

# 解説 記事

易しい破損解析講座

破面から読み解く破壊の原因

その2 ー破面から何が判るかー

北海道大学名誉教授

野口 徹 Toru NOGUCHI

## 2.1 破面から読み取れる情報

前回の解説、その1では破損破壊の原因を究明するための破損解析では調査の順序が大切であることを示しました。その中で、まず破損物の破面と破損状況から、破壊の種類と起点を判定することの重要性を述べました。破面から色々な情報を読み取る技術を破面解析、フラクトグラフィ、と言いますが、これには目視から数倍程度のルーペ、実体顕微鏡等による巨視フラクトグラフィと、主としてSEM（走査型電子顕微鏡）による微視フラクトグラフィがあります。

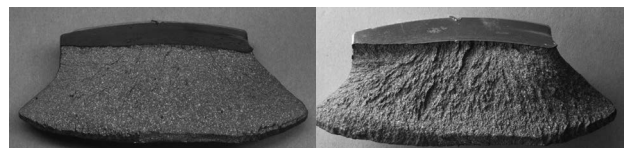
破面の観察、破面解析によって、破壊の種類と破壊の起点の他、破壊の伝播経路と終点、作用した応力（荷重）の方向とおよその大きさ、材料欠陥の寄与の有無、環境要因の寄与の有無、破壊の経過など、色々な情報を読みとることができます。

破面解析でもその順序が重要です。多数の破損箇所があるような事故や、複数の部材の破損がからむ場合には、まず1/10（離れた位置から）破壊部全体の様相を観察し、記録する必要があります。次に1倍（目視）で破損品の破面を個別に観察し、第1破損の部材と起点部、全体の破壊経過を推定した後に、10倍、100倍と倍率を上げ、最後にSEMによる1000倍など高倍率で観察します。一般に、高倍率ほど正確で多くの情報が得られると考えがちですが、実は高倍率では全体の情報が抜け落ちてしまうことに留意する必要があります。確かに高倍率では局部的には詳細な情報は得られるのですが、例えば全体に変形があるかどうか、破壊の発生点はどこかなど、抜け落ちる情報もまた多いのです。目視による巨視的な破面観察で、必要な情報の85%が得られると言われております。本解説では特に、この目視破面解析、破面観察の重要性を示し、その手法を解説しています。環境脆化ではその判断にSEM観察が必要ですが、これは後に述べます。

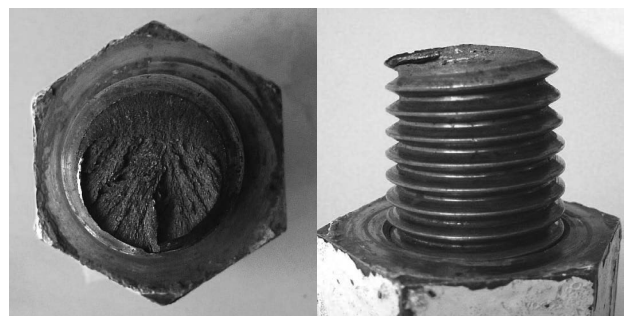
## 2.2 巨視破面の観察法

破面の観察では光の当て方が重要です。図2.1は脆性的な破壊の破面を(1)平面光と(2)斜め光によって撮影したものです。平面光では平坦で金属色の輝点の集合にしか見えませんが、斜めからの光にすると破壊の起点と伝播の様子が明瞭に見えてきます。

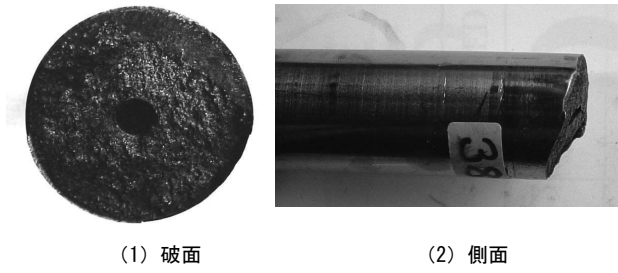
破面の観察ではまた破面だけでなく、「塑性変形があるかどうか」の確認が重要です。直線定規やノギスで、変形、曲がり、断面収縮の有無などを確認することができます。図2.2は高力ボルトの破面の例です。(1)の破面は事前の亀裂部分と、その先端からの脆性破壊からなっており、一見「疲労破壊」の疑いがもたれます。しかし横から見た(2)では、ボルトには明らかに曲がり、くびれがあります。すなわち塑性変形があります。したがってボルトは過荷重により延性破壊したものであって、事



(1) 平面光の場合 (2) 光を斜めから当てた場合  
図 2.1 光の当て方による破面の違い(脆性破面)



(1) 破面 (2) 側面  
図 2.2 高力ボルトの破断



(1) 破面 (2) 側面  
図 2.3 高周波焼き入れ軸の折損

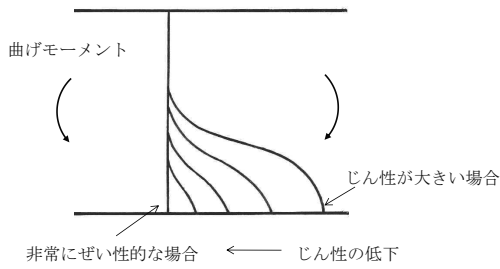


図 2.4 曲げ破壊の場合の S 字形の湾曲

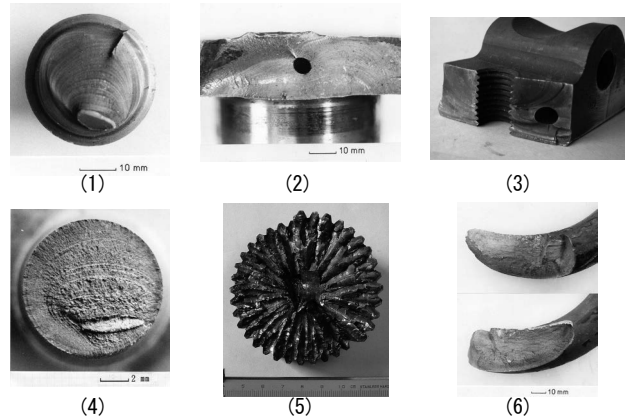
前亀裂の部分はねじ底に生じた延性亀裂と判断できません。

図 2.3 は高周波表面焼き入れした軸が破壊したものです。(1)の破面では脆性破壊の様相を呈します。破面近傍にくびれや変形はありません。しかし(2)のように横から見た場合には、わずかながら曲げの塑性変形があります。すなわち、この破壊も過荷重による曲げ破壊です。

脆性的な曲げ破壊の場合、亀裂伝播の最後の部分が湾曲して S 字形になることが多いです [1]。これを図 2.4 に示します。図 2.3 (2)でも破面の下側にこのような S 字形の湾曲があります。前回の図 1-9 の (1) は延性 (過荷重) 破面の例として示してありますが、破面には山脈模様があり、一見脆性破壊に見えます (そういったものなのですが)。しかし破面の下側部分には明瞭な S 字型の湾曲があり、過大な曲げモーメントによる塑性変形を伴った破壊と言えます。破損品の寸法が大きく (直径 170 mm)、衝撃的な荷重によって破壊したので、目に見えるような塑性変形がなく、脆性的な様相を呈しているのです。

### 2.3 種々の疲労破面

破壊の種類を判断し、また起点部を推定するためには、作用した荷重、応力の状態を想定しながら破面を見る必要があります。あらかじめ、荷重の種類 (静的か、衝撃的か、繰り返しか、その方向と大きさ、最大応力が生じる位置など) の情報を知ることが大切です。調査を依頼されたときには、荷重の受け方が分る図面と、荷重の種類や大きさに関する情報をできるだけ多く得るようにします。調査を依頼する場合も同じです。



(1) ポンププランジャ : 片振り引張り疲労 (A 4 相当)  
(2) クランクアーム : 片振り曲げ疲労 (B 3 相当)  
(3) ローラーホルダアーム : 曲げ (+ねじり) 疲労 (B 3 相当)  
(4) 自転車ペダル軸 : 片振り曲げ + 回転曲げ疲労 (B4 相当 + 回転)  
(5) スプライン軸 : 両振りねじり疲労 (E 3 相当)  
(6) ばねの疲労 (片振りねじり) (E 1 相当)

図 2.5 各種の疲労破面

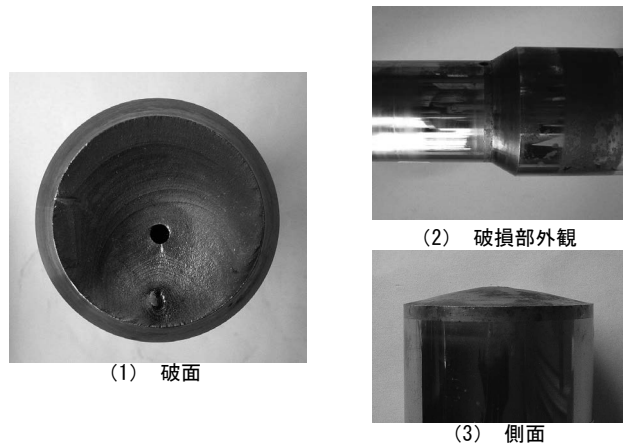


図 2.6 軸の回転曲げ疲労破面の例

疲労破面の判断にはこれが特に有効です。前回の図 1.15 のように、応力の種類と状態によってそれぞれ特徴ある破面ができるからです。疲労かそれ以外の破壊か紛らわしい場合も多い (特に、硬い材料の場合) ですが、繰返し荷重の有無、種類が分れば調査の手間が大幅に省けます。

図 2.5 (1) ~ (6) は色々な疲労破面の例です。図 2.6 は回転曲げ疲労破面の例です。この破面は図 1.15 の D4 に相当する破面です。ピーチマークからは一見、下側の 1 点を起点として同心円状に外側に広がったように見えますが、実は、(2) に示すように、段付き部の角の全周囲を起点部として内側に伝播したものです。起点のように見える内側の点は、実は最後に破断した部分です。もし内側が起点ならば、材料内部の異常が疑われます。しかし、内部の起点から生じた亀裂が外側に伝播し、その終縁が全て段付き部の角に一致するという事は考えにくいです。むしろ、角の応力集中がきつすぎるために、その全円周から回転曲げ疲労が生じたと考える方が合理

的ですが。破面部を横からみたときに、上に凸であるのは、角部の応力集中が疲労発生の大きな要因であることを示しています。このように、破面だけでなく、破面近傍の変形状態や破面の向き、凹凸なども注意深く観察することが大切です。以下に、巨視的な破面から原因を推定することができたいくつかの事例を紹介します。

## 2.4 トラックハンドルシャフト [1]

4トントラックのハンドルコラムシャフトが、左折のためにハンドルを切った時に、突然切損し、脱落してしまいました。シャフト部の概略と破損位置を図2.7に示します。シャフトは直径24mmで、破壊位置はステアリングのためのボールねじ部のベアリングから約50mm離れた平行部分です。破面を図2.8に示しました。破面から次のことが読み取れます。

- ① 破壊は疲労によるもので、応力状態は両振りの曲げです(その1、図1.15 C4相当)。破面は磨滅していてビーチマークは見られませんが、最終破壊部が小さいことから、応力は疲労限度近傍の低応力、繰返し回数 $N_f$ が $10^6$ 近傍の高サイクル疲労です。
- ② 破面には明瞭なラチェットマークが見られます。これは応力集中の影響が強く、複数の亀裂が同時に進行したことを示しています。

これら破面からの判断は、次の2点で妙です。まず②ですが、図2.7の折損部は外観上平行部で、応力集中部ではありません。しかしその理由は製作工程の資料から判りました。破損品は炭素鋼のボールねじ部と、軟鋼製

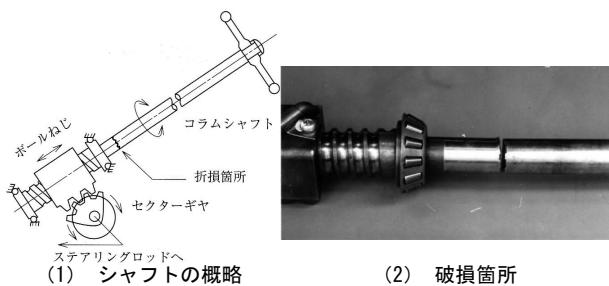


図2.7 ハンドルコラムシャフトの概略と破損箇所

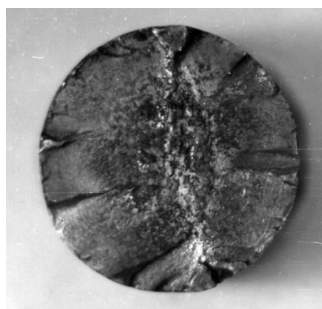


図2.8 シャフトの破面

のコラムシャフトを付き合わせ溶接した部分でした。外見的には平滑ですが、金属組織が異なっており、切欠きの作用をしたと考えられます。疲労亀裂は接合の境界線に沿って伝播したものです。また、溶接によるバリを研削除去した際の研削痕が粗く、これらも切欠きとして作用したと考えられます。

問題は①です。通常の走行、運転状態でハンドルコラムシャフトが受ける荷重は繰返しねじりです。繰返し曲げ荷重がかかる状態は異常です。そこで、シャフトの真直度をダイヤルゲージで計測しました。結果を図2.9に示します。ハンドルホイール端より500mm付近から破損部までの約200mmの間で最大0.15mmの塑性曲がりが見出されました。曲がっているシャフトの片方を固定して繰返し回転させれば、曲がった部分には両振りの曲げ応力が生じます。実際にはボールねじ側を固定してハンドルホイール側を回転させますから、これによる曲げ応力が疲労限度を超える程度に大きくなる可能性があります。トラックは約6カ月前に追突事故を起こしており、シャフトの曲がりはこの際に生じたと考えられます。追突後に修理、整備を行ったけれども、シャフトの曲がり、ボールねじ部の軸とシャフト軸のずれが検出、認識されないうまま運転が続けられ、繰返し曲げ応力によって疲労破壊したものです。全く同じ車種の同じシャフトの事例を筆者はもう1例扱っています。やはり追突事故の前歴がありました。

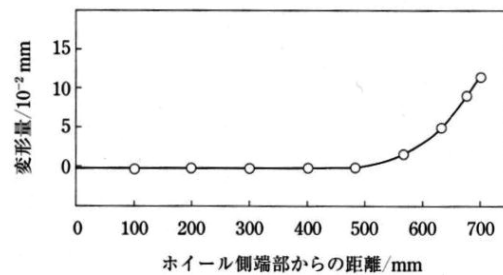


図2.9 シャフトの真直度の計測結果

## 2.5 スクリューポンプ<sup>1</sup>

これは実際の破損品を見ることなく、メールで送られて来た破損状況の写真と破面の情報だけから破壊の原因を推論した例です。破損したのは大型軸受部に潤滑油を送るスクリューポンプのローターです(図2.10)。破壊したのは真中のパワーローター1本と両側のアイドルローターの内の1本です。材料はC0.22%程度の肌焼き鋼で、表面0.5mmは表面硬化されています。パワーローターの破面を図2.11(1)(破損部直径28mm)に、アイドル

<sup>1</sup> 本事例は苫小牧市テクノセンターの好意による

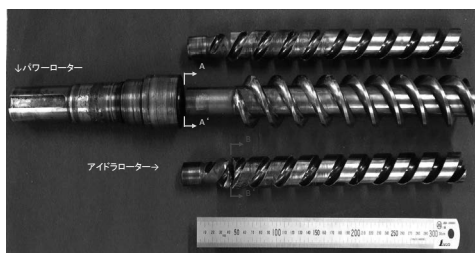


図 2.10 破損したスクリーンプンプの外観  
(苫小牧市テクノセンターの好意による)

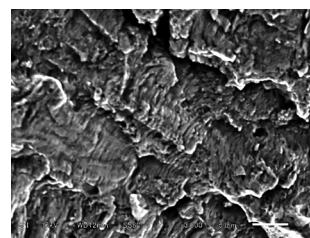
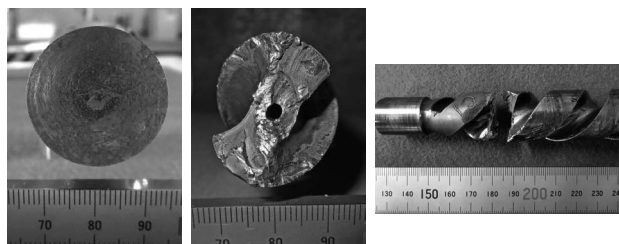


図 2.12 アイドラローターの SEM 破面  
(苫小牧市テクノセンターの好意による)



(1) パワーローターの破面 (2) アイドラローターの破面 (3) アイドラローターの破損部側面  
図 2.11 ローターの破面と破損状態  
(苫小牧市テクノセンターの好意による)

ラローターの破面と破損状態を図 2.11 (2) および 2.11 (3) に示します。調査担当者は図 2.11 (1) の破面は破断後の磨滅で観察困難と判断し、アイドルローターの破面を詳細調査しました。ここには明瞭なビーチマークがあり、また SEM 観察でも図 2.12 のようなストライエーションが観察されましたので、疲労による破壊と判断できました。またこの近傍の磨滅が顕著であったので、潤滑油に含まれるスラッジ等で磨滅し、また角部の応力集中がきついたために疲労破壊したと推定しました。

メールで相談を受けた筆者は次の点を指摘しました。

- (1) パワーローターの破面は、破断後の磨滅で生じたものではなく、軟らかい材料が急激な捩り過荷重を受けた場合に生ずる破面（本解説その 1、図 1.3(5) 相当）である。
- (2) アイドラローターの破面は明らかに疲労によるものである。アイドルローターが先に破壊し、これによってパワーローターに異常なねじり荷重が作用して、2 次被害で破壊したと考えるべきである。
- (3) アイドラローターの疲労は曲げ荷重によるものである。通常の運転状態であれば、アイドルローターに作用する荷重はねじりであるが、疲労亀裂の進展方向は軸と直角方向で、ねじり荷重に伴う斜め方向の進展部がない（ねじり成分が見られるのは最後の脆性破壊部分だけ）。したがって、アイドルローターに曲げ荷重が作用した原因を究明する必要がある。
- (4) メインローターの段付き部およびさらに左側の軸受

け部に青い変色（テンパーカラー）がある。また軸受け部には磨滅痕がある。テンパーカラーは熱処理の過程で生じたとも解釈できるが、ローターおよび軸受け部に何らかの異常な力が作用した状態で運転され、摩擦発熱で高温になった可能性がある。

- (5) これらから、各ローターの右側の支持状態、軸受けの損傷の有無を調査する必要がある。ポンプ穴の内面にも摩擦や擦過痕（こすれ痕）などの確認が必要である。

- (6) 同じ仕様、構造のポンプの破損歴を調査する必要がある。もし他のポンプに折損例がなく、本品のみが折損したのならば、この製品のみ製作上あるいは使用上の問題を考える必要がある。

以上のように、まずアイドルローターに異常な曲げ荷重が作用した原因を調査する必要があることを助言しました。

調査の結果、ローターの支持側軸受け部の組付けに誤りがあった可能性が大きいことが判りました。これによって、各ローターに異常な横荷重、曲げ荷重が作用し、メインローターの軸受けが過荷重で摩耗、発熱、アイドルローターには繰り返し曲げによる疲労が生じた、破断したアイドルローターの噛み込みによってメインローターが瞬時にねじり破壊したという破壊経過が推定されます。ローターは肌焼き鋼ですから、(1) の「軟らかい材料の急速捩りによる破壊」に対応します。ローターの回転数と運転期間から総回転数を算定すれば、誤った組付けが出荷時になされたものか、直近の定期整備時に生じたものかを推定することができます。

このように、巨視的破面以外の外観の注意深い観察からも、破損経過に関する多くの情報が得られることを示す事例です。

## 2.6 減速機歯車歯の折損

大型減速機の歯車（モジュール 13、はす歯）の歯が歯底から折損しました。最初に破壊したと見られる 2 枚の



図 2.13 2枚の折損歯の破面

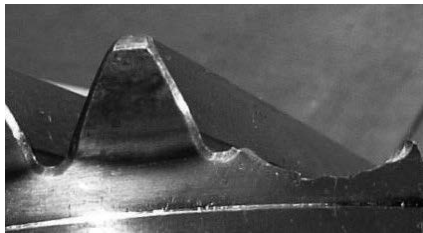


図 2.14 折損部の歯の側面

歯を図 2.13 に示します。歯幅 250 mm の内、端から約 150 ~ 175 mm が折損しています。歯面には明瞭な疲労縞が見られ、歯底から片振りの曲げ疲労が生じたことが判ります。歯車歯の典型的な疲労破壊パターンです。疲労の起点部分は端面から 40 ~ 50 mm 付近です。

図 2.14 は歯を端面から見たものです。材料は(恐らく)炭素鋼で、高周波焼き入れがなされています。疲労の起点部は丁度歯底の焼き境になっています。すなわち、高周波焼き入れは、歯面の耐摩耗(ピッチング摩耗)性を上げるためになされたもので、疲労破壊に起点部になる可能性の大きい歯底の応力集中部には焼きが入っていません。このために、焼き境の、硬化していない基地部分から疲労が生じたと考えられます。

さらに詳細に歯面を観察すると、2枚の折損歯いずれも歯底近傍に点状のスポーリング(表面の剥離痕)が生じています(図 2.15)。スポーリングは端面から 100 ~ 120 mm の範囲にわたっています。これは、歯車の歯が「偏当たり」していた可能性を示唆しています。高周波焼き入れが歯底にまで至っていないことに加えて、この偏当たりが、疲労の要因になったと推定できます。

なお、歯車の歯の折損の場合、多くの歯の中で、最初に破損した1枚~数枚の歯を見つけ出すことが重要です。最初の歯に亀裂が発生すると剛性が低下して隣接する歯の負荷が上昇し、これに疲労が生じます。これが順次繰り返され、その後は歯の衝撃的負荷あるいは折損した歯の咬み込みによる2次被害(衝撃的過荷重破壊、表面硬化層に沿った剥離など)が生じます。図 2.16 はそのような2次被害による歯の破面の例です。

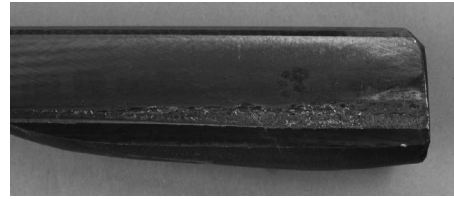


図 2.15 歯面に見られたスポーリング痕

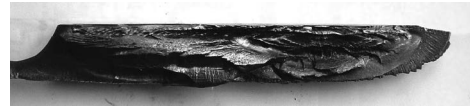


図 2.16 2次被害による歯の破損の例(硬化層に沿う剥離破壊)

## 2.7 破面の見方のポイント

ここで破損状態と破面から破壊の種類を判断する際のポイントを上げてみます。必ずしも常に当てはまるものではありませんが、まず最初に注目すべき点と考えて下さい。

- (1) まず「全体として塑性変形があるかないか。あれば延性破壊、なければ脆性破壊か疲労破壊。
- (2) 塑性変形がなくて破面が結晶粒状ならば脆性破壊、塑性変形がなくて、破面が結晶状でなく、平坦あるいは縞模様があれば疲労破壊。環境ぜい化については、材料と使用環境の情報が必要ですが、これについては本シリーズ、その4で述べます。
- (3) 脆性破壊では亀裂の進展を示す山脈模様がある(ことが多い)。ねばい(軟い)材料ではこれが粗い。脆い(硬い)材料ではこれが細かい。脆い(硬い)材料ほど破面の凹凸が少ない。
- (4) 曲げの脆性破壊(および急速、脆性的な延性破壊)では、最後の部分がS字形になる。ねばい材料ではS字が明瞭、脆い材料ほどS字が小さくなる。
- (5) 疲労亀裂の縞模様は必ず見えるとは限らない。こすれて磨滅している場合がある。屋外にあった部材では疲労亀裂進展部分が酸化変色していることが多い。
- (6) ラチェットマークは疲労の重要な特徴。応力集中が著しく、複数の起点がある場合にできる。
- (7) 疲労破壊の最後は脆性破壊かせん断破壊(シアリップ)。これが非常に小さい場合もある。
- (8) 星状破面(菊の花のような破面)は両振り繰返し振じり疲労。片振り振じり疲労はらせん状。
- (9) 破壊の起点部は「ほとんどの場合」部材の外表面。なぜなら、ほとんどの場合、最大応力は外表面に生じるから。起点部が複数ある場合、線状である場合もある。
- (10) 破壊の起点が部材の内部になるのは、起点部に欠陥

あるいは異常な組織がある場合。

- (11) 疲労破面の縞模様の間隔は一般に後半で粗くなる(荷重が一定の場合。変位による負荷の場合は逆のことがある)。
- (12) 脆性破壊でも、一般的に起点部はより平坦で、伝播にしたがって粗くなる(ただし逆の場合もある)。
- (13) シアリップが最終破断部。その反対側が起点部分。

破面を見る場合には、作用する荷重、応力を想定しながら破面を見るのが大切です。応力の種類(静的、衝撃、繰返し)と方向(引張り、曲げ、ねじり等)が、推定する破壊の種類、破面の特徴と一致するかどうかのポイントです。想定する応力状態によって破面の解釈が異なる場合があります。図面あるいは設計資料から「どのような力が作用するか」を考えながら破面を見る必要があります。また破面だけでなく、破面の周囲を注意深く観察する必要があります。変形や亀裂、打痕、擦りキズ、変色や光沢の変化等も破損経過を推定する手掛かりになります。また破損品と関連する部品(例えば、軸の破損の場合は軸受けやキーなど)を必ず調査してください。事例 2.5 に示したように、これらの中にも多くの情報があるのです。これについては次回その 3 でさらに詳しく述べます。

## 2.8 この章のまとめ

前回その 1 で、破損解析ではその調査の順序が大切であることを述べましたが、今回その 2 では、そのための破面の観察、破面解析でも順序が重要であることをいくつかの実例によって示しました。破面を観察する時には、まず全体の様相を把握し、破損個所近傍の塑性変形の有無を確認することが大切です。目視による巨視的な破面

観察で、破壊の種類と起点部、伝播経路、作用した荷重(応力)の種類と方向等をほぼ推定することができます。これらの破面の判断には設計時の、あるいは運転稼働状態での荷重の種類と方向のデータが必要です。これによって破面の解釈が異なることがあるからです。また両者の整合性の有無から、破壊をもたらした要因を推定することができるからです。

今回上げた事例 2.4 と 2.5 は、いずれも破壊時の力学条件が正常な運転稼働状態とは異なる異常なものであることを破面から推理できた例です。事例 2.6 は破面だけでなく、その周辺の様相からも破壊に寄与した要因があることを推定できた例です。いずれも SEM による微視的観察は必ずしも必要ではありません。

2.7 では目視で破面を観察する場合の基本的な判断基準を上げました。次回その 3 ではさらに、破面の観察に有効な破面や亀裂の見方や判断法を多くの事例によって紹介します。

## 参考文献

- [1] 野口徹：技術者のための破損解析の手引(工学図書)(2014) (全般)

## 著者紹介



著者：野口 徹

所属：北海道大学名誉教授

専門分野：機械工学、機械材料、鑄造工学