

令和2年度  
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業  
戦略的基盤技術高度化支援事業

「溶射エンジンブロックのボア内面加工品質向上と  
製造コスト削減を実現する  
計測と欠陥検査を一体化した  
世界初の革新的レーザ加工装置の実用化開発」

研究開発成果等報告書

令和5年5月

担当局 中国経済産業局  
補助事業者 公益財団法人ひろしま産業振興機構

## 目次

第1章 研究開発の概要	3
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1-1-1 研究開発の背景・研究目的	3
1-1-2 研究開発の目標	3
1-2 研究体制	5
1-3 成果概要	5
1-4 当該研究開発の連絡窓口	6
第2章 本論－（1）	7
2-1 加工現象の解明	7
2-2 一体化装置の開発	11
最終章 全体総括	14
3-1 研究開発の成果	14
3-2 課題及び今後の解決策	14

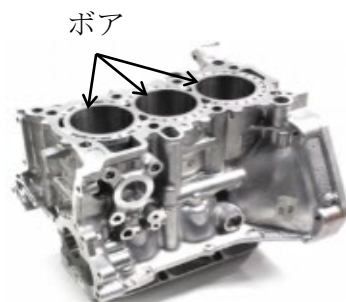
## 第1章 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### 1-1-1 研究開発の背景・研究目的

自動車業界では電動化の推進と並び、エンジンの高性能化が重要な課題となっている。実際 2050 年においても純粋な電気自動車（EV）と燃料電池車（FCV）を除きすべてエンジン搭載車であり、そのシェアは 80%以上と予測されている。欧州においても高性能エンジンの開発は継続して行われており、当面は主力の動力源として使用されると考えられている。その中で低燃費な溶射エンジンが国内外で注目されており、技術革新により高性能エンジンの主役となる可能性が高い。溶射エンジンではエンジンブロックのボア内表面に形成する硬質膜が燃費向上に大きく寄与しており、この膜が剥がれないよう内面の前処理加工が重要となる。しかし、現行実施されているブラスト加工や切削加工は品質管理が難しく、剥離不良が発生している。また、加工形状に制限があることが品質改善を阻害している。さらに、溶射前に実施される加工の品質確認は、検査員による目視確認や三次元計測機・内面欠陥検査装置等で行われるため、不良品の見逃し及び検査コスト高の問題も抱えている。そのため溶射エンジンは一部の高級車での採用に留まっている。

そこで本研究開発では、2種類のレーザ光源を用いて、精密で自由度の高いボア内面加工と計測・欠陥検査を同時に実施可能なオンリーワンのレーザ加工装置を開発する。これにより、溶射エンジンの「品質向上」と「製造コスト削減」を実現し、日本のものづくり競争力の向上に貢献する。



エンジンブロック

#### 1-1-2 研究開発の目標

##### 【高度化目標】

##### (三) 精密加工に係る技術に関する事項

##### 1 精密加工に係る技術において達成すべき高度化目標

##### (3) 川下分野横断的な共通の事項

##### ②高度化目標

- ア. 当該技術が持つ物理的な諸特性の向上
- イ. 品質の安定性・安全性の向上
- オ. 生産性・効率化の向上、低コスト化

## (十二) 測定計測に係る技術に関する事項

### 1 測定計測に係る技術において達成すべき高度化目標

#### (3) 川下分野横断的な共通の事項

##### ②高度化目標

- イ. 測定結果の信頼性向上
- ウ. 評価（分析・解析）の効率性向上
- カ. 小型化
- キ. 低コスト化

自動車業界は今、100年に一度の大変革期を迎えている。その中で各社とも新技術分野（CASE等）の開発や環境負荷低減などの対応も含め、製品品質の要求レベルは年々高まってきている。また、同時にグローバル化によるコスト競争も激しくなり、省人化・自動化とともに生産ロスの低減などによる大幅なコスト削減が要求されている。これに対応する高機能な加工及びインラインでの自動計測・検査技術の向上のため、加工・計測・欠陥検査を同時に行うことが可能な加工装置を開発し、顧客からの高度化要求に応えていく。

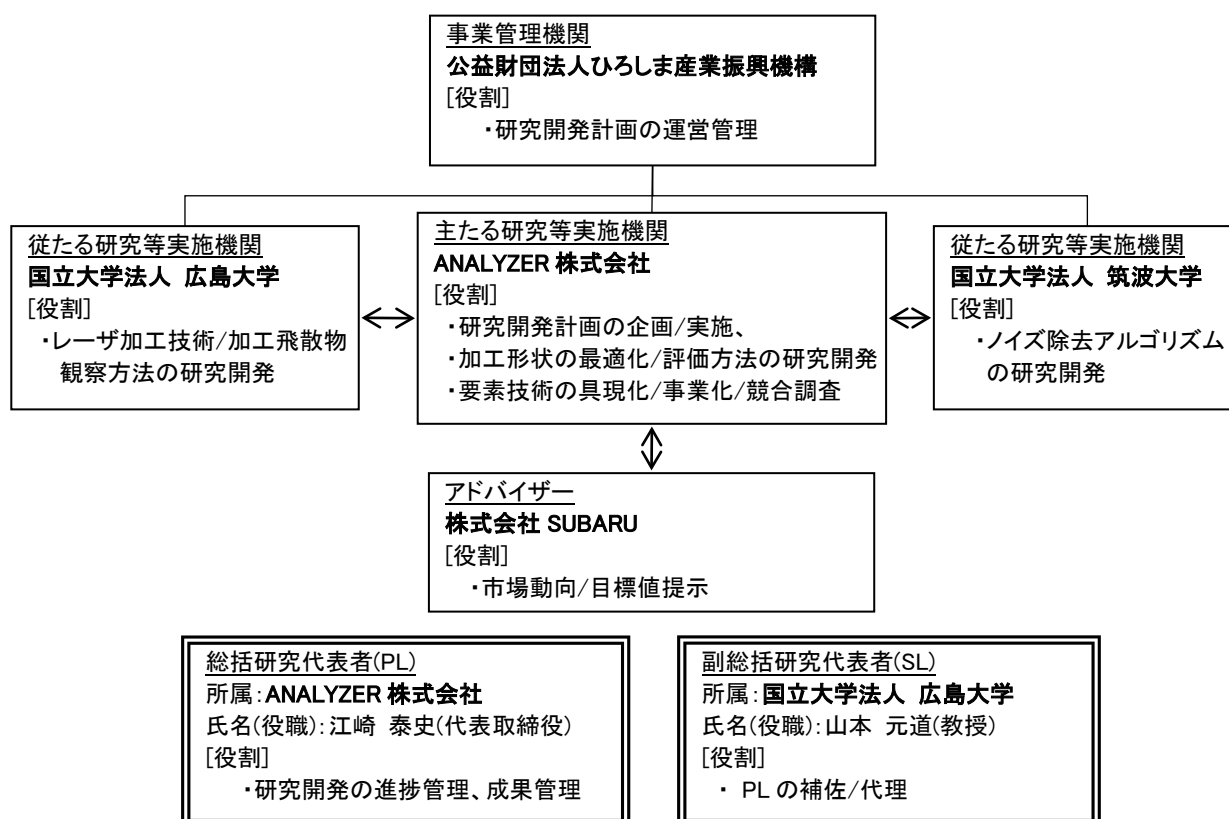
#### 【技術的目標】

自動車分野で溶射が行われるエンジンプロックのボアは高精度穴と呼ばれており、図面寸法規格値はミクロン公差（例： $\phi 100+0.01\text{mm}$ ）となっている。開発する装置の加工・計測・欠陥検査精度はこれに対応するレベルが求められる。

また、加工・計測・欠陥検査それぞれに関する基本技術はANALYZER株式会社が保有しており、これらを同時に実施することに大きな課題がある。さらには溶射の前処理としてレーザ加工が採用されることがほぼ無い状況であり、その加工形状の評価方法が存在しないことも課題となる。これらより以下の3つを研究課題・目標とした。

- [1] 加工現象の解明：加工時に発生する加工飛散物及びプラズマ等の発光現象は計測・欠陥検査に影響を及ぼす。ボアのような曲面ではこれらの発生状態は世界的にも未解明であり、これを把握する。
- [2] 一体化装置の開発：レーザ照射条件設定による加工飛散物の制御、及び発光現象の影響を除去する機構と除去アルゴリズムを検討・開発する
- [3] 装置利用技術の確立：従来は加工形状に制限があり剥離強度向上に適する形状検討は進んでいない。よって新たな剥離強度評価方法も含め加工形状を最適化する手法を開発する。

## 1-2 研究体制



## 1-3 成果概要

### [1] 加工現象の解明

加工現象の観察・計測システムを構築し、プラズマや加工飛散物の発生状況を確認することができた。また、分光計測器を使ってプラズマに含まれる光の波長分布を測定し、計測・欠陥検査への影響が明らかにすることができた。さらには、加工部にエアを吹きつけることでプラズマの影響を最小限に抑えることが可能であることを確認した。

### [2] 一体化装置の開発

これまでの様々な検証結果を踏まえ、一体化装置の設計を行い、実際に組み立て、動作検証を実施することができた。

### [3] 装置利用技術の確立

従来の溶射膜の剥離強度評価方法である引張試験（JIS H8402「溶射被膜の引張密着強さ試験方法」）では、基材から溶射膜を引き剥がす方向へ荷重をかける方式となっている。しかし、溶射エンジンにおけるピストンの与える荷重方向とは相違があることから、溶射エンジンの特性に合致したせん断方式による溶射膜の剥離強度測定方法を確立することができた。

また、溶射前処理として従来技術である機械加工とレーザ加工の比較を行い、従来技術比3倍以上の剥離強度を実現する加工形状が実現可能なことを確認できた。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

ANALYZER 株式会社 世良 博史

Tel 082-426-6672

E-mail sera@analyz.jp

## 第2章 本論

### 2-1 加工現象の解明

#### 加工飛散物及びプラズマの画像化

レーザ加工中の加工飛散物やプラズマ等の発光現象の観測をするために、図2-1のような曲面における加工現象の観察システムを作製し、円筒ワークへのレーザ加工および加工飛散物の観測が可能となった。この観察システムは、レーザ加工時は高速回転する円筒ワークに対して垂直に加工用レーザを照射し、円筒ワークが上昇することでらせん状に加工溝を形成することが可能である。

この観測システムを用いて、レーザ加工中の様子を撮影する事に成功した。その様子を図2-4に示す。この撮影内容から、プラズマ発光の様子や発光体の大きさ、加工飛散物の飛散方向、大きさなどを把握することができた。この結果より加工飛散物の大きさが数 $\mu\text{m}$ 程度であることが判明し、計測用レーザおよび欠陥検査用レーザのスポット径よりも十分小さいことに加え、加工飛散物の数も多くないことから、加工飛散物が計測および欠陥検査へ与える影響は無視できる見通しを得ることができた。

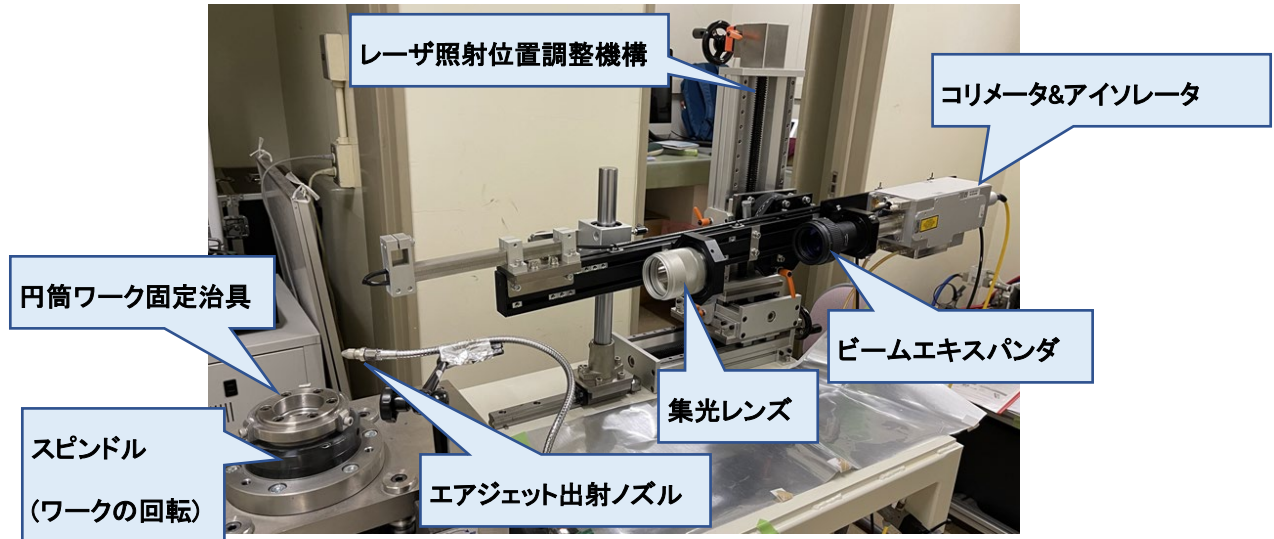


図2-1 曲面における加工現象の観察システム

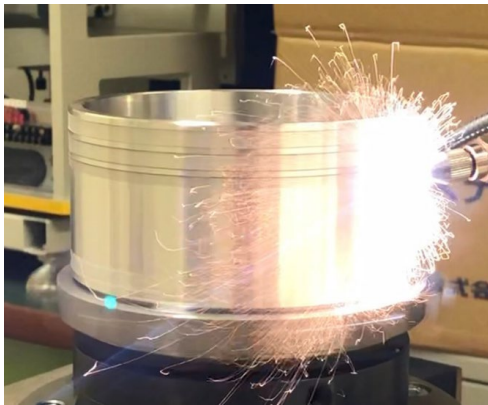


図 2-2 プラズマが激しく発生している様子

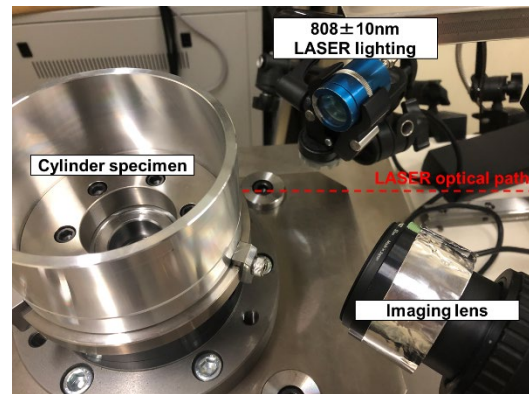


図 2-3 高速度カメラとワークの位置関係

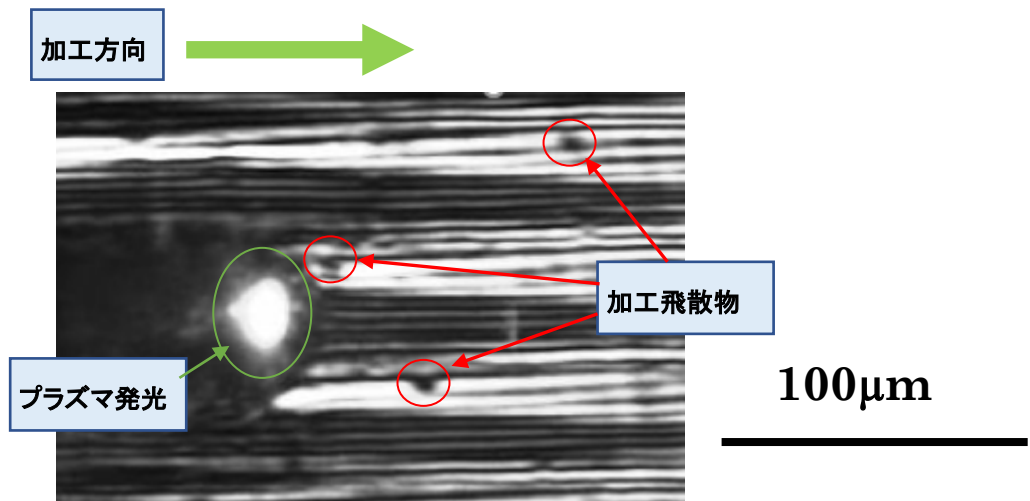


図 2-4 高速度カメラによるプラズマ、加工飛散物の様子

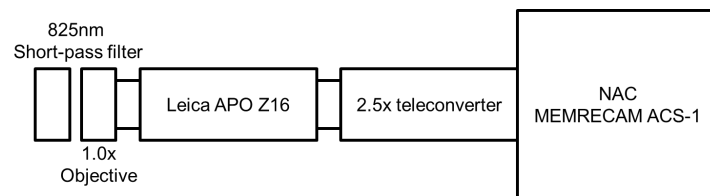


図 2-5 高速度カメラ機器構成

## プラズマに含まれる光の波長分布測定

プラズマ光に計測・欠陥検査用レーザと同じ波長領域の光が含まれていると計測・欠陥検査用センサへ影響を与え、計測・検査精度が悪化する懸念がある。そこで、分光計測器を使ってプラズマ光に含まれる波長成分の計測を実施した。図2-6のように加工レーザがワークに当たって発生したプラズマ光が分光計測器に入光するように配置し計測を実施した。

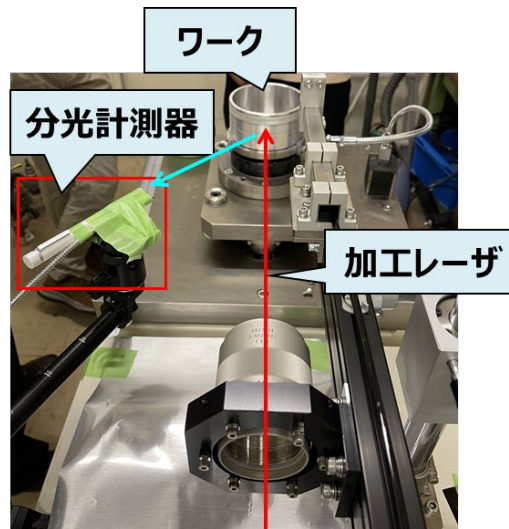


図2-6 分光計測器の設置位置

計測結果は図2-7に示す通り、加工レーザの波長1064nm付近の光が多く含まれるのは予想通りだが、欠陥検査用レーザ640nmと計測用レーザ840nm付近の波長成分は予想よりも少ないことが解明できた。

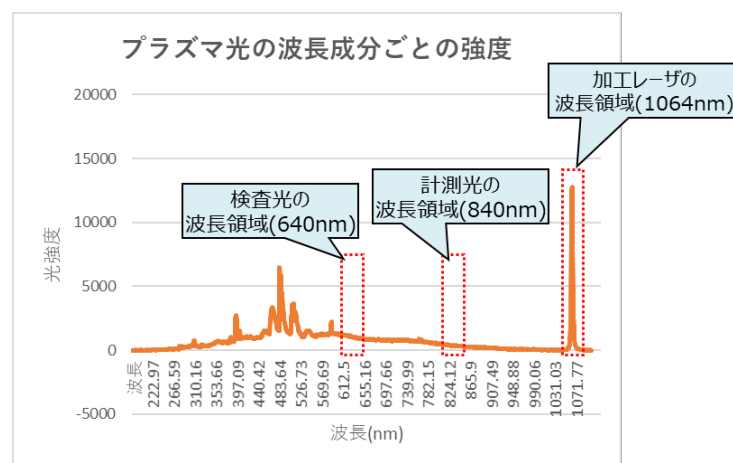


図2-7 プラズマ光に含まれる波長成分(エアジェット無し)

一般的にレーザ加工時はプラズマが発生し、そのプラズマによって加工用レーザ光が加工対象面に届かない、あるいは届いてもエネルギーが減少して想定通りの加工ができない現象が発生する。その対策として加工面に対してエアジェットを吹き付けてプラズマを除去することが一般的となっている。よって、曲面でもエアジェットで効果的にプラズマ光が除去できるか検証を実施した。その結果、図2-8のように欠陥検査レーザ640nmと計測レーザ840nm付近の波長は更に少なくなり、ほとんど存在しない事が確認できた。

これら分光計測器の計測結果から、曲面においても加工時にエアジェットにて効果的にプラズマ光を除去することができ、計測・欠陥検査への影響を最小限に抑えられる見通しを得ることができた。

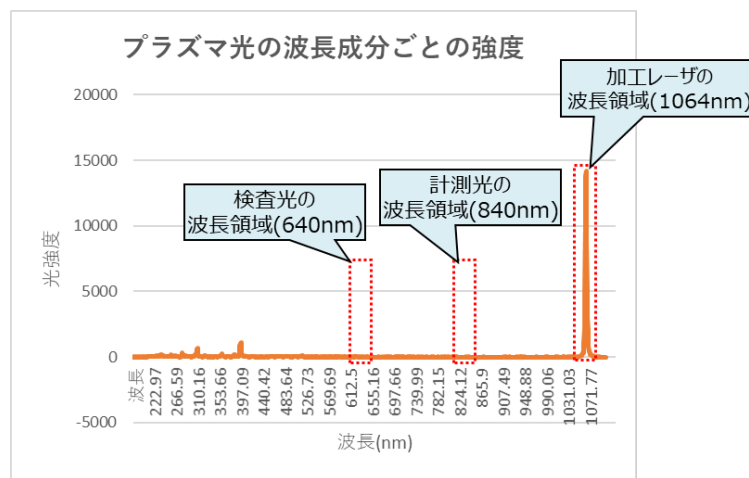


図2-8 プラズマ光に含まれる波長成分(エアジェット有り)

## 2-2 一体化装置の開発

これまでの様々な検証結果を踏まえ、一体化装置の設計を行い、実際に組み立て、動作検証を実施した。

### 一体化装置の設計

設計時のポイントは以下の通りである。

- ・商品化を見据え、ワーク付近に配置する必要がある加工光学系等のレイアウトをコンパクトにし、テーブルトップサイズとする
- ・エキスパンダによりビーム径を拡大することでワークに照射するスポット径を絞り込み、エネルギーを集中させて短時間で効率よく加工可能とする
- ・スポット径の調整により作製する溝の幅を調整する
- ・ワーク表面に対して垂直にレーザ照射できるように光軸調整可能とする
- ・ワーク表面で最もビームスポット径が小さくできるように焦点位置を調整可能とする
- ・ダイクロイックプリズムで計測光、加工レーザの2種類の波長の光を合波し、同軸に照射可能とする
- ・加工時に発生するプラズマを減衰させるためのフィルタを検査用受光部分に設置する
- ・シャフト部分に140L/min(⇒0.6MPa)のエア流量を投入可能とする
- ・オイルシールによりスピンドルモータからのエア漏れを防ぐ仕様とする
- ・ワーク台座に隙間を設けることで加工飛散物がワーク内へ堆積することを抑制する仕様とする

### 一体化装置の組み立て

前述の設計内容を基に機材を準備し、組み立てを実施した。



図 2 - 9 一体化装置全体

### 一体化装置の動作検証

組み立てが完了した装置の動作検証を実施した。ガイド光などを利用して光軸を調整した後に、低出力にて加工用のレーザをワークに照射して加工を行った。徐々に出力を上げて動作確認を進めていき、最高出力で円筒ワーク内面の加工を実施した。

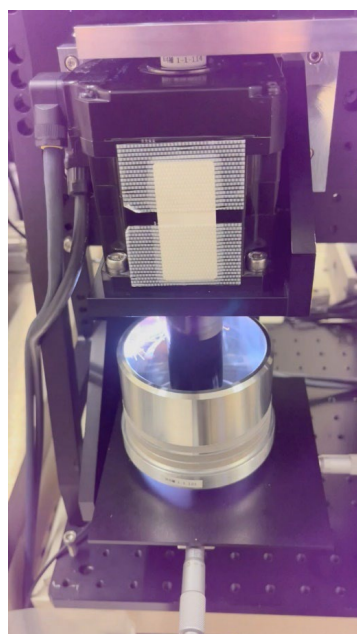


図 2 - 10 最高出力にて動作

最高出力においてもワーク内面が加工できており問題ないと思われたが、この検証にてシャフト先端部のミラーが破損してしまった。

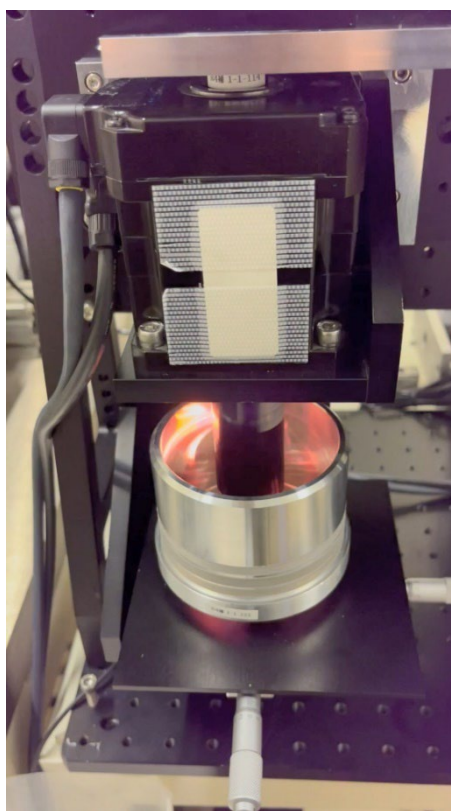


図 2 - 1 1 動作検証中に異常発生

ミラー破損の原因として、500mm の長焦点レンズでレーザーを集光しているため、レンズへの入射の際の角度ズレにより焦点位置が変化しやすく、これにより焦点がワーク表面ではなく、その手前のミラー面付近にズレてしまい損傷閾値以上のパワーのレーザーがミラー面に照射され破損したと考えられる。

ミラーは特注品であり作製にはかなりの時間を要するため、ミラー破損により本プロジェクトの期間内での試作装置を用いたこれ以上の検証、実験が不可能となった。

しかし、ミラー破損前には出力を抑えた状態で加工と同時に検査・計測が可能なことを確認している。このため、破損したミラーを修復し、加工用レーザーの焦点位置を調整すれば一体化装置は完成する見通しはついている。

## 第3章 全体総括

### 3-1 研究開発の成果

各研究目標に対しての達成状況は以下の通り。

[1] 加工現象の解明：曲面において加工時に発生する加工飛散物及びプラズマを高速度カメラを用いて画像化に成功した。また、プラズマに含まれる波長成分の計測を行い、プラズマの特性の数値化を実現した。これらの結果より加工時に発生する加工飛散物及びプラズマの計測・欠陥検査に対する影響は小さいことが確認でき、さらにエアジェットを用いることで更に影響を小さくできることも確認できた。

[2] 一体化装置の開発：これまでの様々な検証結果を踏まえ、一体化装置の設計を行い、実際に組み立て、動作検証を実施し、加工・計測・欠陥検査を同時に実施することが確認できた。

[3] 装置利用技術の確立：溶射エンジンにおける溶射膜にかかる荷重方向を考慮したせん断方式による溶射膜剥離強度評価方法を確立した。また、溶射前処理として従来技術である機械加工での溝加工と比較して溶射膜剥離強度3倍以上となるレーザによる加工形状を見出すことができた。

### 3-2 課題及び今後の解決策

#### 【一体化装置最終化】

一体化装置のミラーが破損したため計画していた検証を全ては実施できなかった。まずは破損した原因と考えられる加工レーザの焦点位置のずれをプロファイラで検証できるよう装置を改造し測定を行う。その上で加工と同時に欠陥検査、寸法計測をする上での課題にその都度対応し最終化を図る。

#### 【溶射膜の剥離強度評価方法】

従来用いられてきた評価方法と異なるためアドバイザーや川下企業と協議の上、評価方法をチューニングしていく必要がある。新たな評価基準を設けるためにはN増し評価をすることも必要となるためアドバイザーや川下企業と協力の上、検証を進めていく。