

# パルスファイバレーザ加工による溶射皮膜のはく離強度の最適化

福山大学 機械システム工学科  
教授 加藤 昌彦  
(2019 年度 一般研究開発助成 AF-2019216-B3)

キーワード：パルスファイバレーザ，溶射エンジン，はく離強度評価

## 1. 研究の目的と背景

自動車エンジンでは、軽量化のためアルミニウム化が主流となっているが、ピストン摺動部は鋳鉄製ライナが埋込まれている。しかし、鋳鉄製ライナは重く、また厚さがあるので冷却性にも劣り、自動車メーカーで取り組まれているエンジンのダウンサイジング化、軽量化のネックとなっている。

この問題を解決するため、鋳鉄製ライナをなくしたエンジンの開発が検討されており、溶射により薄膜をシリンダ表面に吹き付けることが検討されている。しかし、溶射膜をアルミニウムに直接吹付けたのでは溶射膜がはく離するので、ブラストによる界面粗面化処理が行われる。しかしこれには、①前処理品質（ブラストの不均一、ブラストメディアの基材埋没、表面硬化割れ）、②界面凹凸形状の自由度が低さ、および制御性が低いことによるはく離強度の低さおよびばらつき、③環境負荷（砂や粉塵の飛散、廃棄メディアの大量発生）がある。これら問題を解決するため、パルスファイバレーザによる界面の粗面化を検討する。パルスファイバレーザ処理では、上記①、③の問題は生じない。また、②に関しても、レーザを用いることにより制御性よく界面凹凸を作成できるので、はく離強度を向上させ、かつばらつきを低下させる可能性が高い。

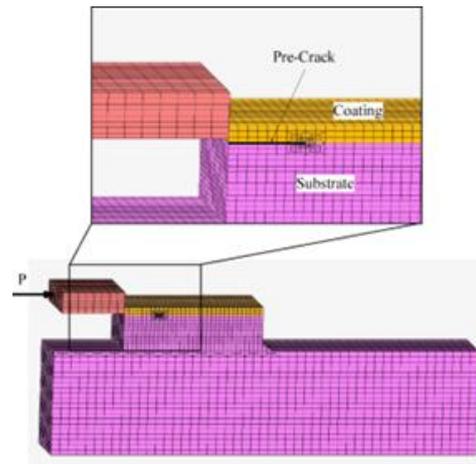
一方、溶射エンジンは、円筒内面に溶射されるので、このような用途に適したはく離強度評価法を用いる必要がある。溶射皮膜のはく離強度評価法は各種提案されているが<sup>1)5)</sup>、本研究目的に適した方法はないようである。

そこで本研究では、パルスファイバによる前処理方法の検討および、溶射皮膜の最適なはく離強度評価法の検討を行った。

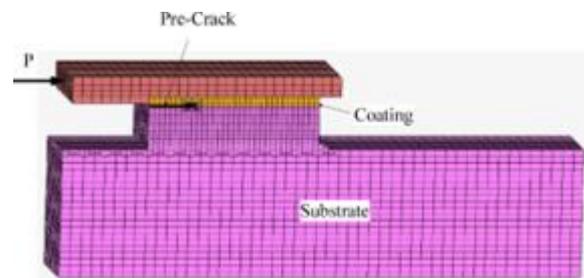
## 2. 有限要素解析

はく離強度評価法検討のため、3次元弾塑性有限要素解析(FEM, MARC2016 エムエスシーソフトウェア(株)製)を行った。解析に用いたモデルを図1(a)および(b)に示す。モデルは六面体8要素で作製した。皮膜は鉄系粉末XPT512とし、ヤング率は後述の引張試験により測定した750GPaとした。基材は鋳造用アルミニウム合金(ADC11)とし、塑性域を直線硬化材で近似した。ヤング率、塑性係数および降伏応力は、文献値より、それぞれ71GPa、4.57GPa、150MPaとした。皮膜と基材界面には長さaのき裂を導入した。パンチは超硬合金(ヤング率570GPa)とした。幅b=1mmとし、長さl=2mm、膜厚B<sub>1</sub>=115μm、

基材厚さB<sub>2</sub>=2mmとした。パンチは六面体のパンチAおよび、皮膜上面に接するように延長したパンチBの2種類とし、それらを左側から変位制御で押込んだ。



(a) パンチ A



(b) パンチ B

図1 有限要素解析モデル

き裂先端のエネルギー解放率GをVCCM法(virtual crack closure method)を用いて求めた<sup>5)</sup>。エネルギー解放率はき裂開口に要するエネルギーより求まるので、き裂先端開口側の2節点変位と、それらの節点力と等価な節点力として、き裂先端およびその一つ前方の節点力から求めることができる。

## 3. 有限要素解析結果

押込み荷重P=50Nにおける、ノッチ長さaと、せん断エネルギー開放率G<sub>2</sub>を全エネルギー開放率Gで除した無次元化せん断エネルギー開放率の関係を図2に示す。無次元化せん断エネルギー開放率はパンチBの方が高い。

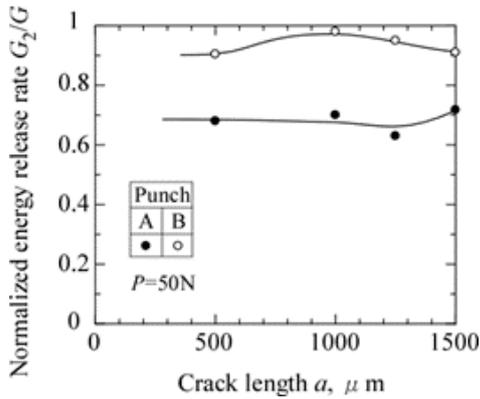


図2 ノッチ長さと同次元化せん断エネルギー解放率

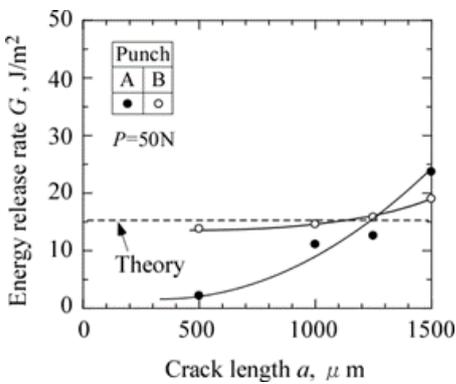


図3 ノッチ長さと同次元化エネルギー解放率

ノッチ長さ  $a$  と全エネルギー解放率  $G$  の関係を図3に示す。パンチ A はノッチ長さ依存性を示すことがわかる。このように、パンチ B の方が適切であることが分かったので、パンチ B で試験機を作成した。

#### 4. 実験方法

##### 4.1 試験片

基材には自動車エンジンに使用される鋳造用アルミニウム合金を使用した。表面仕上げしたのち条件を種々に変えたレーザー加工を行った後、WC-Co および  $\text{Cr}_2\text{C}_3$  粉末を大気圧プラズマ溶射により、所定の厚さ  $B_1$  になるように成膜した。これを所定の幅  $b$  にレーザー加工した。

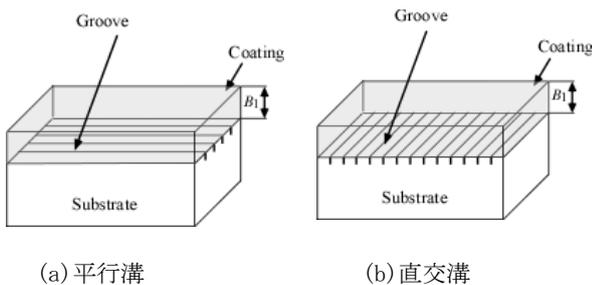


図4 試験片

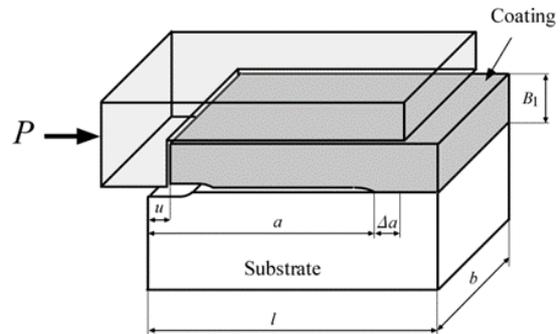
模式的に図 4(a)および(b)に示す。はく離荷重負荷方向に対する溝の方向により、(a)平行溝、および(b)直交溝と定義する

##### 4.2 はく離強度評価試験

はく離強度評価のため、図 5(a)および(b)に示す、水平押し込み試験機を自作した。



(a) 試験機の外観



(b) 模式図

図5 水平押し込み試験機

界面に長さ  $a$  のノッチを導入して幅  $b$  の試験片の皮膜部分に水平方向にアクチュエータにより荷重  $P$  を徐々に負荷して皮膜をはく離させた。押し込み治具は皮膜上面の変形を抑制する構造である。

皮膜の界面破壊じん性値  $G_C$  は、導出した以下の式で求めた。

$$G_C = \frac{P_a^2}{2b^2B_1E_1} \quad (1)$$

ここで、 $P_a$  ははく離荷重である。

#### 5. 実験結果及び考察

##### 5.1 はく離強度評価

直交溝試験片に水平押し込み試験を行い、式(1)より求めた無次元化界面破壊じん性値  $G_C$  を、レーザー溝幅をピッチで除した値  $w/p$  で整理して図 6 に示す。なお、計算に際して、WC-Co および  $\text{Cr}_2\text{C}_3$  皮膜の弾性係数  $E_1$  は  $750\text{GPa}$  および  $550\text{GPa}$  を用いた。

直交では、 $w/p$  の増加とともに界面破壊じん性値が増加し、ある値で最大となる。

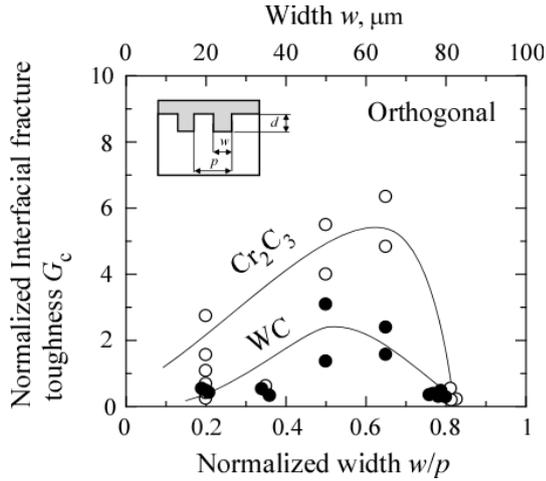
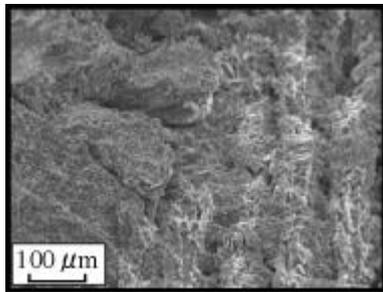
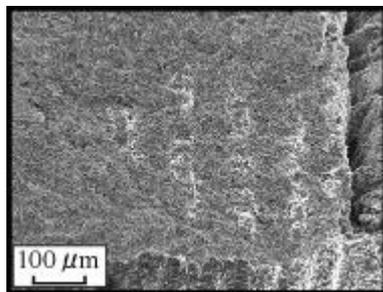


図6 レーザ溝幅と界面破壊じん性値の関係(直交溝)

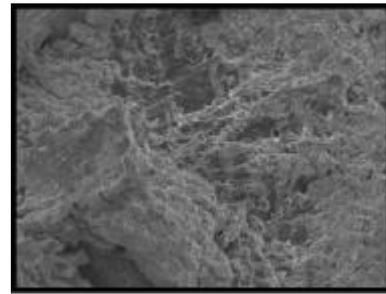
はく離面の操作型電子顕微鏡写真を図7に示す.  $w/p$  が0.2と小さい場合, 上部ではく離している. 一方,  $w/p$  が0.8と大きいと, 基材ではく離している. 図8に模式的に示した図で説明すると,  $w/p$  が小さな(a)では interface1 ではく離が生じ,  $w/p$  が過大な(c)では interface2 ではく離が生じている. 破壊じん性値の最大が得られるのは, interface1 と interface2 の界面強度が同等となる場合であると考えられ, それが最適値となる.



(a)  $w/p=0.2$



(b)  $w/p=0.5$



(c)  $w/p=0.8$

図7 はく離面(直交溝)

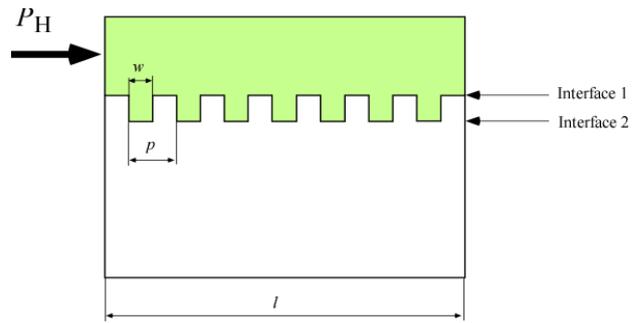


図8 はく離面の模式図

次に, 平行溝の結果を図9に示す平行溝では,  $w/p$  の増加とともにわずかに増加する. しかし, 最大値は直交溝の方が高いことがわかる.

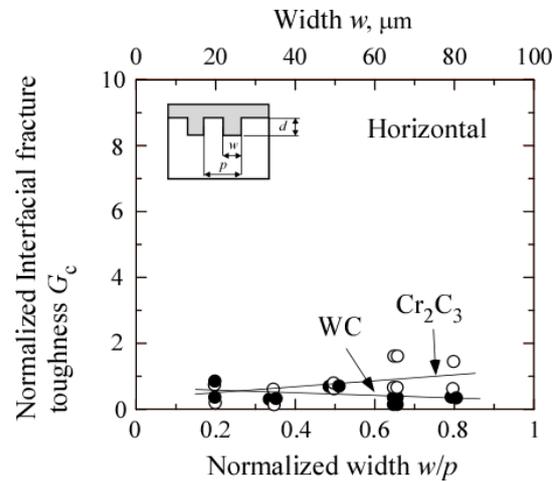


図9 レーザ溝幅と界面破壊じん性値の関係(平行溝)

## 6. 結言

溶射エンジン用界面制御技術として, レーザ加工の最適化およびはく離強度の開発を行った. 得られた結論は以下のとおりである.

- 1 有限要素解析の結果, 皮膜に水平に押込む方法を, 皮膜が開かないように変形抑制機構を設けると, 安定した破壊じん性値が得られる.

- 2) 解析をもとに試験機を作成し、実験を行ったところ、界面で皮膜はくが確認された。
- 3) レーザ加工溝のはく離強度を評価したところ、レーザ加工溝の異方性が認められ、直交方向で高い強度が得られた。また、最適な溝の寸法があることも分かった。
- 3) 加藤 昌彦, 中佐 啓治郎, 章 博, 秋竹 教行, エッジインデント試験による 8mass%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>・ZrO<sub>2</sub> 遮熱溶射皮膜の高温はく離強度評価, 材料, vol. 55, pp. 860-867 (2006)
- 4) Masahiko Kato, Mahmoud Nazul, Takeshi Itti, Hiroyuki Akebono, Atsushi Sugeta and Eiji Mitani, Effects of coating thickness and interfacial roughness on cracking and delamination strength of WC-Co coating measured by ring compression test, Materials Science and Engineering, vol. 61, 012024 (online) (2014)

### 謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団の援助を得て実施した。記して謝意を示す。

### 参考文献

- 1) 中佐啓治郎, 加藤昌彦, 張 東坤, 田坂圭一郎, エッジインデンテーション法による溶射皮膜のはく離強度評価, 材料, vol. 47, pp. 413-419 (1998)
- 2) 加藤昌彦, 張 東坤, 中佐啓治郎, 曲げ荷重を受ける WC-Co 溶射皮膜の割れおよびはく離過程の解析, 材料, vol. 48, pp. 629-635 (1999)
- 5) 特許第 5709051 号, 皮膜の剥離強度評価方法及び評価装置
- 6) E.F. Rybicki and M.F. Kanninen, "A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral, Engineering Fracture Mechanics", Vol. 9, No. 4 (1977), pp. 931-938