

平成26年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「粉末成形による金型製造とリサイクルに関する手法  
と材料の開発」

研究開発成果等報告書

平成27年3月

委託者 近畿経済産業局

委託先 一般財団法人近畿高エネルギー加工技術研究所

# 目 次

|                      |    |
|----------------------|----|
| 第1章 研究開発の概要          | 1  |
| 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標 | 1  |
| 1-2 研究開発体制           | 4  |
| 1-3 成果概要             | 5  |
| 1-4 当該研究開発の連絡窓口      | 6  |
| 第2章 研究開発成果の内容        | 7  |
| 2-1 最適材料の開発          | 7  |
| 2-1-1 高硬度自溶合金の開発     |    |
| 2-1-2 開発自溶合金の皮膜硬さの評価 |    |
| 2-2 金型の皮膜制御技術の開発     | 8  |
| 2-2-1 皮膜作製装置の開発      |    |
| 2-2-2 皮膜制御技術の開発      |    |
| 2-2-3 リユース技術の開発      |    |
| 2-2-4 金型の耐久性評価       |    |
| 第3章 全体総括             | 16 |

## 第1章 研究開発の概要

### 1-1. 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### (1) 研究開発の背景・研究目的

粉末成形エレクトロニクス部品製造の磁性粉末などを金型で圧縮成形する工程においては、金型の摩耗、粉末の焼き付きなどが発生するために、種々の耐摩耗被覆や金型を超合金製とするなどの対応が図られているが、前者では金型の長寿命化、後者では素材の安定供給とコストに大きな課題がある。そのため、金型の部品であるパンチやダイをプラズマ溶射とレーザー照射等を併用する高機能溶射法を用いて、革新的な金型成形技術を開発し、しかもリユース可能な技術とすることで、製品のコスト削減と長寿命化を実現する。

#### (2) 研究の概要及び目標

自動車、電機機器産業に用いられている電子部品は高機能、微細化が進んでおり、これらの製造に用いられる金型の高度化が求められている。しかも粉末成形用超硬金型の主元素であるタングステンはほとんど輸入に依存している。本研究開発は、レーザーを複合した高機能プラズマ溶射法と高硬度化の材料設計を行った革新的な金型成形技術を開発することにより、顧客企業のグローバル戦略及び我国の資源枯渇問題にも寄与するために実施する。

各研究概要と目標を以下に記載する。

#### ① 最適材料の開発

より長寿命の金型とするためには、皮膜を緻密化し、高硬度で靱性の高い組成をもつ合金開発が必須であり、レーザー照射による皮膜の緻密化と金属結合を促進するボロン等の添加元素および高硬度を実現するための硬質粒子の微細化、体積含有率などについて検討し、金型に最適な高硬度自溶合金を開発する。

硬度の目標はビッカース硬さ HV1200 以上が不可欠で、先ずビッカース硬さ HV1200 (ロックウェル硬さ換算 HRA87.5) レベルの最適材料を目指し、次に HV1400 (HRA89.0) 以上の自溶合金を開発・適用し、最終的に HV1664 (HRA90.7) 以上の自溶超硬合金開発を目指す。

#### ①- (1) 最適材料の開発

金型に最適な高硬度自溶合金を開発する。

## ①－(2) 開発自溶合金の評価

開発する自溶合金をレーザ併用プラズマ複合溶射及び溶射皮膜の高周波誘導加熱フュージング法により皮膜を作製し、金型として最適な材料を評価・選定する。

## ② 金型の皮膜制御技術

### ②－(1) 装置開発

プラズマ溶射での皮膜の形成とレーザ照射を併用できるレーザ併用プラズマ複合溶射装置、必要に応じ高周波誘導加熱で連続して溶射皮膜のフュージングを行える装置を開発し、溶射＋レーザフュージング処理による皮膜が最適金型特性(硬さ、緻密性、密着性)となる実用条件を確立する。

### ②－(2) 皮膜制御

金型にレーザ照射を併用したプラズマ溶射を行い、必要に応じて高周波誘導加熱でフュージング処理する。自溶合金の皮膜厚さは、金型としての耐摩耗、耐久性を考慮し 300  $\mu$ m 以上を成膜する。皮膜は、目視試験で気孔が観察されない緻密な皮膜を目指す。皮膜の密着性は耐久性試験で評価する。

### ②－(3) パンチ、ダイのリユース技術の開発

パンチ、ダイ共に再利用のための再生溶射回数は母材の耐久性により決まるが、通常、母材の疲労劣化から 3 回程度であり、サイクル回数 3 回以上を目指す。

### ②－(4) 金型の耐摩耗性、耐久性の評価

皮膜作製前後の金型を精密研磨する装置及び金型の形状・寸法を計測できる三次元計測システム、非接触外径測定装置を設置する。また金型の長寿命化目標はこれまでの試作評価データから現状超硬材の 3 倍を目指す。

## ③ 開発要素技術の最適化及び各プロセスのシステム化検討と事業化課題の抽出

開発要素技術の最適化、各プロセスのシステム化を検討し、早期事業化のための課題を抽出する。

### ③－(1) 最適材料製造プロセスのシステム化検討

開発自溶合金(最適材)の製造、供給プロセスを検証しながら、材料製造プロセスの最適化、システム化、事業化の課題の抽出、検討を行う。

③－(2) 実加工品皮膜成形（リユース技術の適用含む）技術最適化とシステム化検討

実加工品へ最適材での皮膜成形試作、リユース品への皮膜成形を実施する。事業化のための製品のハンドリングなどの課題を抽出し、マニピレーターの改良、ロボット化などを検討する。

③－(3) フュージング処理技術最適化とシステム化検討

最適皮膜のフュージング処理による実加工品試作、リユース品へ適用を実施し、事業化のための処理工程の課題を抽出し、検討を加える。

③－(4) 検査の自動化ソフト開発

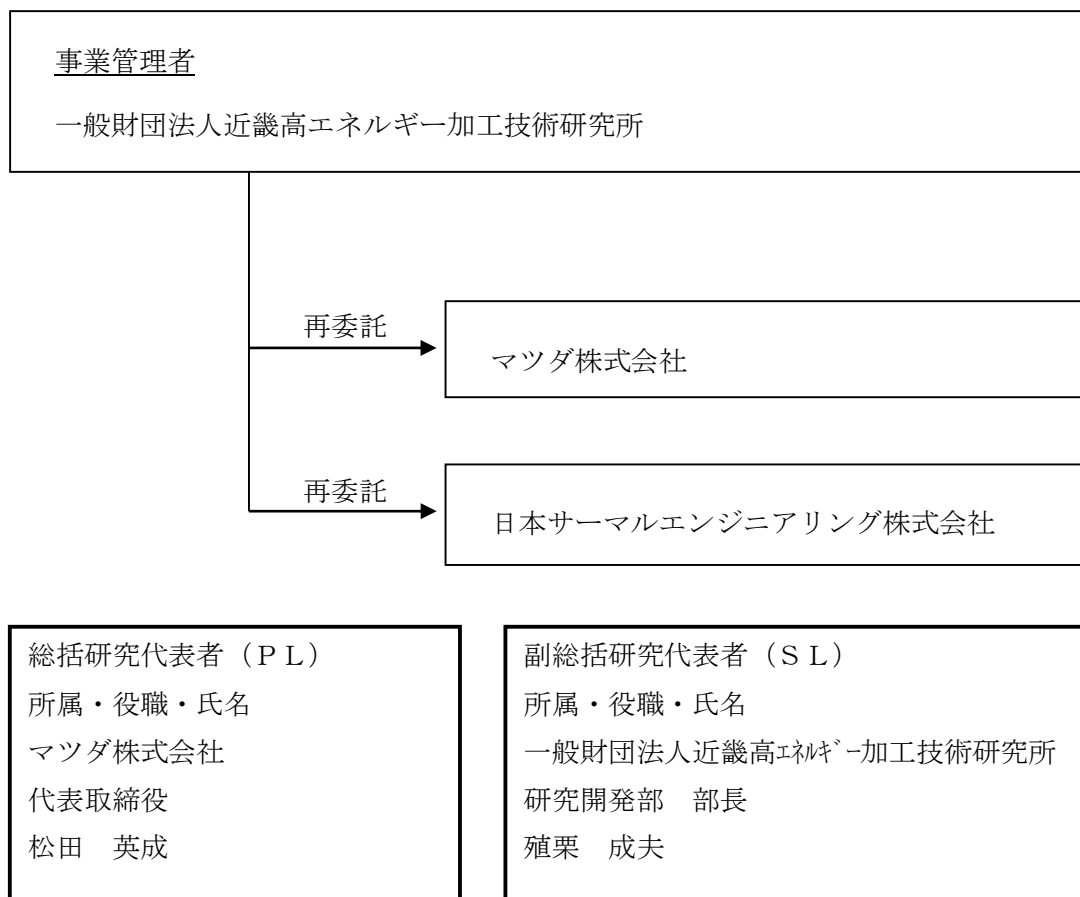
検査の自動化のためのソフト開発をする。

③－(5) 検査の自動化と実加工金型の評価

皮膜成形された実加工品の精密研磨による金型加工技術の確立を図るとともに、前項③－(4)で開発したソフトを使った非接触三次元測定の実加工品検査自動化システムを検討する。

実加工品は、自動車、電気機器などの分野のユーザでフィールドテストを行い、耐久性などを評価し、実用化のための課題を検証する。

1 - 2. 研究開発体制  
(研究組織・管理組織)



### 1-3. 成果概要

本事業において、粉末成形エレクトロニクス部品や冷間鍛造部品製造用等の金型の長寿命化及び低コスト化製造技術の確立を目指し、レーザー照射併用プラズマ複合溶射技術及び溶射皮膜の高周波誘導加熱によるフュージング技術の開発を推進した。

本開発では、合金製金型の局所に高硬度、高密着性皮膜を作製する基本技術を確立し、作製品質を達成するための「特願 2014-74988：粉末成形による金属皮膜の形成方法及び形成システム」、「特願 2014-74989：柱状母材への金属皮膜の形成方法」の特許出願を行った。

表 1-3-1 本プロジェクトの研究開発項目と成果の一覧表

| 開発項目                                | 目 標   | 判定 |
|-------------------------------------|---|----|
| 【1】最適材料の開発                          | 高硬度自溶合金開発：<br>超硬自溶合金粉末及び作製方法の開発                                     | ○  |
|                                     | 開発自溶合金の評価・最適材皮膜の硬さ：<br>Hv1200～Hv1664                                | ○  |
| 【2】金型の皮膜制御技術の開発                     | レーザー併用プラズマ複合溶射装置の開発：<br>装置の開発及び金型に適合する実用条件の確立                       | ○  |
|                                     | 高周波誘導加熱によるフュージング装置の開発：<br>装置の設置及び金型皮膜の作製方法と条件の確立                    | ○  |
|                                     | レーザー併用プラズマ複合溶射後の成膜厚さ：<br>300 μm 以上。目視で気孔が観察されない緻密な皮膜                | ○  |
|                                     | フュージング処理後の皮膜厚さと気孔率：<br>膜厚 300 μm 以上、気孔率 1% 以下                       | ○  |
|                                     | リユース技術の開発：<br>膜厚 300 μm、リサイクル 3 回以上の再成膜技術の確立                        | △  |
|                                     | 金型の精密研磨技術の開発<br>精密研磨技術の確立   | ○  |
|                                     | 三次元計測システムの開発と耐摩耗・耐久性評価：<br>非接触型三次元計測システム開発、耐久性データ取得<br>(現状超硬材の 3 倍) | △  |
| 【3】開発要素技術の最適化、各プロセスのシステム化検討と事業化課題抽出 | 開発要素技術の最適化：<br>個々技術の開発と最適化  | △  |
|                                     | 各プロセスのシステム化の検討と実用化課題の検証：<br>個々技術のシステム化、課題抽出と実用化検証                   | △  |

1－4．当該研究開発の連絡窓口

一般財団法人 近畿高エネルギー加工技術研究所 研究開発部 殖栗 成夫

電 話：06-6412-7800

F A X：06-6412-7776

E-mail：[ueguri@ampi.or.jp](mailto:ueguri@ampi.or.jp)



## 第2章 研究開発成果の内容

### 2-1 最適材料の開発

#### 2-1-1 高硬度自溶合金の開発

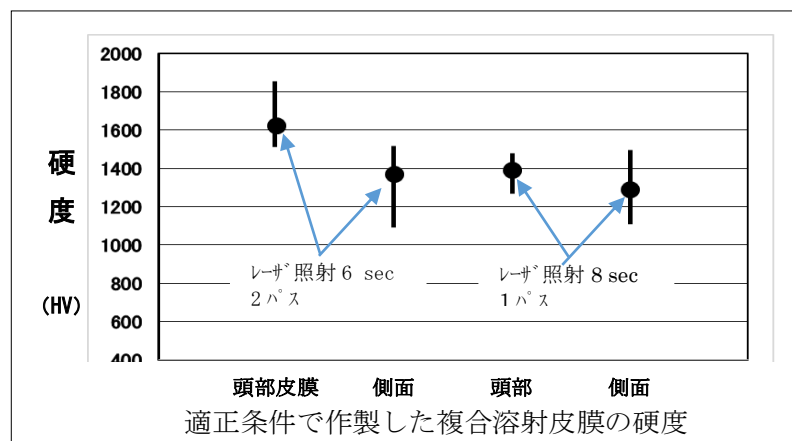
高硬度自溶合金合金の開発は、金属結合やマトリクスの硬質化を促進する B、Si 等を添加した自溶合金素材粉末に硬質 WC 微細粉末を混合した素材をベースに、WC 組成比及び粒度を変化させた約 10 種類の素材粉末を混合装置により調製した。これらの素材粉末を溶融実験にて各組成粉末の溶融特性及び硬さを調査し、Hv1200 以上になる WC-Ni 系及び WC-Co 系を選定した。



自溶合金素材の混合作製装置

#### 2-1-2 開発自溶合金の皮膜硬さの評価

開発した硬さ Hv1200 以上の自溶合金素材粉末を用い、レーザ併用プラズマ複合溶射法及び溶射皮膜の高周波誘導加熱フュージング法により金型皮膜を作製し、皮膜の硬さを検証した。その結果、80%WC 含有の自溶合金複合溶射皮膜は Hv1600 以上、高周波フュージング皮膜は Hv1400 以上の硬さを確認した。また複合溶射法では皮膜作製条件の制御によって WC 含有量が比較的小さい場合でも Hv1600 前後レベルの高硬度高靱性皮膜を得た。

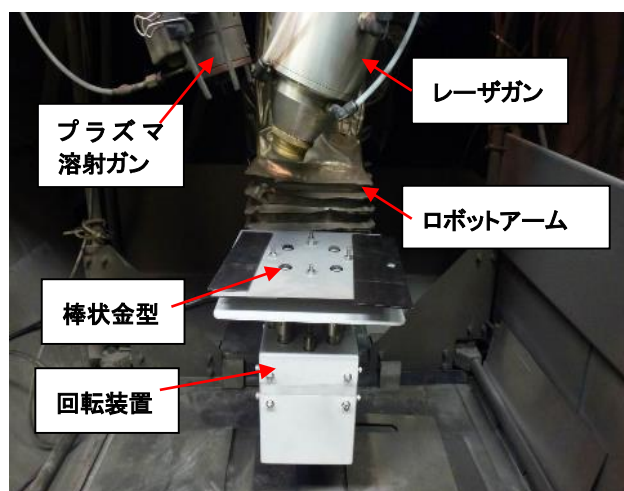


## 2-2 金型の皮膜制御技術の開発

### 2-2-1 皮膜作製装置の開発

#### (1) レーザ併用プラズマ複合溶射装置の開発

レーザ併用プラズマ複合溶射装置の開発では、プラズマ溶射装置とともに、レーザ照射システム装置、金型回転装置、同金型回転装置を移動させるロボットを導入した。レーザガンはエネルギー分布がトップハット型のカライドスコープ光学系を採用して均一な表面改質に適したレーザビームが得られた。



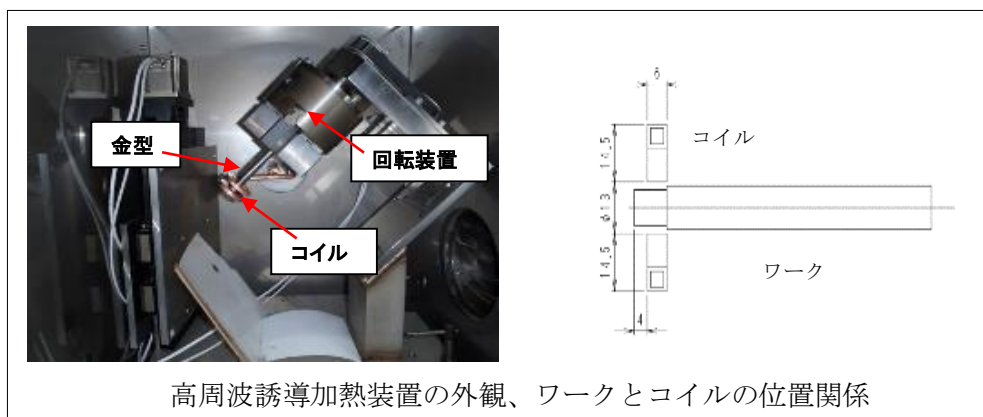
レーザ併用プラズマ複合溶射装置

レーザ併用プラズマ複合溶射装置の概要

| 装置項目       | 基本仕様  |
|------------|---|
| プラズマ溶射     | <ul style="list-style-type: none"><li>・最大出力：80 kW</li><li>・溶射雰囲気：50～760 Torr</li><li>・減圧チャンバー内径：Φ1600×2900mm</li><li>・粉末供給速度：0.2～2.0rpm</li></ul> |
| レーザ        | <ul style="list-style-type: none"><li>・レーザ出力：60～6000W</li><li>・波長：1030nm</li><li>・レーザ出射光学系：カライドスコープ</li><li>・レーザビーム：□5～□15mm</li></ul>            |
| ワーク回転部品    | <ul style="list-style-type: none"><li>・回転速度：10～500rpm</li></ul>   |
| ロボット       | <ul style="list-style-type: none"><li>・6軸ロボット</li></ul>   |
| 複合溶射モニター装置 | <ul style="list-style-type: none"><li>・光学倍率30倍</li></ul>  |

## (2) 高周波誘導加熱フュージング装置の開発

高周波誘導加熱フュージング装置は、初年度にパンチ等の金型の局所加熱を実施可能な基本装置を開発した。H25年度以後、更に金型姿勢制御装置の導入や加熱コイルの改良を実施した。



### 高周波誘導加熱フュージング装置の概要

| 装置項目        | 基本仕様  |
|-------------|---|
| ワーク装置       | <ul style="list-style-type: none"> <li>ワークサイズ：350×400×300mm</li> <li>最大重量：800g</li> <li>回転数 10～300rpm</li> <li>最大重量：800g</li> <li>X軸：ストローク 100mm、速度～100mm/s、位置決め 0.1mm</li> </ul> |
| 放射温度計       | ・500～1500℃、測定スポット径Φ2mm  |
| 電離真空計       | ・ $1 \times 10^{-5}$ Pa 以上  |
| 輻射率測定用小型電気炉 | ・温度範囲：100～900℃  |
| 高周波電源       | ・電源。誘導加熱用コイル  |

## 2-2-2 皮膜制御技術の開発

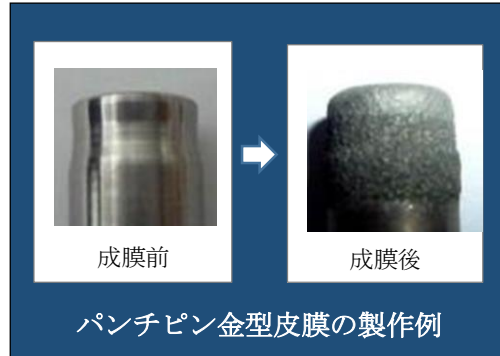
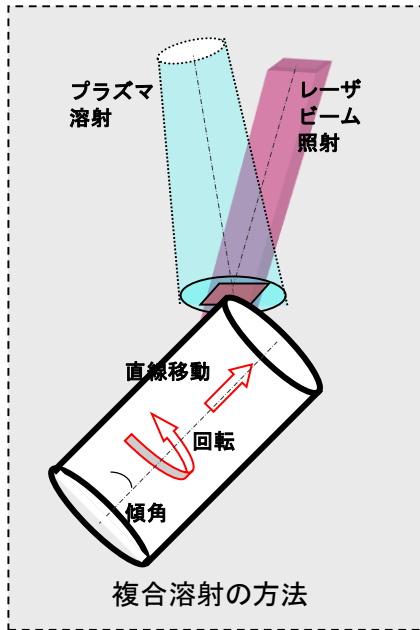
### (1) レーザ併用プラズマ複合溶射皮膜の制御技術

レーザ併用プラズマ複合溶射による皮膜制御技術の開発では、プラズマ溶射スプレーとレーザビームの照射部を基材表面に重畳させるプラズマ・レーザの同時重畳成膜方式を採用した。複合溶射の成膜域において、金型を回転させて均一な皮膜を確保しながら金型の直線移動で成膜部位に応じて必要な膜厚を制御した。300 $\mu$ m以上の厚膜作製においても、レーザ照射のパワー密度、エネルギー密度及び粉末供給量や金型傾斜角の総合制御により緻密性、密着性及び高い硬度の皮膜を得た。本制御技術の開発により膜厚 300 $\mu$ m 以上、硬さ Hv1200～1600 の金型皮膜を実現した。

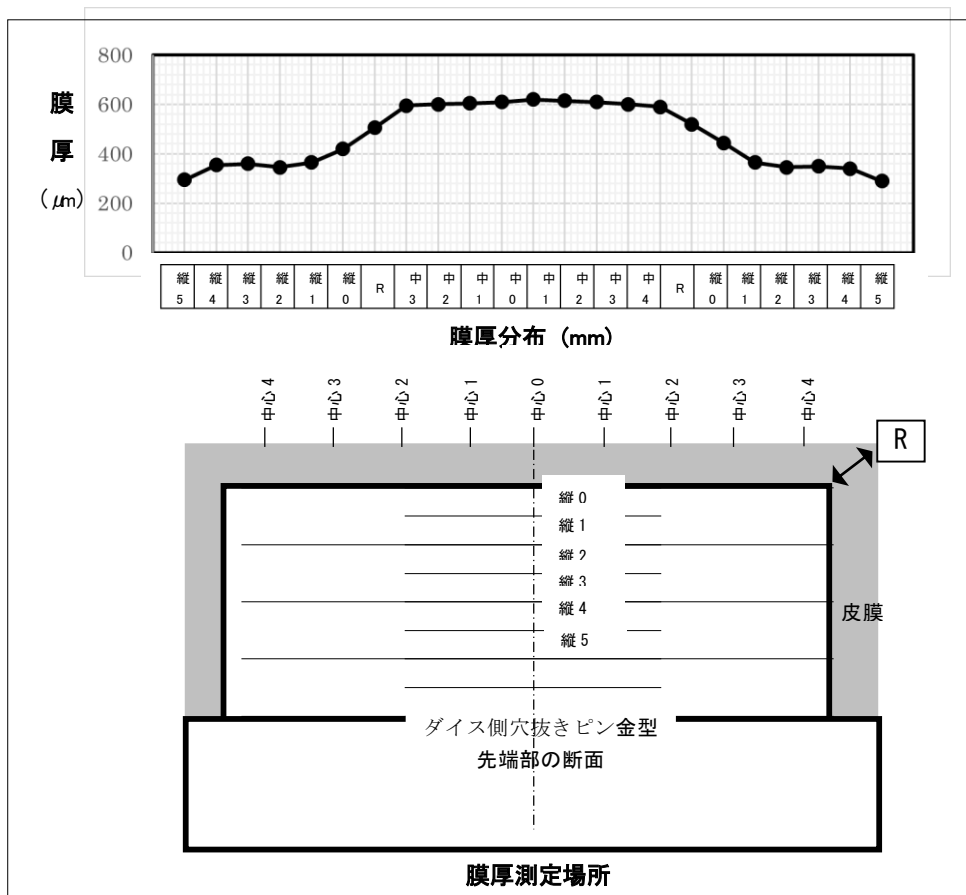
### (2) 高周波誘導加熱フュージングの皮膜制御

周波数や加熱時間により金型基材表面付近と金型皮膜の加熱・溶融具合を制御しながら、金

型の回転速度と傾斜角の制御によって皮膜融体の最終形状を有効にコントロールし、パンチ金型などで重要な角部厚膜を確保し、均一で緻密な皮膜の作製ができた。



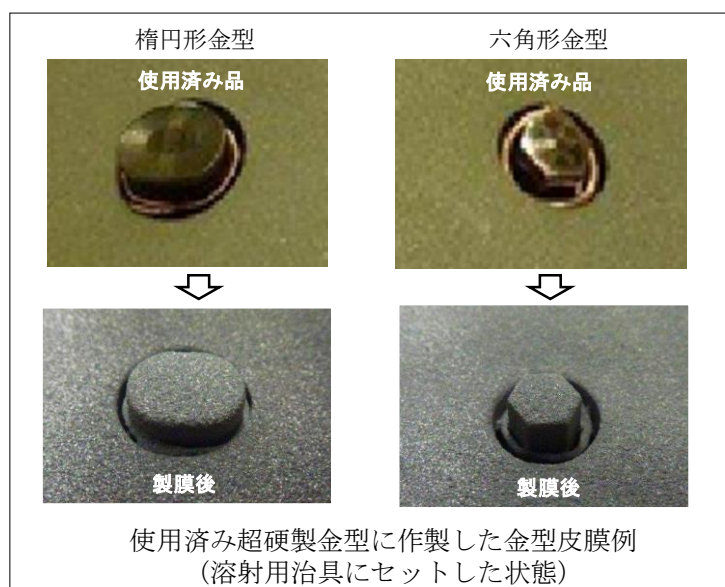
複合溶射による金型皮膜の製作例



複合溶射により作製した金型皮膜の膜厚分布例

### 2-2-3 リユース技術の開発

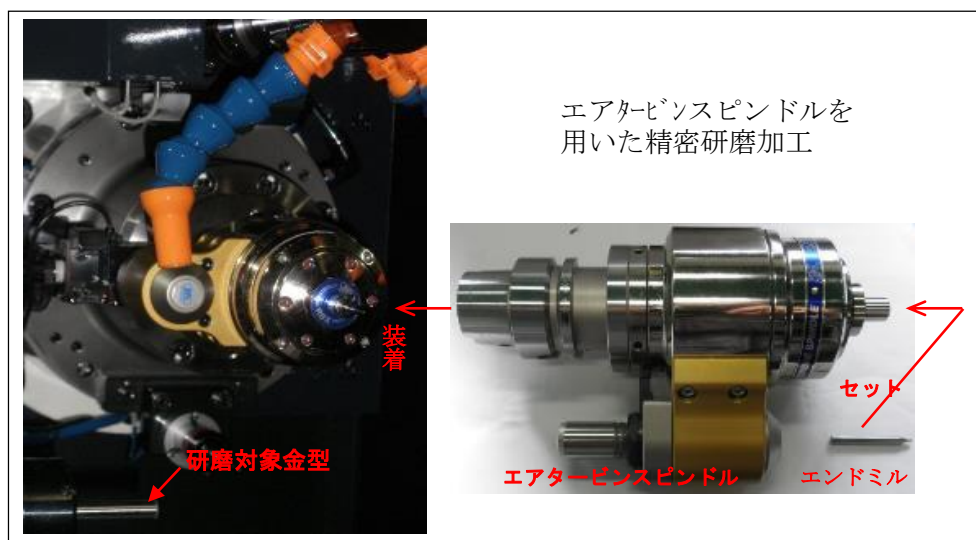
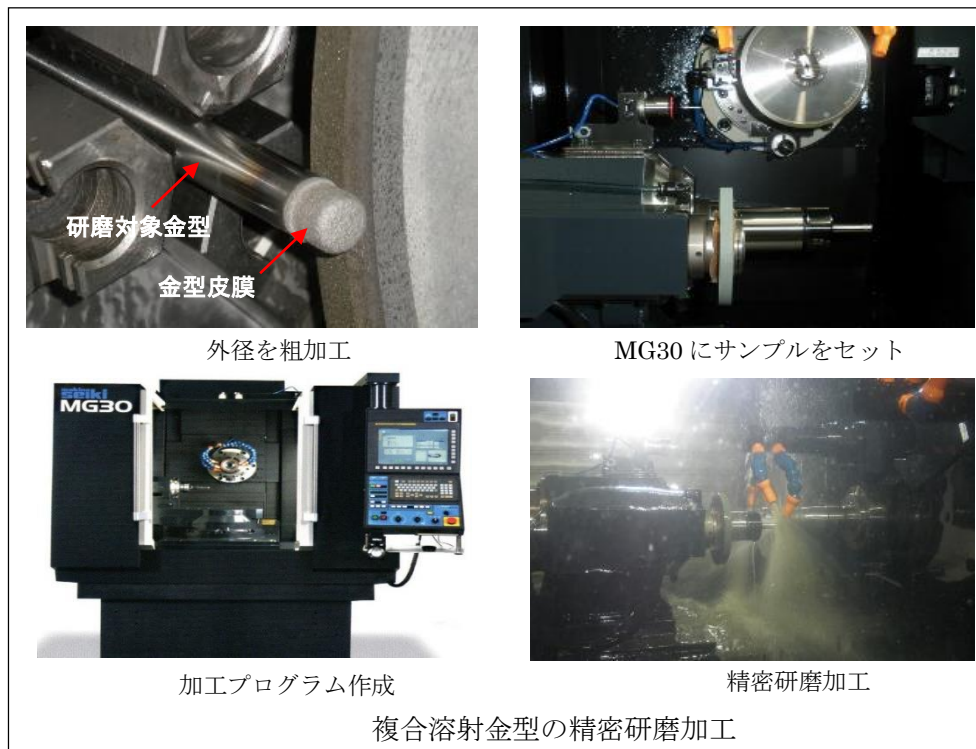
使用済み金型に再度皮膜を作製するリユース技術の開発では、パンチ金型を対象に複合溶射成膜を実施し、膜厚が 300  $\mu$  以上の成膜ができた。使用済み金型が超合金製の場合、再施工前の表面粗面化のためのサンドブラスト前処理の管理がリユース成膜の密着性に多大な影響を与えることを確認した。ダイス金型のリユースは複数の実施方法を比較しながら作製プロセス条件を確認して進める必要がある。



### 2-2-4 金型の耐久性評価

#### (1) 精密加工技術の開発

精密研磨加工技術の開発では、高精度 CNC 工具研削盤 (MG30) を使用し、レーザ併用プラズマ複合溶射皮膜及び高周波誘導加熱によるフュージング処理した皮膜を有する金型 (ダイス側穴抜きピン) の適正加工方法及び研削プログラムの開発を行った。高硬度皮膜の粗加工から精密加工まで一連の加工プロセスの開発により、必要な緻密な皮膜の厚さ、精度を得るための適正な研削量を把握した。更にエアタービンスピンドルにより超硬金型加工法を拡張し、高精度研磨加工技術を開発した。



## (2) 全自動三次元計測センサーシステムの開発

より高精度で効率的な金型研磨加工システム開発の一環として、H25 年度に非接触全自動三次元計測システムを導入し、精密研磨加工した金型の計測を行い、得られたデータをフィードバックして解析し、対象金型の計測プログラムを開発した。H26 年度にこのシステムの改造・高性能化を行い、次のような技術開発を行った。

- ① システムの改造・高性能化：端面形状の即時計測レーザセンサー及び金型深部を計測するためのタッチプローブを計測システムに組み込んだ。

② 端面形状の即時計測：八角形、楕円形など異形金型端面やデーパー形状を点群としてデータ取得できるレーザセンサーを計測システムに組み込んだ。

③ 金型深部形状の計測補助：光学系のみでは測定が難しいダイスなどの金型内面の立壁、深部、傾き形状をより精密に計測するためのタッチプローブを計測システムに組み込んだ。

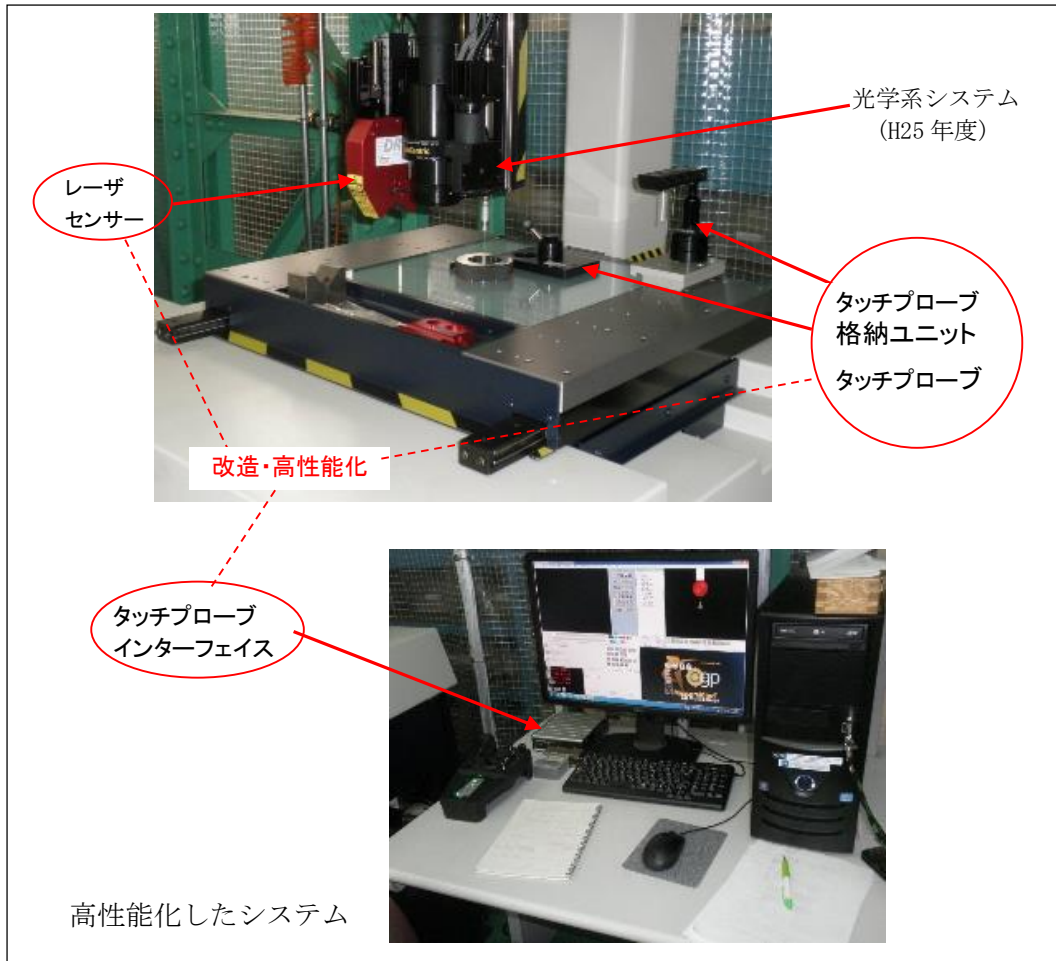
また、複合溶射及び高周波誘導加熱フュージングにより作製し、精密研磨加工済みの金型皮膜、使用済みでリユース前の金型を用いて本システムでの計測を行った。



三次元計測システム装置の外観

三次元計測システムの概要

| 構成                    | 内容   | 備考                   |
|-----------------------|--|----------------------|
| 測定機本体                 | ストローク X 軸:300 mm<br>Y 軸:300 mm<br>Z 軸:300 mm<br>駆動速度 XY 軸:200 mm/s<br>Z 軸:100 mm/s<br>分解能 :0.1 μm<br>最大積載重量 :30 kg                                     | ストロークは金型の最大寸法を考慮     |
| 光学系                   | 光学レンズ 測定倍率:×40~×200<br>レンズ作動距離:80 mm<br>輪郭、同軸落射照明 :LED 使用<br>リング照明 :ハロゲンランプ使用<br>画像入力 :デジタルカラーCCD  |                      |
| コンピュータシステム・測定評価ソフトウェア | CPU:Core-I CPU、OS: Windows7<br>モニター:24 インチ<br>測定評価ソフト:要素及び輪郭形状測定対応<br>3次元測定 MEASUREMIND 3D CNC<br>データ処理・検査表作成 SMART SHEET 32<br>形状評価・解析 Smart CAD Link | マニュアル測定とプログラムによる自動測定 |



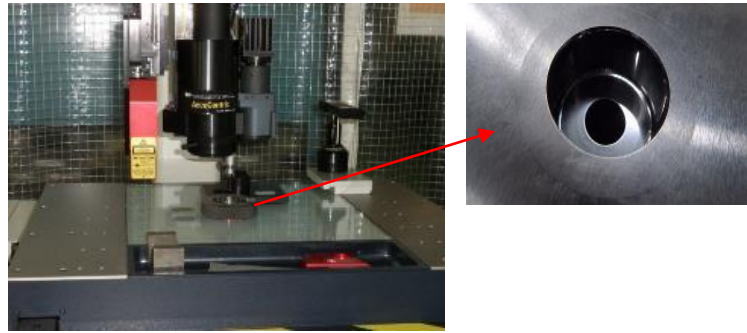
レーザセンサーでの楕円パンチの計測

楕円パンチの計測結果

| 項目 | 形状  | 規格値   | 上限公差 | 下限公差 | 計測値    |
|----|-----|-------|------|------|--------|
| ①  | X距離 | 9.7   | +0.1 | 0    | 9.8    |
| ②  | Y距離 | 14.7  | +0.1 | 0    | 14.746 |
| ③  | X距離 | 6.2   | +0.1 | 0    | 6.275  |
| ④  | Y距離 | 11.2  | +0.1 | 0    | 11.294 |
| ⑤  | 角度  | 1.5°  | 0    | 0    | 1.393  |
| ⑥  | 半径  | R4.85 | 0    | 0    | 4.835  |
| ⑦  | 半径  | R3.15 | 0    | 0    | 3.12   |



タッチプローロによるダイスの測定



ダイスの計測結果

| 項目 | 形状   | 規格値     | 上限公差  | 下限公差 | 計測値    |
|----|------|---------|-------|------|--------|
| ①  | 直径   | φ 19.95 | +0.01 | 0    | 19.960 |
| ②  | 直径   | φ 8.6   | +0.02 | 0    | 8.607  |
| ③  | Z 距離 | 11.0    | +0.1  | -0.1 | 11.051 |



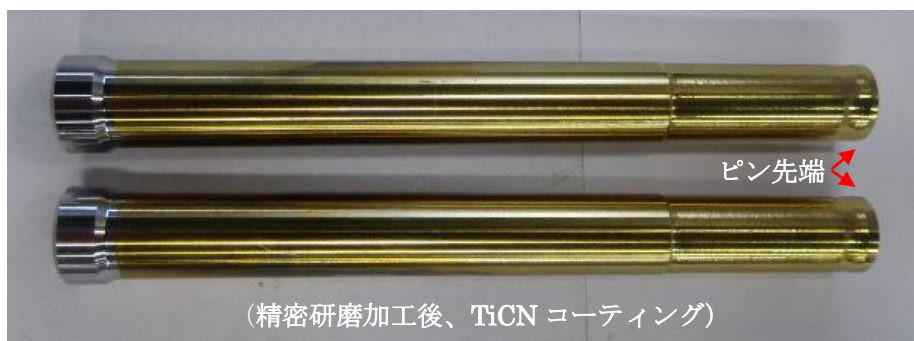
新品と使用済み  
品パンチピンの  
計測

パンチピンの計測結果

| 項目 | 形状   | 規格値   | 上限公差 | 下限公差  | 新品 (A) | 使用済 (B) | 差=(B)-(A) |
|----|------|-------|------|-------|--------|---------|-----------|
| ①  | Y 距離 | 11.73 | 0    | -0.02 | 11.725 | 11.737  | 0.012     |
| ②  | X 距離 | 42.0  | +0.1 | 0     | 42.159 | 41.959  | -0.200    |
| ③  | X 距離 | 1.5   | 0    | 0     | 1.082  | 1.269   | 0.187     |
| ④  | 半径   | R0.3  | 0    | 0     | 0.331  | 0.317   | -0.014    |
| ⑤  | 角度   | 5°    | 0    | 0     | 6.197  | 4.973   | -1.224    |

(3) 皮膜金型精密研磨後の施工

工具鋼製のパンチの先端部に金型皮膜を作製後、耐焼付性を付与するため、PVD 法により数  $\mu\text{m}$  程度の TiCN コーティングを実施し、良好な金型表面を得た。



フィールドテスト用ダイス側穴抜きピン (金型皮膜+TiCN コーティング)

## 第3章 全体総括

### 3-1 最適材料の開発

最適材料の開発は一部の項目を除いてほぼ計画通り進められた。高硬度を目指した WC 粒＋自溶合金の混合粉を選別し、更に高硬度を得る手段として、微細 WC 粒及び混合比率の検討を行い、微細 WC を造粒＋焼結したものと自溶合金との混合粉末の作製に成功した。成膜実験において、各種評価を行った結果、多くの知見を得た。高硬度を安定して製造出来る実用化技術の開発を通じて開発材料の安定性を検証し、実用化の目途が得られた。今後高品質の確保と安定調達について検討する必要がある。

### 3-2 金型の皮膜制御技術

レーザ併用プラズマ複合溶射により材料の表面に高硬度の皮膜をつける技術開発に関しては、これまで色々な条件で実験を行い、皮膜の性状、組織調査、硬度測定などを行った結果、皮膜形成条件についてほぼ把握することが出来た。最終年度は実用化を目指して、小径（Φ10mm）パンチピンの頭部および側面に安定して皮膜を形成する技術開発を行った。ピンを溶射中に回転する、傾斜する、溶射ガンの移動速度をコントロールする等の操作技術を確立することが出来、実用化の目途が得られた。

溶射皮膜の高周波誘導加熱方式によるフュージング処理方法については、予め減圧又は大気溶射で作製した金型皮膜を使って回転条件や加熱条件を変えた実験を行った結果、フュージング処理方法について新しい知見を得ることが出来た。最適条件で処理したものを、精密研磨加工し、実打ち抜き実験に供することが出来た。又得られた知見については特許申請中である。

リユース技術の開発では、パンチピン先端への成膜および補修技術については、これまで多くの知見を得ることが出来たが、パンチ相方のダイスのリユースについては、形状の複雑さや形成の困難さから、開発は充分に進んでいない。

個々の皮膜制御技術の開発が進んできたが、今後フィールドテストのデータを蓄積しながら、実用に向け安定作製技術の改良を更に進める必要がある。

### 3-3 金型の耐久性評価

開発した精密研磨装置及び計測装置を使って、複合溶射や溶射後の高周波誘導加熱によるフュージング処理したパンチピンを所定の寸法に精密研磨加工した。その結果、開発した研削加工プログラムで粗加工から仕上げ加工まで一連の加工を問題なく実施することが出来た。また、微小欠陥が多少含まれる再表層部を含む部分を完全に研削するための適正研削量も把握することが出来た。今後も引き続き適正砥石材料や治工具の開発及び精密加工技術のノウハウ蓄積に努める予定である。

皮膜形成技術の中の最適化システムの完成を目指して、開発した非接触三次元計測システム

について、改造や高機能化を行い、使用済みパンチや新作製パンチの計測を実施した。楕円形の異形金型の端面をレーザセンサーで計測することが可能であることがわかり、複雑形状の計測技術を確立することが出来た。更に光学系のみでは測定が難しいダイス内面に対して、導入したタッチプローブを計測システムに組み込むことにより、計測が可能になった。今後、計測技術のノウハウの蓄積する予定である。また非接触型インライン、オンチャック計測システム化の可能性についても検討したい。

### 3-4 まとめ

- ・ 限られた期間の中では、所期の完成度に達しなかった開発項目もあるが、全体としては、開発は良好であったと判断している。
- ・ 数多くの要素技術を研究・開発し、それを活用してプロセスの適正化、システムの最良化を求めてきた。このプロジェクトでは、パンチピンに的を絞り、その実用化技術の開発促進、習得に努めてきた。実用化が手に届くところまで来ていると思われるが、製造部門に安心して手渡せる技術レベルまでには、一層な努力と時間が要ると考える。今後出て来るいろいろな課題を一つ一つ解決して行けば、自ずとその道は開けるものと確信するところである。

### 3-5 今後の課題・事業化展開について

- ・ 事業化に必要な要素の一つ、量産加工技術の確立を達成するには、個々の要素技術の安定化、信頼性の評価及び製作システムの構築が必要である。今後のこれら技術の熟成度を更に高めていく予定である。
- ・ 事業化に必要な要素の中で、マーケットニーズとそれに見合う品質と価格の提供に関しては、まずマーケットニーズについて、計画の粉末成形エレクトロニクス部品用金型など当初の需要のみならず、その他適用できる自動車、電気機器、鉄鋼産業など潜在的新規需要が見込まれている。また、品質及び提供価格については当初計画予定の達成と量産システムの構築の中でクリアできると考えられる。