

構造物、装置等の破損部分から何が分かるか

—破面観察事例—

機械構造物に破損事故が生じた場合、その原因を明らかにすることは再発を防止するうえで大切なことである。金属材料においては、破壊様式の相違によってそれぞれの特徴ある破面形態を示すことが多く、破面の模様を詳細に観察することによって、破壊に至った条件や原因を推定することができる。

破面解析法（フラクトグラフィ）は破面を観察することにより、破壊に関する有効な情報を得ようとするものであり、目視や光学顕微鏡によるマクロ破面解析法と電子顕微鏡によるマイクロ破面解析法がある。マクロ破面解析法は破面解析の第一歩であるが、観察倍率が低く、詳細な情報を得ることはできないが、逆に観察範囲が広く、破面全体の観察が可能で、起点の位置や亀裂の進行方向や状況を把握できる長所をもっている。さらにマイクロ解析を行うための観察位置決定の前段階としてもマクロ解析は重要である。

電子顕微鏡を用いたマイクロ破面解析は、焦点深度が深く、高倍率、高分解での観察が可能で、破損面における微細なパターンを知ることができ、破壊に関する詳細な情報が得られるところから、現在では破壊の解析に広く利用されている。

ここではマイクロ破面解析の立場から述べる。



破壊の種類

通常の金属材料は微細な結晶粒の集合体で、金属材料が破壊するとき、その経路が結晶粒を貫通する場合（粒内破壊）と結晶粒の境界に沿う場合（粒界破壊）に大別できる。また破壊に際して塑性変形を伴う場合と、ほとんど伴わない場合があ

り、前者を延性破壊といい、後者を脆性破壊と呼んでいる。そのほかに、繰返し応力による疲労破壊がある。疲労破壊は巨視的には脆性破壊であるが、微視的には延性破壊の場合と脆性破壊の場合がある。

A-1

過大負荷による破壊

延性のある金属材料が過大な荷重を受けて破壊した破面上には、写真1に示すようにディンプル（dimple）と呼ばれるくぼみが多く観察される。これは微視的には粒内破壊で第1図のように塑性変形の進行にともない、析出物、介在物が核となって多数の微小空洞が生成し、これが成長、合体連結した結果生じた延性破壊である。ディンプルの形状は合体連結時の局所的な変形の状態によって異なり、均一応力の場合、ほぼ円形状の等軸ディンプルとなるが、せん断、引裂きの場合には、放射線状の伸長ディンプルとなる。このようにディンプルによる破壊は延性のある材料が過大な応力を受けて破壊したことを示している。

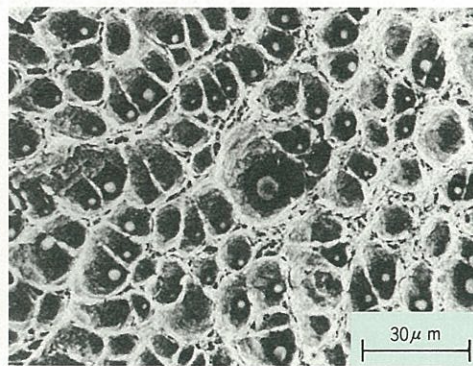
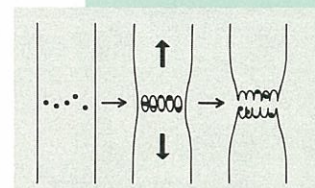


写真1 炭素鋼のディンプル



第1図 ディンプルの生成モデル

A-2

切欠をもつろい材料の破壊

一般の鉄鋼材料やチタンなどは、その材料の延性—脆性遷移温度（破壊の様式が延性から脆性に変わる温度）より低い温度で、切欠のついた状態で試験をすると、へき開面と呼ばれる特定の結晶

面で分離破壊（粒内破壊）する。これはほとんど塑性変形を伴わない脆性破壊で、オーステナイト系ステンレス鋼やアルミニウム、銅などの金属では起こらない。写真2にへき開破面を示す。破面

A-3

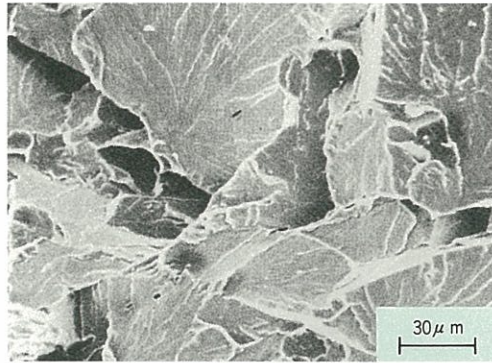


写真2 ヘき開破面

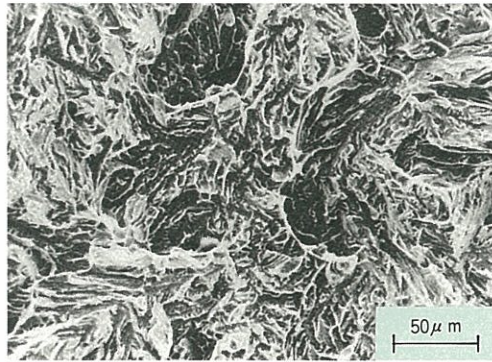


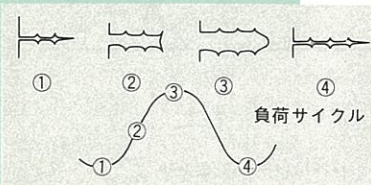
写真3 焼入焼もどし鋼の擬へき開破面

は微小なへき開ファセット (facet) からなり、多くの場合、破壊は一つのへき開面では起こらずいくつかのへき開面にまたがるので、ファセットの表面には亀裂伝播方向に沿って段ができ、亀裂の伝播につれてこれらが合流して川状の模様 (リバーパターン) を形成する。したがって、これから亀裂の伝播方向を知ることができる。へき開破壊に費やされるエネルギーは、リバーパターンの生成よりも進展してきた亀裂が結晶粒界などでとめられ、新たにへき開亀裂を生成するために費やされるほうが大きい。へき開破壊は負荷温度が相対的に延性-脆性遷移温度より低い場合に起こる。へき開ファセットの大きさは延性-脆性遷移温度の高低と相関があり、小さい方が遷移温度は低いのでへき開破壊を防ぐためには形状的に切欠を除去するほかに材料的にはファセットを小さくするのが望ましく、結晶粒や組織を微細にする必要がある。

焼入焼もどし鋼の脆性破壊時に現われる破面はファセットよりなり、リバーパターンなどのへき開破面の特徴をそなえている。写真3にその例を示す。当初へき開面での破壊かどうか明らかでなかったので擬へき開破面と名づけられたが、現在では、へき開面での破壊であることが知られており、本質的にはへき開破壊である。

A-4

繰返し荷重による破壊



第2図 ストライエーションの生成機構

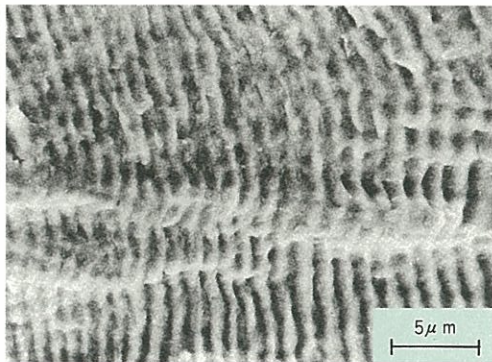


写真4 ステンレス鋼の疲労破壊にあらわれたストライエーション

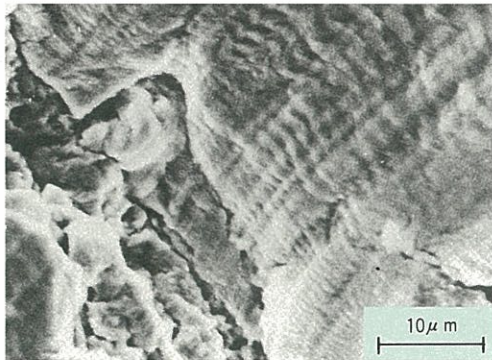


写真5 低炭素鋼の疲労破面 (タイヤ・トラック)

機械構造物に繰返し荷重が加えられると、材料は疲労し、破壊することがあるが、この疲労破壊は、延性材料でも巨視的には平坦な脆性破面を示し塑性変形は認められない。延性材の疲労亀裂は通常材料表面から発生し、すべり面 (引張応力方向に対して約45°) に沿って亀裂が少し伝播後、引張応力に垂直に向きを変えて伝播することが多い。すべり面に沿う亀裂の伝播を第1段階、引張応力に垂直な亀裂の伝播を第2段階と呼んでいるが、第1段階は通常1結晶粒程度の長さで破面は無特徴であることが多い。第2段階の破面は電子顕微鏡によると写真4に示すように、ストライエーション (striation) と呼ばれる応力繰返しの各サイクルに対応するしま模様が観察され、その間には微視的に延性の大きい破壊が認められる。

ストライエーションは亀裂伝播方向に沿った帯状部分 (プラトー) の上にあり、亀裂伝播方向に凸のゆるい曲線になっていることが多く、亀裂の伝播方向を知ることができる。またストライエーションの間隔の平均値は巨視的な亀裂伝播速度とほぼ一致し、これから破壊の原因となった繰返し荷重の概略を推定することができる。第2図にス

トライエーション生成機構を示す*。低延性材では、ストライエーションは観察され難く、また局部的に存在するストライエーション間隔は、一般的には巨視的亀裂伝播速度と一致しない。延性材でも亀裂伝播下限界付近の低亀裂伝播速度域では、ストライエーションは現れない。

疲労破面のこの他の特徴的なものとして、タイヤ・トラック (tire track) (写真5) やラブ・マーク (rub mark) (写真6) などがある。タイヤ・トラックは亀裂形成後、対向する両破面が応力の繰返しごとに2次的な力が加わってずれ、一方の破面状の突起物が相手破面に圧痕をつけるため生じたものである。ラブ・マークは破面相互のこ

すり合いにより生じたものである。これらも疲労破壊を示す重要なパターンである。

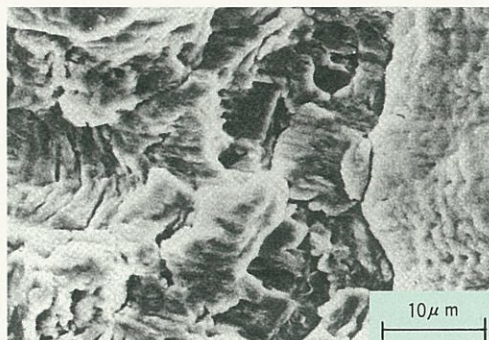


写真6 低炭素鋼の疲労破面 (ラブ・マーク)

*C.Laird et al. ; Philosophical Magazine 17(1962). p847

高温における静荷重による破壊

A-5

金属材料に高温であまり大きくない引張荷重を加えるとゆっくりと伸び、やがて破壊する。この現象はクリープ破壊と呼ばれているが、クリープによる破面を電子顕微鏡で観察すると、写真7に示すように、結晶粒界上に浅いディンプルを伴う破面が認められる。これは高温では結晶粒界上の析出物と金属基質の境界部に亀裂が発生して微小空洞が生成され、それらが合体して破壊 (粒界延性破壊) に至るためである。

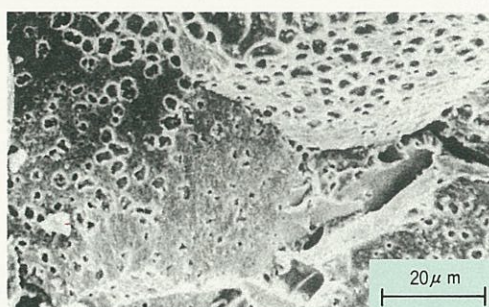


写真7 クロム・モリブデン鋼のクリープ破面

環境その他の影響による脆化した材料の破壊

A-6

金属材料が脆性的に破壊する場合、結晶粒をつらぬくへき開破壊が一般的であるが、水やある種の環境下あるいは金属材料を脆化させる元素が含まれる場合、結晶粒界に沿って脆性的に亀裂が進行して破壊する場合がある。写真8にその例を示す。このような破面は焼もどし脆化、焼割れ、応力腐食割れ、遅れ破壊 (水素脆化割れ) などの場合に認められる。粒界脆性破壊が認められる場合には破面形態のみでその原因を特定することは困難で、環境その他材料を脆化させた要因を追求する必要がある。

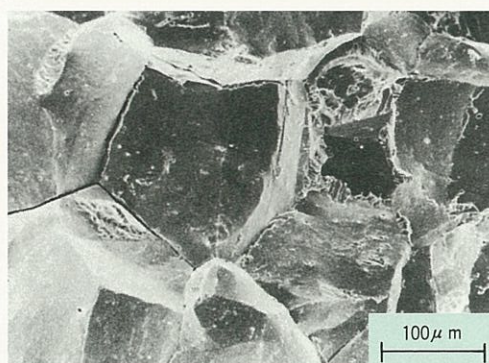


写真8 焼もどし脆化した低合金鋼の粒界破面

各種破壊様式における典型的な微視的破面形態と、その特徴について簡単に述べた。実際の破面上にはこれらが単独あるいは複数混在して現れ、観察位置の設定には注意を要する。特に破損事故調査の場合、誌面の都合上割愛したが、破面の巨視的調査も大切であり、破壊の開始点、亀裂の伝播域などを見極めた後、微視的破面調査を行う必要がある。

電子顕微鏡による破面観察では、極めて限られ

た範囲からのみの情報であるから、できるだけ多数の観察により、全体的な様相の把握に努めることが大切である。

また事故調査の場合、実際に材料が受ける負荷、環境などの条件はきわめて複雑であるので、それらの破壊に影響をおよぼす要因の調査を行って相互に補完しあってこそ、破面解析が破損事故解析の有効な手段となり得る。

[受託研究部 木下 修司]