

Q

疲労破面には、なぜ、ビーチマークが形成されるのでしょうか。また、ビーチマークが半楕円形状になるのはなぜですか。

参照 QNo. : FB-05, FB-17, FB-22

A

ビーチマーク(海岸の砂の波状模様)またはシェルマーク(貝殻状模様)の写真を図1に示す。一般に、疲労き裂は材料表面を起点として発生し、半楕円形状の表面き裂として進展する。疲労き裂が進展している途中で応力または環境が変動した場合、き裂前縁の形状が縞状模様として残され、ビーチマークとなる。したがって、ビーチマークは基本的に半楕円形状となる。

ビーチマークの形成は意図的にできる。最も一般的な例として、疲労き裂進展試験におけるビーチマークの導入方法を図2に示す。この方法では、最大荷重が一定になるような2つのブロック波形(所定の荷重振幅と繰返し数)を交互に負荷する。このように、荷重振幅を変化させると、低荷重振幅に対応する破面上の位置に色調が異なる縞模様が規則的に出現する。これがビーチマークである。この色調の変化は、高荷重振幅から低荷重振幅への変化によって、き裂閉口に起因するき裂面接触が生じ、き裂面にフレッティング酸化物が形成される結果である。き裂閉口の結果として、疲労き裂進展速度も減少するから、き裂がほぼ停止した状態で、き裂面接触が繰り返され、フレッティング酸化物の形成が助長される。したがって、走査型電子顕微鏡(SEM)では、色調が識別できないから、ビーチマークを観察できない場合が多い。

上述したように、ビーチマークの形状は、表面き裂の形状を示しており、引張、曲げのような荷重条件、起点部の応力集中などに関連している。

ビーチマークの形態と形成条件を、以下に示す。

- (1) 上述した試験の例で示したように、疲労き裂進展速度を急激に低下させるような応力振幅の変化があれば、き裂前縁の位置にビーチマークが形成される。定常運転の途中で、配管内部の流量制御のために、ポンプ回転数を周期的に変化させる場合などである。
- (2) 材料内部を起点として疲労き裂が発生する場合、円形状の内部き裂の応力拡大係数は小さく、疲労き裂進展速度は遅く、き裂面にフレッティング酸化物が形成される。内部き裂が進展して表面に貫通すると表面き裂となり、表面き裂の応力拡大係数は直前の内部き裂の応力拡大係数の約 $\sqrt{2}$ 倍に急増する(き裂深さ $a \rightarrow 2a$)。したがって、表面き裂の疲労き裂進展速度も急増し、き裂面にフレッティング酸化物が形成されなくなる。貫通直前の内部き裂の形状は、材料表面に接する円として、その内部のフレッティング酸化物の色調から識別できる。これもビーチマークの一種である。材料内部の起点は介在物である場合が多く、この場合には円形のビーチマークの中心に介在物が位置するので、フィッシュアイ(魚の目玉)という。
- (3) 疲労破壊の最終破断直前では、疲労き裂進展から安定き裂進展(急速破壊)に移行する。早い繰返し速度で荷重を繰り返している場合、繰返しごとの安定き裂進展の停止の形跡が破面上で識別できる。これはアレストラインといい、ビーチマークと区別する。最終破面が実断面積減少による塑性崩壊(延性破壊)の場合には、疲労破面と最終破面が破面様相の違いから明

確に識別できる。この境界はビーチマークとはいわない。

- (4) 高温流体環境での疲労き裂進展の途中で温度が変化すると、破面上の酸化皮膜の形態が変化し、破面の色調が識別できる。定常運転の途中で、配管内の流体を高温から低温、または低温から高温に切り替えた場合などに対応する。なお、き裂面は狭隘となっており、高温流体環境で、ビーチマークに似た様相の壊食流れ模様が現れる場合があり、注意を要する。また、疲労破面は活性な新生面であり、耐食性に優れたオーステナイト系ステンレス鋼であっても、300°C程度の純水中疲労き裂進展試験では黒色となる。

上述したフィッシュアイが形成される場合に、高温気体外部環境では、内部き裂が表面に貫通すると、内部のき裂面のみが高温酸化被膜で着色され、ビーチマークが明瞭となる。

- (5) 錆(腐食)の程度が異なるき裂面の境界がビーチマークとして識別できる場合がある。例えば、運転時に疲労き裂が進展し、長期間停止後に再運転する場合、停止期間中にき裂面が腐食する環境があれば、ビーチマークとして識別できる。
- (6) 過大荷重によるストレッチゾーンは肉眼では識別できない。ストレッチゾーンの後のき裂面(破面)が疲労ならば、必ずき裂進展速度が低下し、フレッティング酸化物が形成される。これがビーチマークである(過大荷重によるき裂進展の遅れ)。
- (7) 以上のように、ビーチマークが形成される条件は種々あり、また形成機構が重畳する場合も多い。これに配慮して、評価を行うことが重要である。
- (8) 時間依存形き裂進展の応力腐食割れ(SCC)などの場合にも、荷重と環境の変化によって縞模様が現れることがある。一般的に、これはアレストマークという。しかし、破面性状と形態はSCCと疲労で異なるから、アレストマークと疲労によるビーチマークは識別可能である。

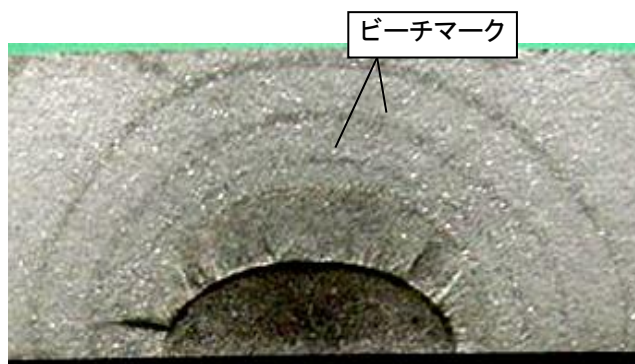


図1 疲労破面のビーチマークの例

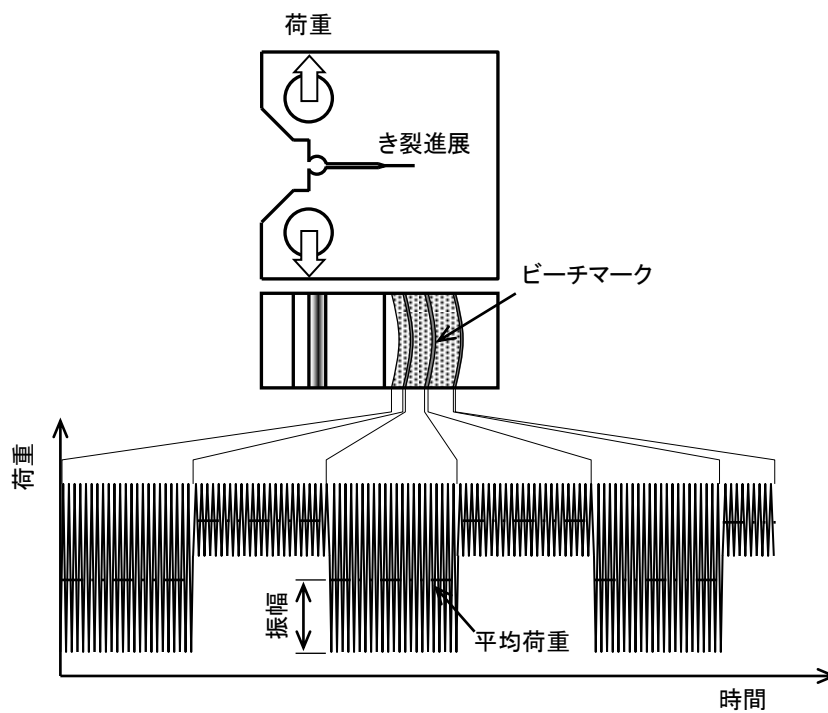


図 2 疲労き裂進展試験におけるビーチマークの導入方法