm 離す）を基準に前後に 0.5mm ずつ移動させた 3 通りの方法（オ 0.5mm 、イ 1mm 、カ 1.5mm 離す）で溶射を行った結果、オの条件が最良の結果を示した。
- ・この条件での溶射皮膜は硬度、ミクロ組織ともに要求値を満足していた。
- ・ランアウト形成に影響する要因として、次の点があげられる。
 - (1) 治具先端の形状
 - (2) 治具先端の角度 α
 - (3) 治具先端ストレート部の長さ $L1$
 - (4) 治具先端斜面の長さ $L2$
 - (5) 部品と治具の隙間 d
 - (6) 溶射フレームの角度（製品形状により制約がある）
 - (7) 溶射フレーム範囲の治具側位置
- ・今後上記の点を考慮に入れ、追加の条件を設定して試験を行い、ランアウト形

成技術を確立する必要がある。

②-3 マスク治具の設計基準作成

- ・ これまでの知見および T/P を用いたランアウト形成試験の結果から、設計基準に反映させる内容として明らかなことは、以下の5点である。

- ①スク治具に溝をつける。(下記③では、他の形状も可能性がある)
- ②マスク治具に 1mm 以上のストレート部をつける。
- ③他のマスク治具形状でも、模擬部品-マスク治具のすき間 d と、部品奥側の溶射範囲の関係を適切に設定すれば、ランアウトと膜厚の要求値を満足する条件が得られる。
- ④溶射角度より治具角度 α を小さくする。
- ⑤ランアウト寸法を満足するための条件は、治具だけの問題ではなく、溶射フレームの奥側位置も重要である。

追加の試験が必要であり、今後、角度別に設計基準を作成する必要がある。

<今後の課題>

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、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。

本研究では、「段取り」→「溶射」の繰り返し作業工程を従来型の設備に代わり、パレットチェンジシステム導入による外段取り方式を取り入れた研究を行い、次いでランアウト形成技術への取り組みを行った。

これらについて、一定の成果が得られたが、これまでに開発した技術をさらに改良し実用性を付加するためには解決すべき課題も多い。

今回の研究対象であるパレットチェンジシステムはロボットと同期していないため、前回のサポイン研究で得られたロボット現有機に対するソフト開発・制御開発の成果を結びつけ、パレットとロボットを同期させる新たな取り組みが今後必要となってきた。

本研究を通じて明らかとなった課題にも取り組み、補完研究を実施して技術力を蓄積し、事業化、販路拡大に努めていく。