

# 水平押込み法による基材に溝加工を施した Fe 溶射膜のはく離強度評価

加藤 昌彦\*

Evaluation of Delamination Strength of Thermally Sprayed Coating Deposited on  
Grooved Substrate by Horizontal Loading Method

Masahiko KATO

## ABSTRACT

Interfacial fracture toughness of Fe coated aluminum alloy, which was developed for thermal spraying engines, was evaluated by a horizontal loading method. Horizontal or orthogonal groove was machined at an interface followed by Fe coating with various conditions to search the optimum shape of the laser groove. The result showed that delamination occurred at an interface, and the interfacial fracture toughness increased with increasing the groove density. However, the interfacial fracture toughness decreased with further increase of the groove density for the orthogonal groove due to the deformation of the groove wall. The interfacial fracture toughness with orthogonal groove was higher than that with horizontal groove.

キーワード：皮膜，せん断はく離強度，破壊靱性値，溶射

**Keywords:** Coating, Shear Delamination Strength, Fracture Toughness, Thermal Spraying

## 1. 緒言

自動車エンジンでは燃費の向上，CO<sub>2</sub>排出削減が重要な課題となっている．そのためには車体の軽量化が

有効であるのでアルミニウム合金が多く用いられるようになっている[1, 2]．自動車を構成する部品の中で重量割合が大きなエンジンへもアルミニウム合金の使用がすすんでいる．しかし，アルミニウム合金は

軟質であるので、ピストンがしゅう動するシリンダーをアルミニウム合金のままで使用すると、硬質なピストンリングにより摩耗が進行するので、シリンダーには鉄のスリーブが設けられている。しかし、鉄のスリーブは1mm以上と厚いので、重量増加の原因になる。さらに、ピストン間隔を縮めることの障害となるので、エンジンが大型化して重量増に結びつく。そのため、鉄を溶射により200~300 $\mu$ mの厚さに抑え軽量化をはかる溶射エンジンの開発が進んでいる。溶射とは、熔融状態の金属、セラミックスを吹き付けて表面をコーティングする技術であり、耐熱性、耐摩耗性を改善させる手段として広く用いられる[3]。しかし、溶射は異材を吹き付ける方法であるので、界面での応力が生じ、はく離が問題となる。

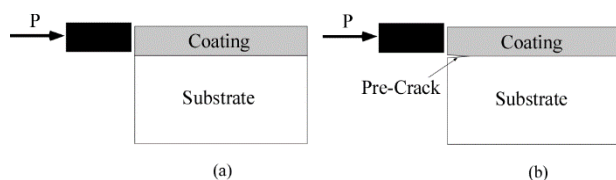


図1 一般的なせん断試験法. (a)予き裂あり, (b)予き裂なし

Fig.1 Conventional shear test method. (a)without pre-crack (b)with pre-crack.

これら皮膜のはく離はせん断荷重により生じる。せん断はく離強度評価法は多くあるが、この用途に適用可能なはく離強度評価法はないようである[4-8]。一般的な評価法は図1(a)に示す方法である。この方法で試験して得られた破面を図2(a)に示す。界面強度が高い皮膜の場合、界面ではく離しない場合がある。図1(b)のように、界面に予き裂を導入すると、図2(b)のように、界面ではく離する。しかしながら、押込みによりき裂は開口してゆき、せん断はく離強度が得ることが難しくなる。

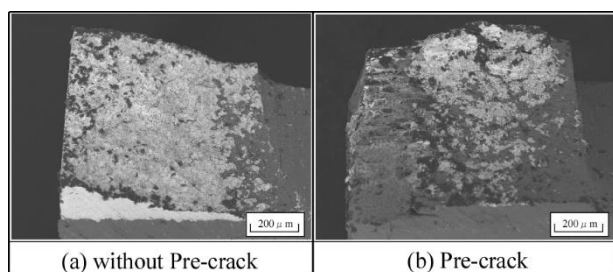


図2 一般的なせん断試験法によるはく離の様子. (a)予き裂あり, (b)予き裂なし

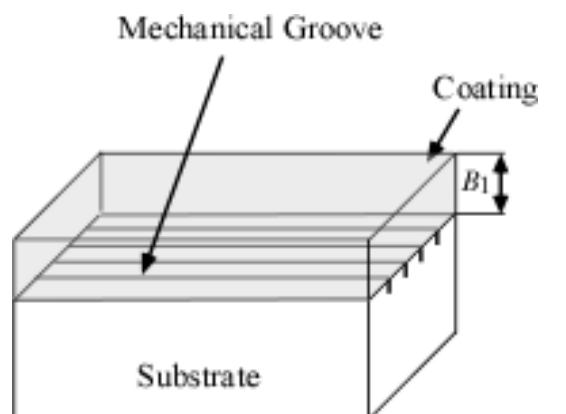
Fig.2 Delamination surface by conventional shear test method. (a)without pre-crack (b)with pre-crack.

著者らはこれまでに、溶射エンジン用皮膜のはく離強度評価に適用可能なせん断押し込みによる皮膜はく離強度評価法を新たに提案し、Fe膜のはく離強度評価を行い、有効性を確認した[4]。

そこで本研究では、昨年度に引き続き[4]、界面溝の条件を種々に変えた試験片のはく離強度を評価した結果を報告する。

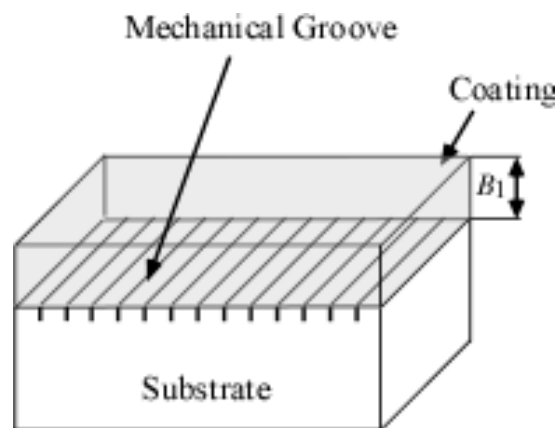
## 2. 実験方法

### 2. 1 試験片



(a) 並行溝

(a) Parallel groove



(b) 直行溝

(b) Orthogonal groove

図3 試験片.

Fig.3 Specimen.

基材には昨年度と同様、表面仕上げされた鋳造用アルミニウム合金を使用した[4]。基材表面に機械加工により溝を設けたのち、粒径71 $\mu$ mの鉄系粉末XPT512(化学組成, C:1.18, Mn1.40, Cr:1.48, Si:<0.001, Fe:bal.)

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ものが、供試材として共同研究先より提供された。これを所定の幅  $b$  にレーザ加工した。試験片を模式的に図 3(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。

## 2. 2口はく離強度評価試験

はく離強度評価には、図 4 に示す、自作の水平押込み試験機を使用した。



図 4 水平押込み試験機。

Fig.4 Horizontal loading machine.

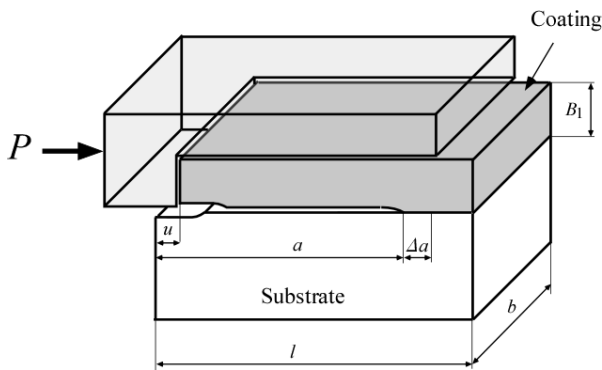


図 5 水平押込み試験の模式図。

Fig.5 Schematic illustration of horizontal loading method.

図 5 に模式図を示す通り、界面にレーザにより予き裂を導入した試験片に界面に平行荷重  $P$  を徐々に負荷する。押込み治具は皮膜上面の変形を抑制する構造である。これは、これまでの有限要素解析により、抑制構造がないとモードII比率が増加することを明らかにしており、モードII変形を実現させるために、設けている。

## 2. 3 界面破壊じん性値評価

皮膜のはく離強度を評価するための界面破壊じん性値を破壊力学的に導くことを検討した[4]。図 4 に示すように、圧子に水平荷重  $P$  により長さ  $a$  の界面き裂が  $\Delta a$  だけ進展するとする。皮膜に塑性変形が生じているとし、塑性変形領域を直線硬化材で近似する。皮膜の弾性係数、降伏応力、塑性係数を、それぞれ  $E_{e1}$ ,  $\sigma_{ys1}$ ,  $E_{p1}$  とする。皮膜内の圧縮ひずみ(厚さおよび幅方向に分布はないとする)を  $\varepsilon$  とすると、皮膜の圧縮応力  $\sigma$  との関係は以下で表される。

$$\sigma = \sigma_{ys1} f\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ys}}\right) = E_{e1} \varepsilon_{ys1} f\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ys}}\right)$$

$$f\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ys}}\right) = (1 - \beta) + \beta \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{ys}}\right)$$

$$\beta = \frac{E_{p1}}{E_{e1}} \quad (1)$$

皮膜に水平方向に加わる力  $P$  によりはく離したときの、界面エネルギー解放率は以下で得られる。

$$G = \frac{P \varepsilon_{ys}}{2 b \beta} \left\{ \frac{P}{b B_1 \sigma_{ys1}} - (1 - \beta) \right\} \quad (2)$$

上式より、界面エネルギー解放率は、き裂長さに依存しないことがわかる。皮膜はく離時の圧子荷重を  $P_d$  とすると、界面破壊じん性値  $G_c$  (界面エネルギー解放率の臨界値)は、上式  $P$  を  $P_d$  に置き換えた以下の式で求まる。

$$G_c = \frac{P_d \varepsilon_{ys}}{2 b \beta} \left\{ \frac{P_d}{b B_1 \sigma_{ys1}} - (1 - \beta) \right\} \quad (3)$$

皮膜が弾性範囲内のときは、 $\beta = 1$  とおけばよく、以下が得られる。

$$G_c = \frac{P_d^2}{2 b^2 B_1 E_1} \quad (4)$$

## 3. 実験結果及び考察

### 3. 1 水平押込み試験

試験片に水平押込み試験を行い、式(4)より求めた界面破壊じん性値  $G_c$  を、レーザ溝密度  $1/p$  (レーザ溝間隔  $p$  の逆数)で整理して図 6 に示す。なお、計算に際して、皮膜の弾性係数  $E_1$  は 36.5GPa を用いた[4]。

平行溝では、レーザ溝密度の増加とともに界面破壊じん性値が増加する。直交溝では、レーザ溝密度が  $0.008\text{mm}^{-1}$  で最大となり、その値は平行溝の最大値よりも 67%ほど大きい。また、参考として、機械溝の結果を推定して四角プロットで示しているが、レーザ溝の方がわずかに高いことがわかる。

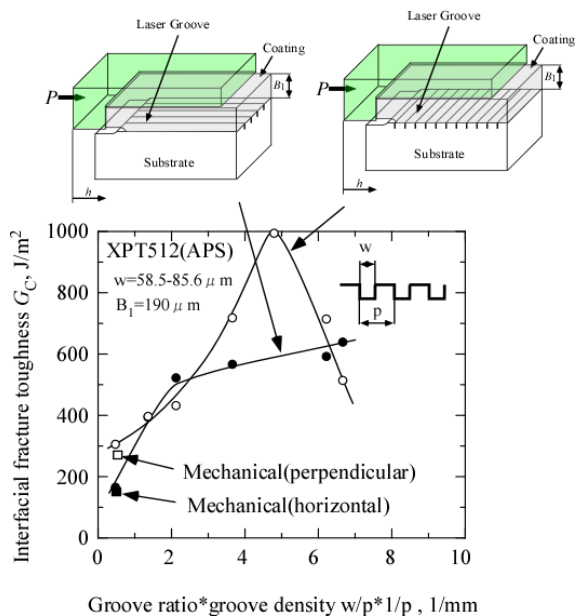


図 6 レーザ溝密度と界面破壊じん性値の関係  
Fig.5 Relationship between laser groove density and interfacial fracture toughness.

## 2. 4 はく離観察

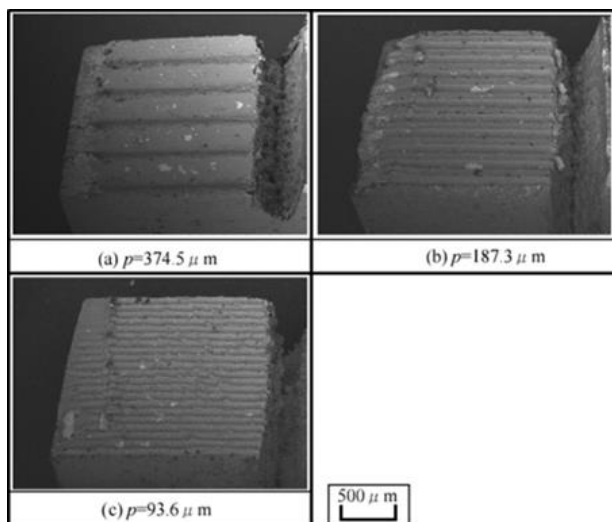


図 7 はく離面(平行溝)  
Fig.7 Delamination surface(horizontal groove).

平行および直交溝試験片の, 水平押込み試験後ののはく離面の様子を図 7 および 9 に示す. いずれも界面ではく離していることがわかる. 平行溝では溝での皮膜の残留はほとんどなく, 溝の凹凸に沿ってはく離しており, アンカー効果等の寄与は認められない. 図 8 に模式的に示す通り, 機械溝(a)では壁面が垂直(長方形

断面)であるので, 壁面は溶射粒子の飛行方向と平行になり, 衝突による密着力向上効果はほとんどない. そのため, 溶射粒子と壁面との密着力はほとんどないと考えられ, 表面積増加効果はわずかと考えられる. 一方, 壁面が垂直でない(半円形断面)レーザ溝は(b), 衝突による密着力向上効果が期待できる長さが増加すると考えられる. そのため, 溝の密度増加に伴いはく離強度が上昇したと考えられる.

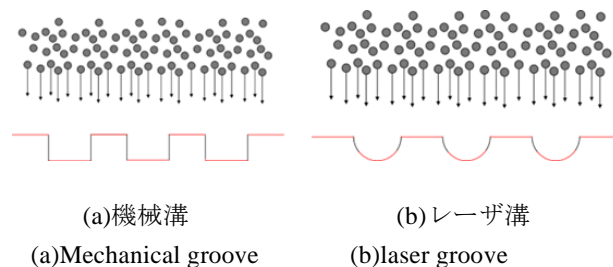


図 8 溶射の模式図

Fig.8 Schematic illustration of thermal spraying.

図 9 に示す直交溝では, 僅かな皮膜の残留が認められる. 密度が最も高い(c)では, はく離による溝間基材の倒れ込みが認められる(矢印).

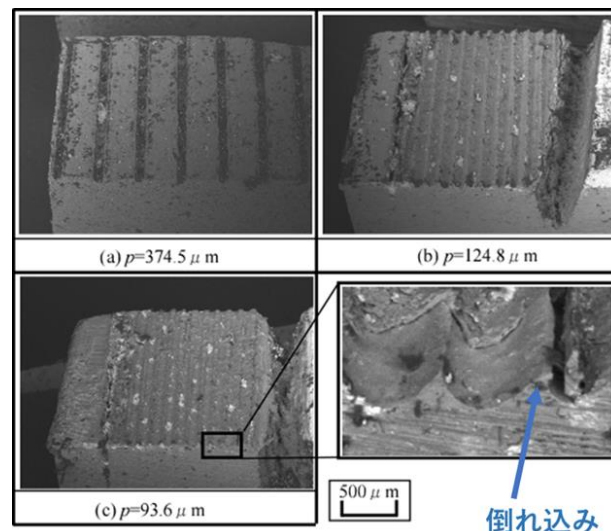


図 9 はく離面(直交溝)  
Fig.9 Delamination surface(orthogonal groove).

図 10 にはく離時の溝の様子を模式的に示す. 溝の形成によるアンカー効が生じ, 溝の本数が増えると, より多くのアンカー効果が期待でき破壊じん性値が最大となったと考えられる. そして, 溝が過密になりすぎると, 溝間の基材が薄くなって倒れるため, はく離強度が低下すると考えられる. また, 溝

の深さが若干浅かったことも理由として考えられる。

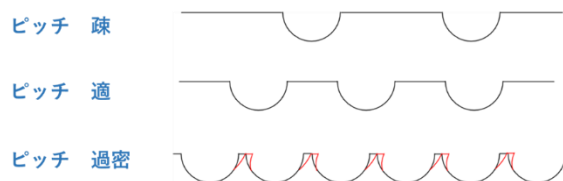


図 10 はく離の模式図

Fig.10 Schematic illustration of delamination.

[4] 加藤昌彦, “水平押込み法による基材に機械加工を施した Fe 溶射膜のはく離強度評価”, 福山大学工学部紀要, 第 46 巻, pp.113-118 (2022).

## 結言

実用に即したはく離強度評価法である水平押込み法を使用し, 溶射エンジンに使用される鉄系溶射膜 (XPT512) のはく離強度を評価した. 以下は本研究で得られた結果である.

- (1) 水平押込み法により, 溶射膜は界面ではく離する.
- (2) 荷重負荷方向に平行な溝を有する試験片の界面破壊じん性値は, 溝密度の増加とともに増加し, 直交な溝のそれは, ある密度で最大となる. 最大となる値は平行溝より直交溝の方が高い.
- (3) 荷重負荷方向に平行な溝を有する試験片のはく離面には皮膜の残留はほとんどなく, 溝に沿ってはく離する. 荷重負荷方向に直交する溝を界面に有する試験片では, 溝に皮膜が一部残留する. このアンカー効果が高い界面破壊じん性値が得られた理由と考えられる.
- (4) 機械溝の界面破壊じん性値と比べると少し高い値が, 壁面の密着力の寄与の分得られる.

## 参考文献

- [1] 牛尾英明, 林直義: 自動車用アルミニウム複合材の開発, 軽金属, Vol.41, No.11, pp.778-786 (1991)
- [2] 長坂秀雄: 金属溶射法を利用したアルミニウムエンジンシリンダ, 金属表面技術 現場パンフレット, Vol.14, No.4, pp.8-11 (1967)
- [3] 蓮井淳, “溶射工学” (1996) 産報出版.

