

## 第1章 1節

# 疲労破面の特徴とその見方

龍谷大学 堀川 武

### 1. はじめに

機械部品や構造部材が使用中に突然に破損、破壊する事故がしばしば報道されている。稼働後の機械や構造物の破損や破壊の原因は多種多様であるが、非常に多くの部分は金属疲労であると言われている<sup>1), 2)</sup>。

金属疲労が原因で破壊した部材の破面には金属疲労の特徴が残されている。破面から得られる情報として、1) 応力の種類、2) 応力の大小、3) 過大荷重か繰り返し荷重か、4) 破壊までの荷重の変動の状況、5) 環境の影響の有無等がある。従って、破損や破壊した部材の保存と切り出しには十分な注意が必要である。

破損や破壊形態は表1に示すように非常に多様であり、それぞれに対応して、特徴のある破面が生じる<sup>2)</sup>。これらの破面をミクロ的、マクロ的に観察して、そこから得られる情報を解析する一連の流れを「フラクトグラフィ」と称している。ここでは表1に示す疲労破壊とそれに関連する破壊に現れる破面の特徴とその見方についてとりまとめた。なお、関連する参考文献の幾つかを示す<sup>3)~9)</sup>。

### 2. 観察方法

破面の観察方法の分類の一つとして、ここではマクロ観察とミクロ観察に分類して説明する。

- ①マクロ観察；肉眼、天眼鏡、実体顕微鏡などを用いて、a) 破壊の起点、b) 破壊の種類、c) 応力の種類等を大局的に観察して、ミクロ観察の場所を特定する為に必要不可欠な観察である。
- ②ミクロ観察；金属顕微鏡、走査型電子顕微鏡（SEM：Scanning Electron Microscope）、レーザー顕微鏡などを用いて破面を高倍率で観察し、破壊形態特有の特徴を明らかにする為の観察である。また、破面に存在する材料欠陥の有無とその成分を分析する、エネルギー分散X線回折法（EDX：Energy Dispersion Diffraction）を用いることにより、破損の原因分析に役立てることができる。
- ③観察の手順；破面の保存には十分な注意が必要である。特に、破面同士を合わせる事は避けなければならない。疲労き裂の発生起点は結晶粒オーダーの大きさであることから、破面を合わ

表1 破損、破壊の分類

分類	破壊形態	備考
荷形式	1) 静的破壊 (単調増加荷重)	引張り試験や部材の最終破断時に見られる。
	2) 衝撃破壊 (衝撃的荷重)	衝撃荷重により材料の脆化が起り易い。
	3) 疲労破壊 (繰り返し荷重)	疲労損傷は繰返し剪断変形による。機械・構造物の破損事故原因の60%以上が疲労。
	4) クリーブ破断 (一定荷重)	材料の溶融温度の約40%以上の温度環境
	5) 遅れ破壊	応力腐食割れ、液体脆化割れ、水素脆化割れ、中性子照射脆化割れ
破断部の塑性変形の難易度	1) 延性破壊	塑性変形を伴う。引張り試験での最終破壊。
	2) 脆性破壊	塑性変形をほとんど伴わない破壊。
破面の形態	1) へき開破壊	垂直力による破壊(雲母の破壊など)
	2) 延性破壊	微小空孔の合体による。ディンプルが特徴。
	3) 剪断破壊	剪断応力によるすべり面分離。
金属組織的	1) 粒内破壊	結晶粒内のすべり変形。き裂が結晶粒内を通る。例) 疲労破壊
	2) 粒界破壊	結晶粒界の弱化による。き裂が結晶粒界を通る。例) クリーブ破壊、応力腐食割れなど。
腐食環境	1) 溶解型破壊	APC (Active Path Cracking)
	2) 水素吸蔵型破壊	HE (Hydrogen Embrittlement)

せる事によりその起点がつぶれ(塑性変形)、疲労き裂発生起点の観察に支障をきたす。例えば、応力腐食割れにより部材表面に結晶粒界割れが発生し、そこから疲労き裂が進展した場合、起点の微小領域の粒界割れの部分がつぶれて観察できないときに、破損の主原因が応力腐食割れであることを見逃してしまう。特に、腐食環境中で疲労破壊した高張力鋼(ボルトねじ部)の場合、疲労き裂発生起点の情報は原因究明に大きな役割を果たす。

破損部分の切り出しにも十分な注意が必要である。切断時の切削剤による腐食やガス切断による焼損などが起きないように注意しなければならない。

なお破断後、時間の経過と共に破面の酸化や汚れが進む。このような時にはアセトンなどの溶剤の中での超音波洗浄、レプリカフィルムによる洗浄などが必要になる。また、破面が錆びている場合には軽い酸洗いをすることもあるが、これにはかなりの熟練を要する。

次に破面のマクロ撮影を実施する。特に疲労き裂発生起点と最終破壊位置の特定、全体の破面に占める疲労破面の割合の把握、ミクロ観察の位置を記録することは必須の作業である。

### 3. 疲労破面の特徴（マクロ観察）

疲労破面は繰り返し応力方向に対して直角に、大きな断面の収縮を伴わないで形成される。図1はボルトのねじ部で疲労破壊した破面の一例である。写真の上部が疲労破面であり、非常に滑らかな様相を呈している。一方、中央部から下部は延性破面であり、疲労き裂が進展して断面積が減少し、外力に耐えられなくなり破壊した破面である。疲労破面と比較して非常に凹凸が激しいことが分かる。

疲労破面が非常に滑らかであるのは、応力の繰り返しに伴い疲労き裂が、主として結晶粒内を少しずつ進展して形成される事に理由がある。疲労き裂の先端では塑性変形を伴っているが、その領域が極微少であることから、マクロ的に観察したときに、延性破面の様な大きな塑性変形の痕跡は残らない。疲労破面には、上記の他に極めて特徴的な破面が現れる。以下に説明する。

①ラチェットマーク；一般的に疲労き裂は部材の表面から発生することが多い。図2は炭素鋼で製作した切欠き試験片に、両振り軸荷重を繰り返して得られた疲労破面である。多数のラチェットマークが全周に渡って観察される。全周から発生した疲労き裂が、それぞれ疲労破面を形成し、隣接する疲労破面が合体したことによって形成される段差がラチェットマークである。即ち、隣接する疲労破面が同一平面に存在しないことにより合体した時にこのような段差が発生する。従って、図2に示すようにラチェットマークが多いことは疲労き裂の発生起点が多いことを意味する。また、発生起点が多いことは、繰り返し応力振幅が大きいことをも意味する。応力振幅が小さくなると、部材全周の中で何らかの原因で疲労強度が最も低い場所が疲

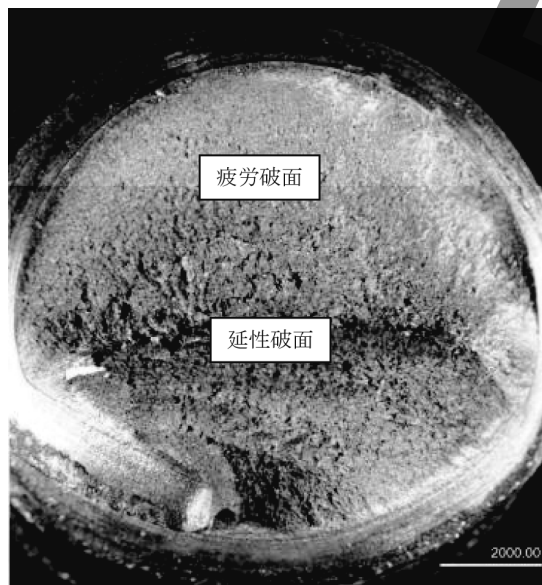


図1 疲労破面の例（ボルトのねじ部疲労破壊）

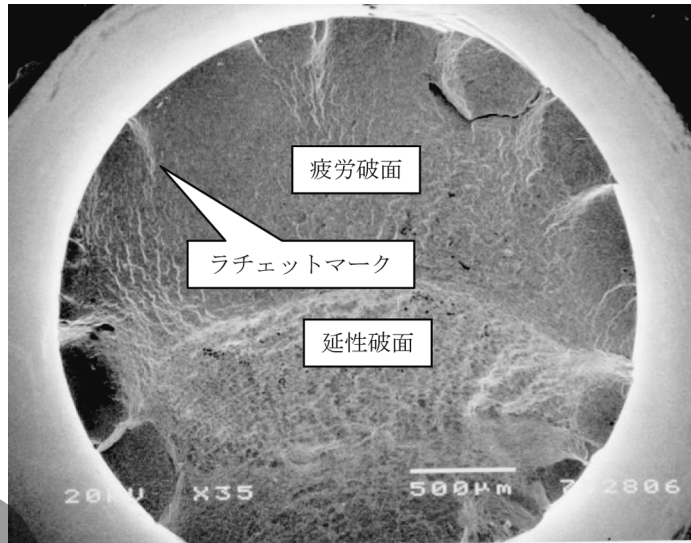


図2 疲労破面に見られるラチェットマーク(炭素鋼、切欠き材、軸荷重)

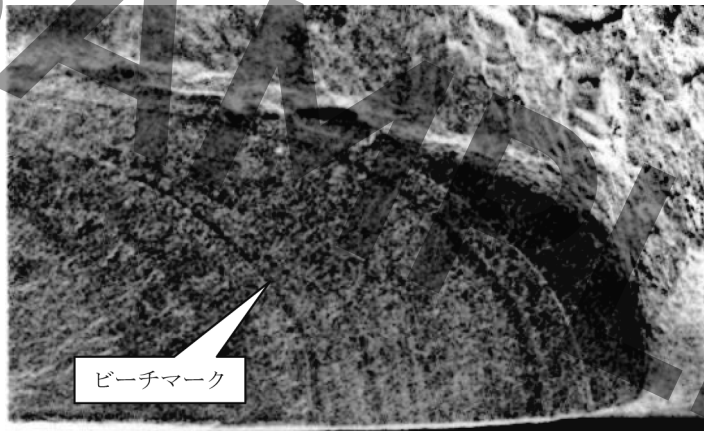


図3 疲労破面に見られるビーチマーク (またはシェルマーク)<sup>10)</sup>

疲労き裂発生起点となり、疲労限度に近い応力振幅では、き裂発生起点は一個所となる。

- ②ビーチマーク (シェルマーク)：疲労破面には、疲労き裂進展状況に対応した痕跡が残る。例えば機械、装置の起動と停止、あるいは応力の大きさの変化などにより、疲労き裂が進展と停止を繰り返した痕跡が、図3に示すように砂浜に残る波の跡や貝殻の表面のすじ状の模様が見られる<sup>10)</sup>。これをビーチマークまたはシェルマークと称し、疲労破面に見られる特徴の一つである。ビーチマークの数から機械、装置の起動停止の回数がある程度予測できる。
- ③フィッシュアイ；部材の表面を硬化し、き裂発生を抑制すると、疲労き裂は部材の内部から発生することがある。このような疲労破面の特徴はフィッシュアイである。図4に高周波焼き入れした軸荷重試験片を用いた疲労試験で得られた疲労破面を示す。(a)は表面から疲労き裂