

アルミナ溶射を施した炭素鋼の回転曲げ疲労破面

高 行男・加藤泰世

1. 緒 言

省資源，省エネルギーの要求に答える一つの有力な方策として表面処理による材料の改質がある。溶射とは熔融あるいはそれに近い性質に加熱した溶射材料を素材面に衝突させて皮膜層を形成する表面処理法の一つである。溶射材料の多様化と品質の改良により，近年溶射技術は多くの分野で実用されている。しかし，溶射部材の実用にあたり重要な疲労強度特性についての報告は数少ない。

本稿では，アルミナ溶射を施した工業用純鉄及び共析鋼の円周切欠き試験片の回転曲げ疲労破面を走査型電子顕微鏡を用いて観察し，母材および溶射膜の破面特性を検討した結果について報告する。

2. 実験方法

供試素材は，工業用純鉄（0.01% C）および共析鋼（0.86% C）である。共析鋼については，まず800℃，1時間の加熱後炉中冷却を行い，図1(a)に示すように，直径12mm，長さ90mmの丸棒中央に半径4mm，深さ2mmの円周切欠き（図1(c)）を導入した試験片を準備した。次に，切欠き部およびその周辺部をアルミナグリッドによるブラスト処理を行った。その後，プラズマ溶射によってニッケル，クロム，アルミニウムを複合した材料を用いて下地処理（アンダーコーティング）を施し，その上に厚さ約0.2mmのアルミナをコーティングした（図1(b)）。下地処理は母材と溶射膜とのなじみ性をはかるためのものである。工業用純鉄については半径2mmの半円切欠きを有する試験片（切欠き底の直径は8mm）を用いた。各試験片に対して小野式回転曲げ試験機（147Nm，3420rpm）を用いて回転曲げ疲労試験を行った。なお，負荷応力としては母材の切欠き底断面の直径から算出される公称応力を用いた。

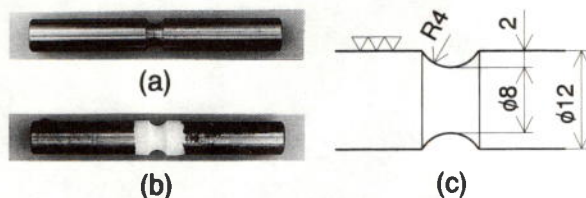


図1 共析鋼を母材とした試験片の形状寸法および概観

(a) 処女材 (b) 溶射材 (c) 切欠き部の詳細

3. 疲労破面の観察結果

3. 1 工業用純鉄を母材とした試験片の疲労破面

本稿では次節に示す共析鋼を母材としたアルミナ溶射材を主として扱うため、ここで示す工業用純鉄を用いた疲労試験は数本しか行っていない。しかし、母材の疲労破面には明確なストライエーションが観察され、き裂が進展する際のき裂進展方向、き裂進展速度および破壊機構を推察するうえで有効である。

図2は、純鉄を母材とした試験片の疲労破面の全景写真であり、母材部分と溶射膜部分は図中に示すとおりである。母材と溶射膜の間には下地処理部が存在するが、その厚さは溶射膜厚さに比べてかなり薄いためにこの写真からは十分な観察ができない。

図2に示した破面にて、中心よりやや左下の箇所(図2中のBC間)から一見放射状に周囲に広がっていく様相が観察される。図3(a)は放射状に広がる領域(図2中に示したAB間)を拡大した写真である。図3(b)は図3(a)中に示したab間を拡大した写真であるが、本節の冒頭で述べたように明確なストライエーションが観察される。図3(c), (d), (e)は、図3(b)中に示したc, d,

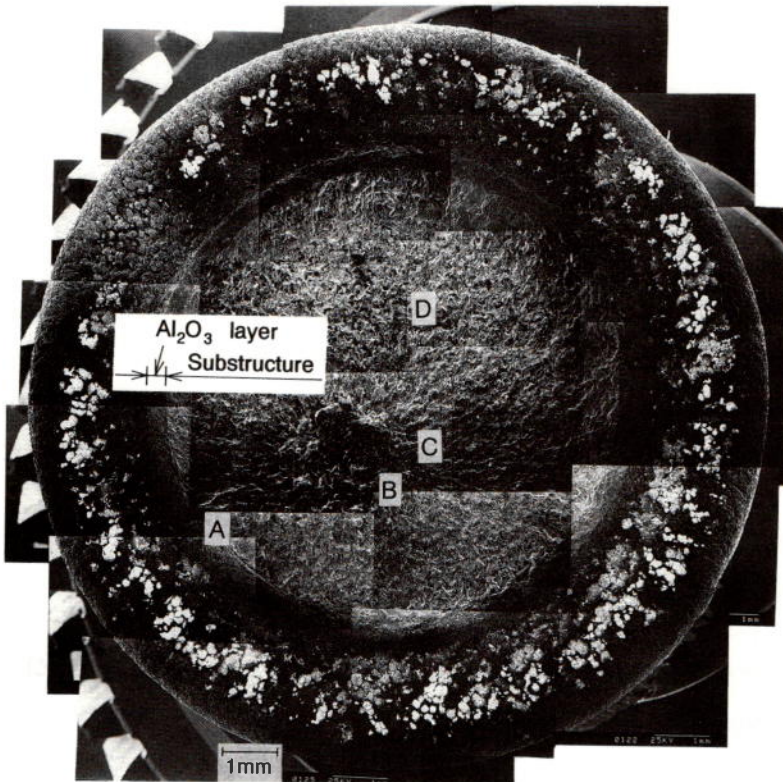


図2 工業用純鉄を母材とした試験片の疲労破面の全景写真 ($\sigma=78\text{MPa}$, $N_f=3.545 \times 10^6$)

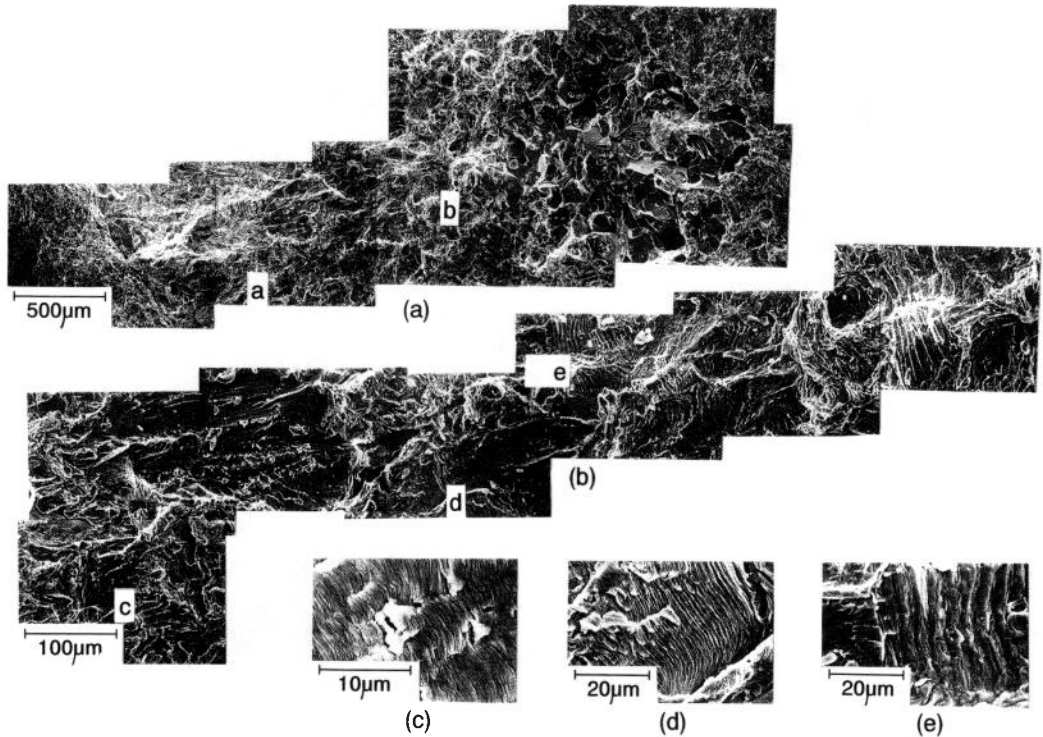


図3 母材（工業用純鉄）の疲労破面

- (a) 図2のA B間の拡大
- (b) 図(a)の a b間の拡大
- (c) 図(b)の c 部付近の拡大
- (d) 図(b)の d 部付近の拡大
- (e) 図(b)の e 部付近の拡大

e部をさらに拡大した写真であり、ストライエーションの間隔が母材の周囲から内部に向かってしだいに広がっていくことが観察される。非結晶学的破壊にてき裂が進展する場合には、破面の平坦な部分にストライエーションが形成され、その間隔は、一回の荷重によるき裂進展量を意味している¹⁾。従って、図2、図3(a)~(e)に示した純鉄の場合は、試験片の周囲から発生したき裂が徐々に内部に同心円状に進展し、中心から少しずれた箇所最終破断部（図2中のBC間）に至ることがわかる。最終破断部には、粒界割れあるいは脆性破壊を起こしたような箇所が観察される。

図4(a)は、最終破断部から上の方（図2中に示したCD間）を拡大した写真である。図4(b)は図4(a)中のf部を拡大した写真であるが、破断部から表面の方に観察していくとストライエーションの間隔が少しずつ細くなっていき、徐々に無特徴な破面も観察されストライエーションの現れる破面率も低くなる。図4(a)中に示したf部よりさらに上の方に向かって観察していくと図4(c)（図4(a)中のg部の拡大写真）にみられるような平坦な様相を呈する破面が所々に現れるが、

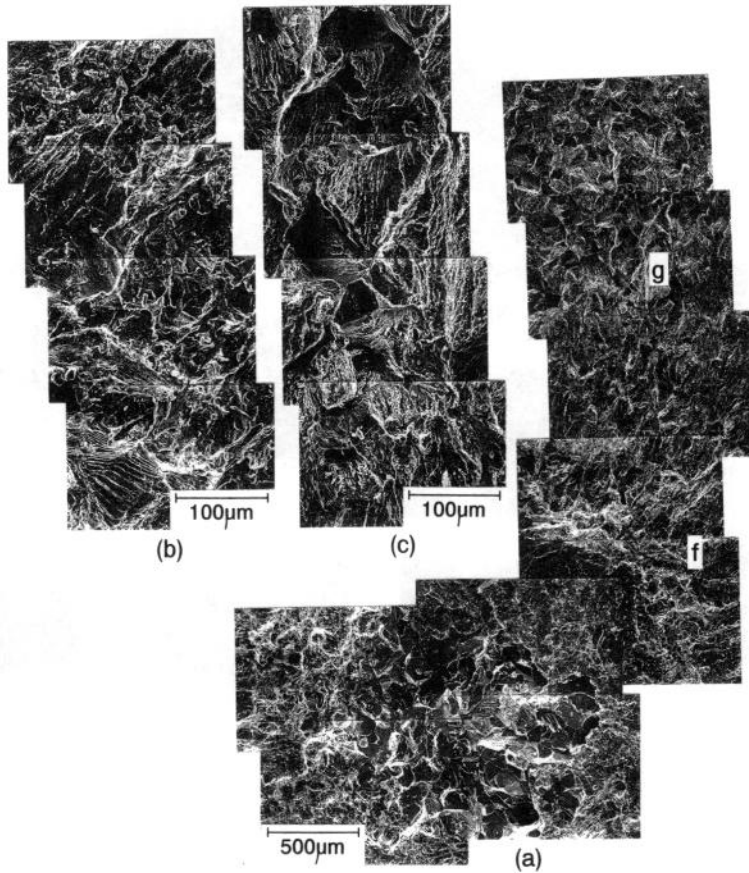


図4 母材（工業用純鉄）の疲労破面

(a)図2のCD間の拡大

(b)図(a)のf部付近の拡大

(c)図(a)のg部付近の拡大

試験片の表面付近になるとこの平坦な様相は観察されない。次節に示す共析鋼の破面では、工業用純鉄で現れたストライエーションは観察されなかったが、図4(c)で示したような平坦な様相を呈する破面が所々に観察され、これよりき裂進展方向を検討した。

3. 2 共析鋼を母材とした試験片の疲労破面

3. 2. 1 母材の疲労破面特性

図5、図6は、共析鋼を母材とした疲労破面を観察した例である。供試材のkneeは繰返し数が 10^7 回以内に存在し、疲労限度は220MPa程度であった。図5は比較的短寿命で破断した破面であり、図6は比較的長寿命で破断した破面の例である。短寿命で破断した疲労破面を見ると、試験片表面の多数点から発生したき裂が徐々に内部に進展し、それらが合体して破断に至ったことが観察される。一方、長寿命で破断した破面からはき裂の合体した様子は観察されず、試験片表

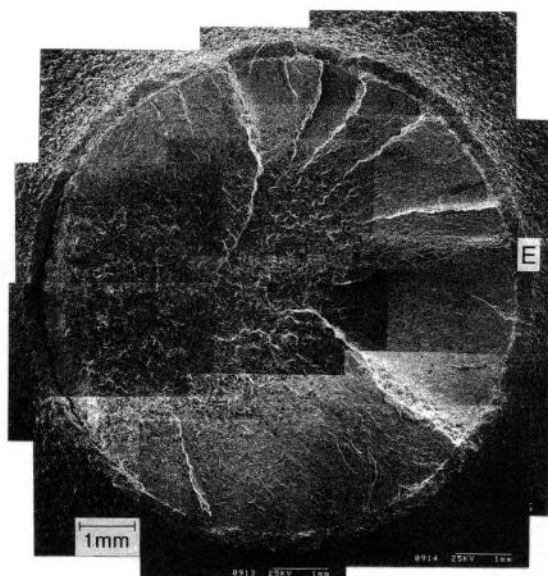


図5 共析鋼を母材とした試験片の疲労破面の全景 ($\sigma=312\text{MPa}$, $N_f=1.236\times 10^5$)

面の一点で発生したき裂が徐々に内部に進展しき裂が発生した箇所と反対側の表面にて破断に至ったことが観察される。

図7(a)は、図5中の破壊発生源の一つ(E部)を拡大した写真であり、図7(b)はさらにそれを拡大した写真である。また図8(a)は、図6の破壊起点付近(F部)から内部方向を拡大した写真であるが、き裂の進展に伴って所々に平坦な様相が、工業用純鉄の場合と同様に観察される。

3. 2. 2 アルミナ溶射膜の破面特性

図8(b)はアルミナ溶射部(図8(a)中のh部)を高倍率で観察した破面写真である。細長い結晶粒が至るところで観察され、溶射材の疲労破面は粒界割れが支配的であることがわかる。細長い結晶粒は、球状のアルミナ粒子を溶射する際、母材に衝突したときに円板状に変形した個々の粒子が一結晶粒を成すためである。

母材の疲労破面については、前節で示した工業用純鉄の場合も本節で示した共析鋼の場合も、き裂の発生箇所、き裂の進展方向及び最終破断の箇所を推察することができるが、アルミナ溶射部についてはこのようなき裂進展特性の考察は困難である。一般に、セラミックス材料の疲労破面については、窒化ケイ素の場合は凹凸の激しさの変化が破面に現れ、破裂発生源付近は比較的平坦なミラー状領域となることからき裂の進展方向を判断することが可能である²⁾。アルミナについてはミラー状の出現は、粒径によるものと考えられ、粒径が数 μm 以上になるとミラー状領域が現れないので破壊進展挙動の把握は容易ではない³⁾。アルミナにおいて材料の焼成過程で残存する気孔をき裂が進展する際に形成されるポアーテイルからき裂の進展方向を知ることができる⁴⁾。そこで、溶射部を詳細に検討したが、図8に示したような溶射を施した場合の疲労破面は平

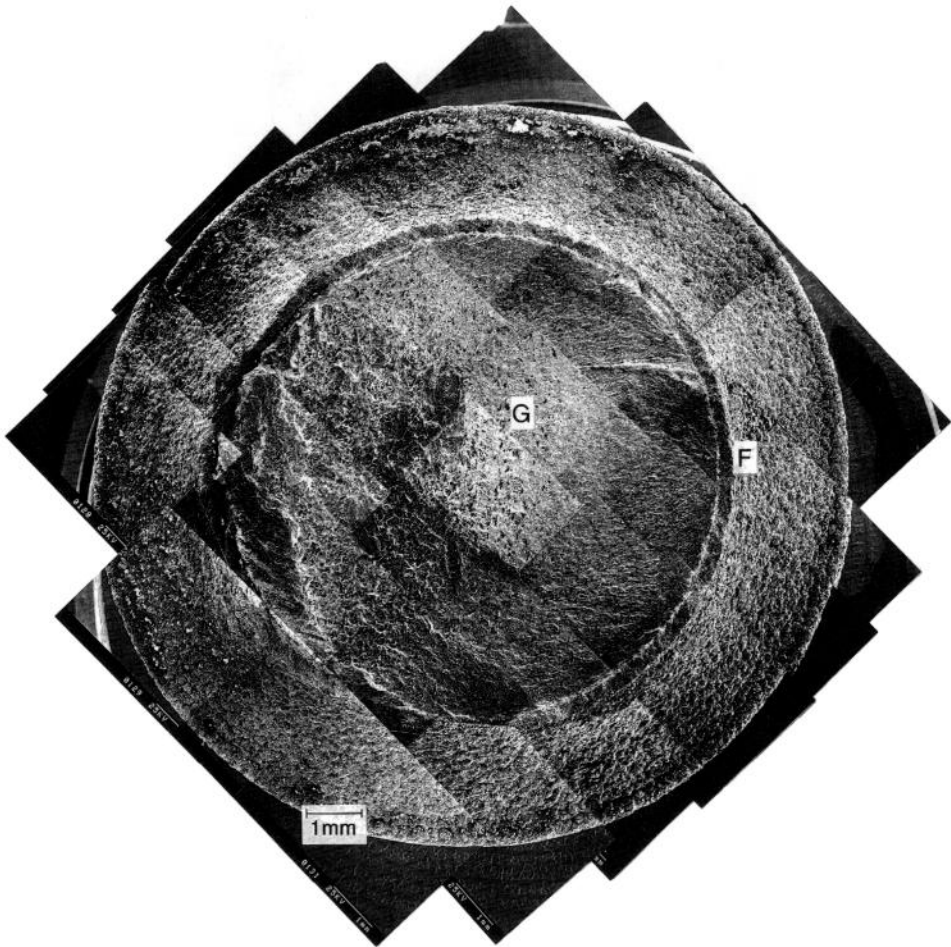


図6 共析鋼を母材とした試験片の疲労破面の全景 ($\sigma=282\text{MPa}$, $N_f=2.087 \times 10^5$)

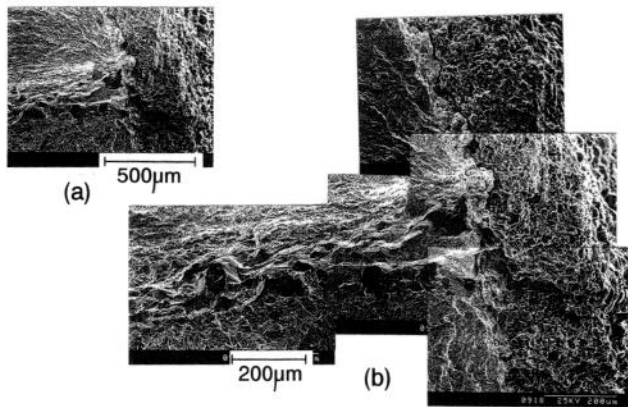


図7 破壊発生源付近の母材（共析鋼）の様相

(a)図5のE部付近の拡大 (b)図(a)の拡大

均結晶粒径が小さく、また粒界割れによるき裂の進展が支配的となるために、破面に観察されたポアテイルの数が少なく、き裂進展特性について把握するのは容易ではなかった。

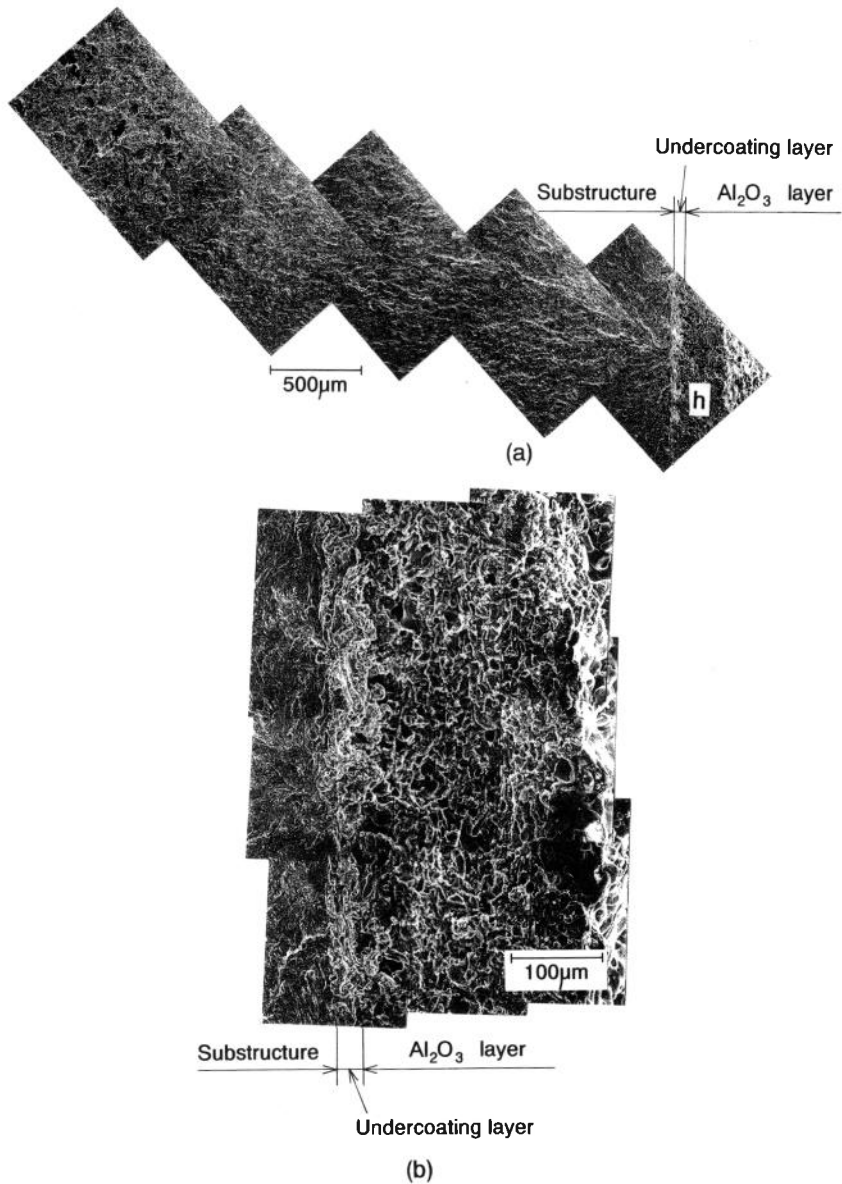


図8 破壊発生源付近の母材（共析鋼）および溶射膜の様相
(a)図6のF G間の拡大 (b)図(a)のh部分付近の拡大

4. 結 言

本稿では、工業用純鉄および共析鋼を母材としたアルミナ溶射材の回転曲げ疲労試験による疲労破面の数例を示し、母材および溶射材の疲労き裂進展特性について検討した。工業用純鉄については疲労破面としては典型的なストライエーションが観察されたことから溶射材の母材のき裂進展特性が容易に把握でき、共析鋼についてはストライエーションが現れないが母材の破壊発生源やき裂進展方向を推察することは可能である。しかし、アルミナ溶射部のき裂進展特性については、結晶粒が小さく粒界割れによるき裂進展が支配的であることは確認できるが、破壊発生源やき裂進展方向を破面観察から断定することは困難である。

参 考 文 献

- 1) たとえば 小寺沢良一ほか：フラクトグラフィとその応用，日刊工業新聞社，(1981年)。
- 2) 高 行男：常圧焼結窒化ケイ素の回転曲げ疲労破面におけるミラー状領域，セラミックス協会学術論文誌，95，534 (1986年)。
- 3) 高 行男：常圧焼結アルミナ平滑材の回転曲げ疲労挙動に及ぼす粒径の影響，材料，42，1207 (1993年)。
- 4) 高 行男・上野 明：常圧焼結アルミナの疲労破面における気孔の航跡，日本機械学会第69期講演論文集，No.944-1，87(1994年)。