

ボルトの損傷調査

※本調査品は、疲労試験で破断させたボルトです。損傷調査の紹介用に、実機使用での破損品と仮定して記載していることをご了承ください。

1. 目的

製品締結用ボルトが破断した。今までの使用実績から、破断した事象はなく、その損傷要因の究明が望まれている。

本調査では、ボルトの損傷要因を推測する一環として、外観観察および破面観察を実施する。また再発防止の観点から、ボルト側に損傷要因(材料欠陥, 強度不足 等)がないかを確認するため、断面観察や硬さ測定、化学成分分析を行い、材料性状の把握も行う。

2. 調査品の詳細

- (1) 名称：ボルト
- (2) 材質：SCM435 (強度区分：12.9)
- (3) 使用環境：室温, 屋内
- (4) 運転時間：約 3 年
- (5) 備考：実際のご依頼の際には、開示可能な範囲で図面や材料スペック、使用状況など各種情報を共有いただければ考察の助けとなります。



調査品の受領状況

3. 試験結果

3-1. 外観観察 (図1 参照)

- ・ボルトは、黒染め処理されており、先端から約 25 mm 位置で、ねじ底に沿って破断していた。
- ・ボルト全体には曲がりはなく、円筒部にも著しい^{きず}疵は認められなかった。
- ・破断部には、伸びや絞りなどの顕著な変形はなかった。

3-2. マクロ破面観察 (図2 参照)

- ・マクロ破面は、外周部が平坦で、ねじ底には全周に亘って多数のステップが観察された。中央部から下方にかけては、やや粗めで、かつ傾斜が大きかった。その様相から、ねじ底のほぼ全周から疲労き裂が発生し、中央部で急進的に破断したと推測された。
- ・負荷形態は、最終破断部が大きめであることから「公称応力是中から大」、ねじ底に多数の起点があることから「鋭い切欠きあり」、疲労き裂の進展状況から「引張」に相当する応力が作用したと推測された。

3-3. ミクロ破面観察 (図3-1, 3-2 参照)

- ・起点部である外周部には、ステップが明瞭に観察され、多数箇所からき裂が発生したことが窺われた。
- ・ねじ底の表面は比較的なめらかで、有害と思われる顕著な加工疵や腐食ピットなどの異常はみられなかった。

- ・起点部直下や進展部の破面には、疲労破面に観察される“金属組織に依存した模様”や“ストライエーション状模様”が認められた。なお、サブクラックが散見されたことから、比較的高応力な疲労破面様相と推測され、マクロ破面形態とも符合した。

3-4. 断面組織観察 (図 4, 5 参照)

- ・き裂の断面は、比較的直線的で枝分かれもなく、疲労き裂進展の特徴を呈しており、断面観察からも疲労損傷と追認された。
- ・断面状況から、ボルトは、ねじ部を転造加工した後に熱処理されたと推測された。起点部のねじ底や他のねじ底においては、顕著な加工疵や、脱炭、材料欠陥等の異常は認められなかった。
- ・芯部のミクロ組織は、“焼入れ焼戻し組織”を呈しており、熱処理不良などの特段の異常はなく、SCM435 の調質材としては、一般的な組織性状と推測された。

3-5. ビッカース硬さ測定 (図 5 参照)

- ・硬さ値は、ねじ底で 384~398HV、芯部で 409~416HV であった。芯部に比べて表層部ではやや低くなっており(一般的な転造加工では、ねじ底の硬さは芯部より高い)、表面処理(黒染め)の影響と考えられた。
- ・強度区分 12.9 の JIS 規格値と比べ、表層部で極僅かに下回った部分もあったが、顕著な異常はなかった。

3-6. 成分分析 (図 5 参照)

- ・EDS 半定量分析の結果、ボルトは SCM435 の化学成分を概ね満足しており、材質間違いなどの特段の異常はなかった。

4. まとめ

ボルトの損傷要因を推測する一環として、各種観察を実施した。以下に、結果の要約を記載する。

- ・ボルトは、ねじ底で破断していた。
- ・破面観察は、マクロ観察およびミクロ観察とも、疲労損傷の様相であった。
- ・起点は、ねじ底の多数箇所、腐食や材料欠陥、疵などの異常はなかった。
- ・断面観察では、ねじ底には著しい脱炭や被さり等の有害な様相は確認されなかった。
- ・芯部は焼入れ焼戻し組織で、一般的な調質組織であった。
- ・硬さは、強度区分 12.9 の規格値を概ね満足していたが、芯部に比べ、ねじ底ではやや低かった。
- ・化学成分は、SCM435 として特段の異常はなかった。

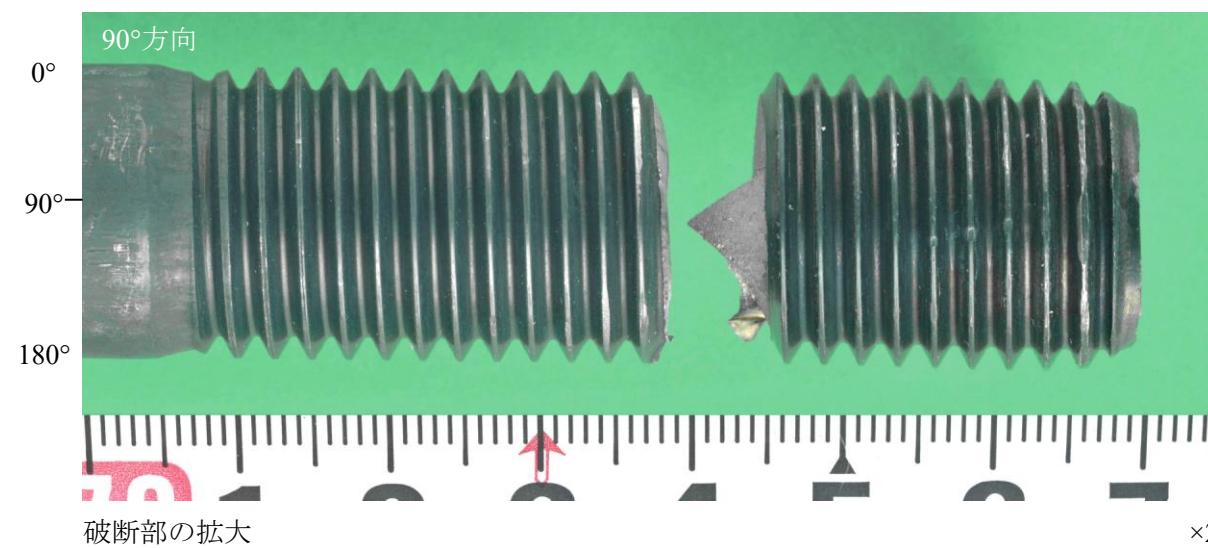
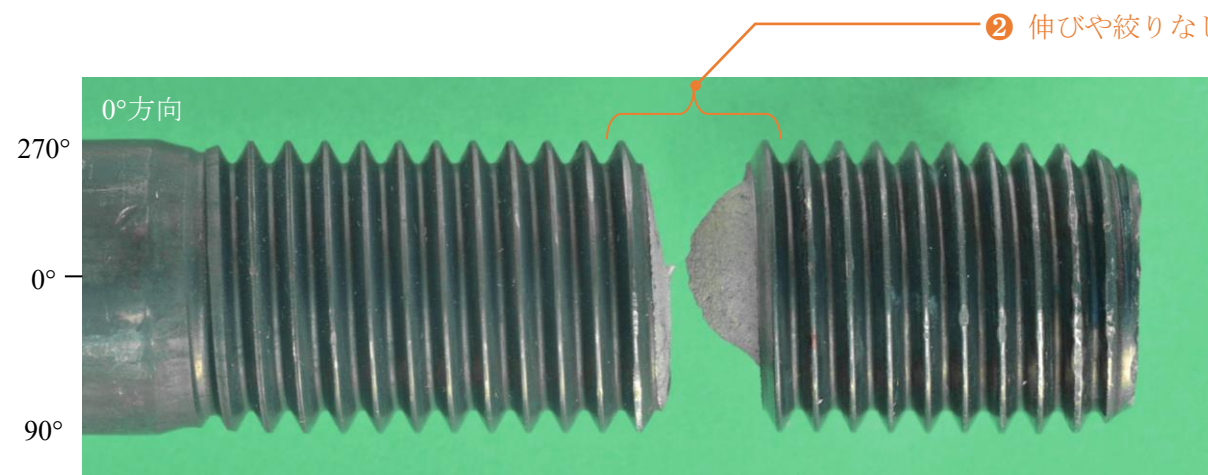
上述のことから、ボルトの破断は、疲労損傷によるものと考えられた。

なお強度区分 12.9 としての機械的強度や化学成分には特段の異常はなく、高強度材で懸念される“遅れ破壊(水素脆化)”の様相も認められなかった。過去に疲労損傷が生じた事例はなく、また、ねじ品質に顕著な異常がなかったことから、今後の方策として使用条件や状況(ナットの緩みや使用箇所の振動、直近にメンテナンスを実施したかなど)等の情報収集が推奨される。

以上

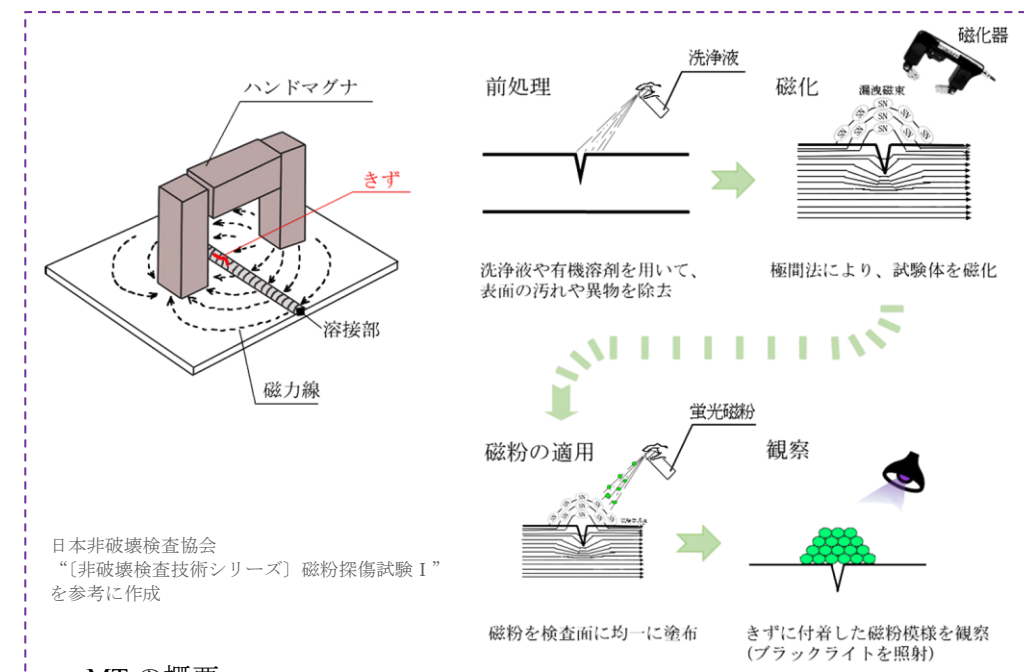


ボルトの全景 注) 角度は、後掲の破面観察での主起点を 0° とし、ボルト頭部から見て時計回りとした。 ×0.7



- ・破断したボルトを受領した。はじめに、ボルトの損傷状況を把握するため「外観観察」を実施した。
- ・ボルトは、先端から約 25 mm位置で、ねじ底に沿って破断している。
- ・① ボルト全体には、曲がりは生じていない。また円筒部にも著しい疵^{きず}などはみられない。
- ・② 破断部には、伸びや絞りなどの顕著な変形はない。
- ・ボルト表面は黒色を呈しており、黒染め処理されていると推測される。黒染めは全体に均一であるが、破断部近傍ではねじ山のつぶれによって金属光沢がみられる。また、先端側のねじ山にもつぶれが散見される。

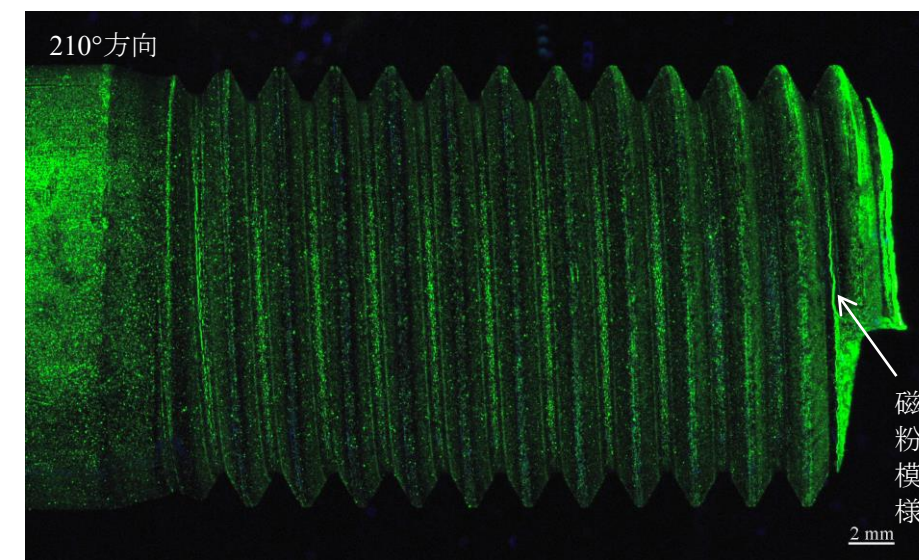
図 1 外観観察および磁粉探傷試験(MT)



MT の概要



今回の調査ボルトは 1 本ですが、複数本のボルトで締結されていた場合には、未破断品の調査も重要です。下図と同様に MT を実施し、き裂の有無を確認したり、組織や強度が破断品と未破断品とで差があるのか比較したりします。なお複数本が破断した場合には、代表品のみを観察するのではなく、どのボルトが、どのような順で破断したかを調べることも大事です。

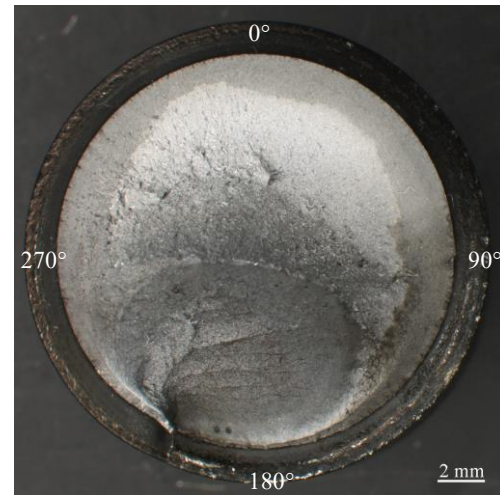


MT 状況

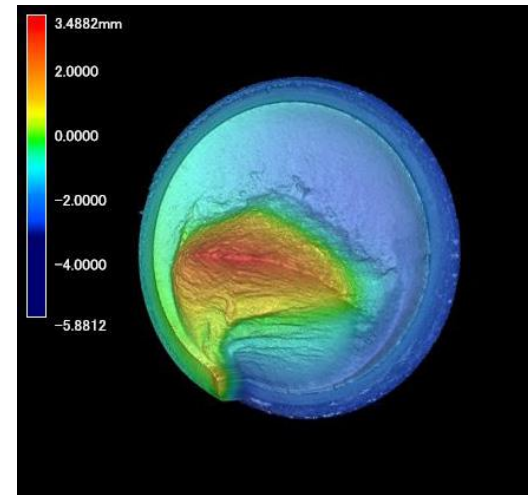
- ・破断部以外のき裂発生状況を確認するため、磁粉探傷試験(MT)を行った。
- ・MT の結果、破断部から続くねじ底に磁粉模様が見られるものの、それ以外のねじ底には磁粉模様は認められず、き裂は破断部のみに発生したことが窺える。



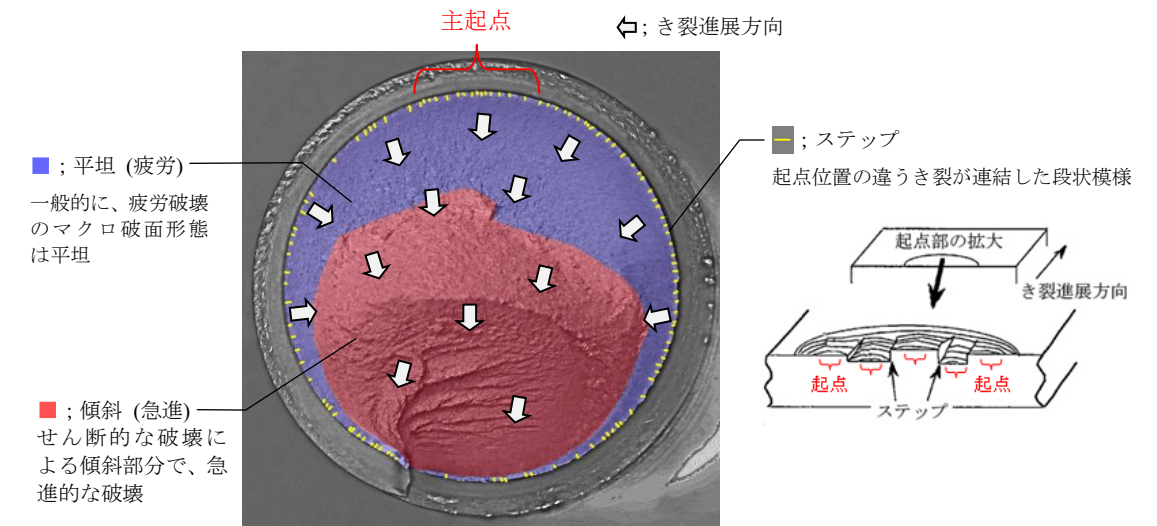
破面の観察方向



洗浄前 (受領まま)



破面の 3D 像



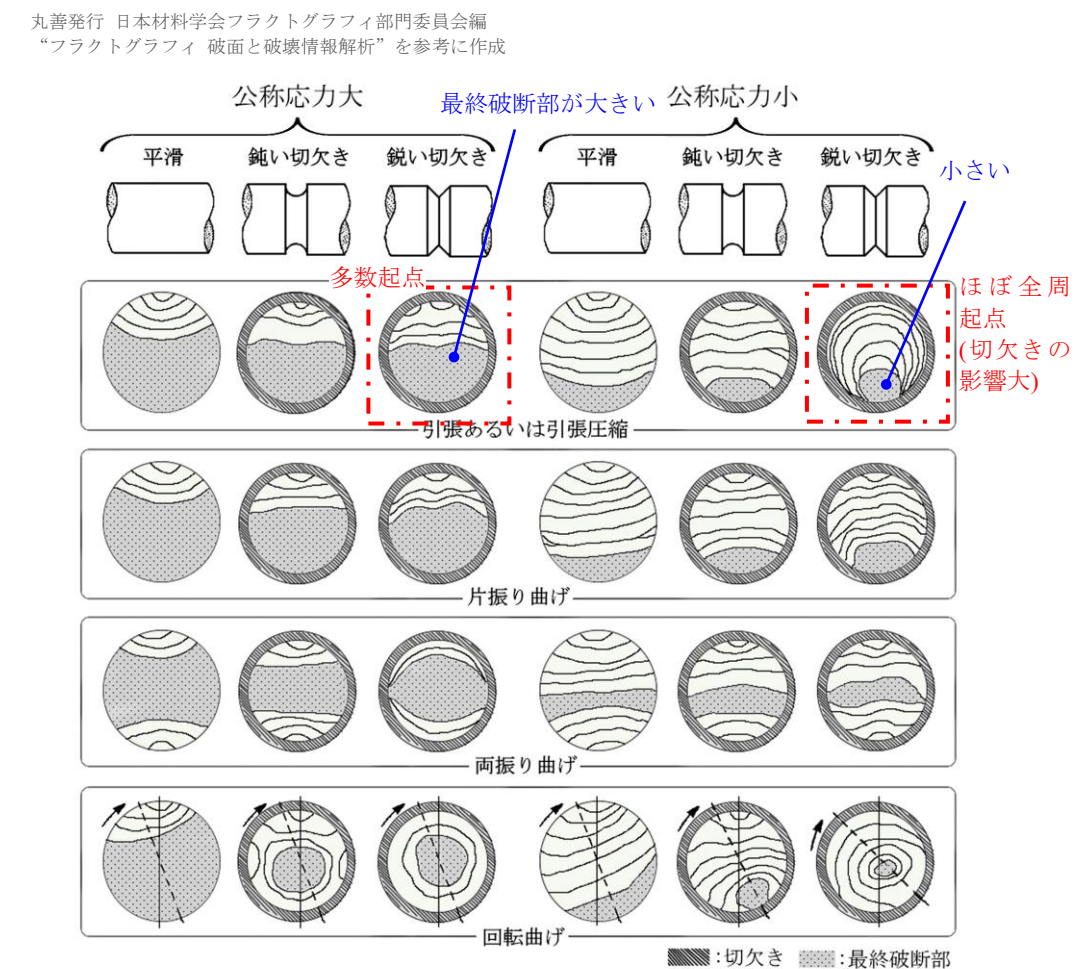
破面模様の概要

- 破壊起点位置やき裂進展方向等を把握するため、破面を目視や実体顕微鏡などで低倍率観察する“マクロ破面観察”を実施した。
- 洗浄前の破面は、多少の汚れがあるものの、錆は見られず、腐食が破断に影響を与えた可能性は低い。
- 洗浄後の破面は、外周部は平坦で、中央部から下方にかけては、やや粗めで、かつ傾斜が大きい。
- 破面が平坦なのは疲労損傷の特徴の一つで、また、ねじ底には多数のステップが観察される。ステップは起点位置の異なるき裂が合流してできる段差である。このことから、当該破面はねじ底のほぼ全周から疲労き裂が発生し、中央部で急進的に破断したことが窺える。
- なお主起点は、疲労破面の幅がもっとも広いところ(0°側)と考えられる。
- どのような力が掛かったかは、各種負荷形態における疲労破面の模式図から推測すると、最終破断部が大きめであることから「公称応力は中から大」、ねじ底に多数の起点があることから「鋭い切欠きあり」、疲労き裂の進展状況から「負荷形態は引張」に相当する応力が作用したと推測される。



マクロ破面

×7

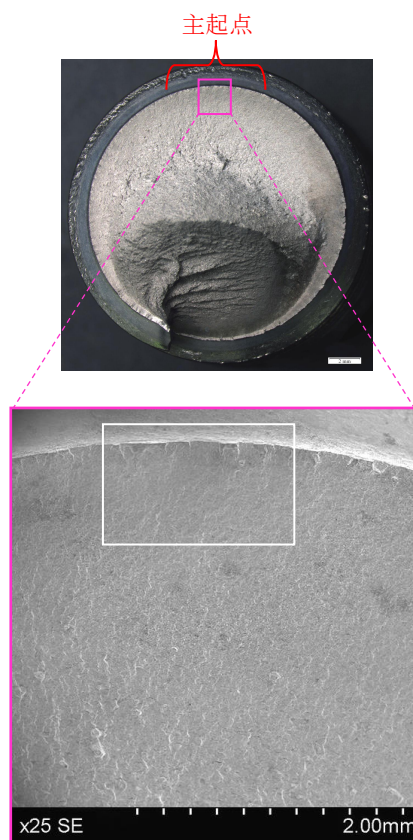


各種負荷形態における疲労破面の模式図

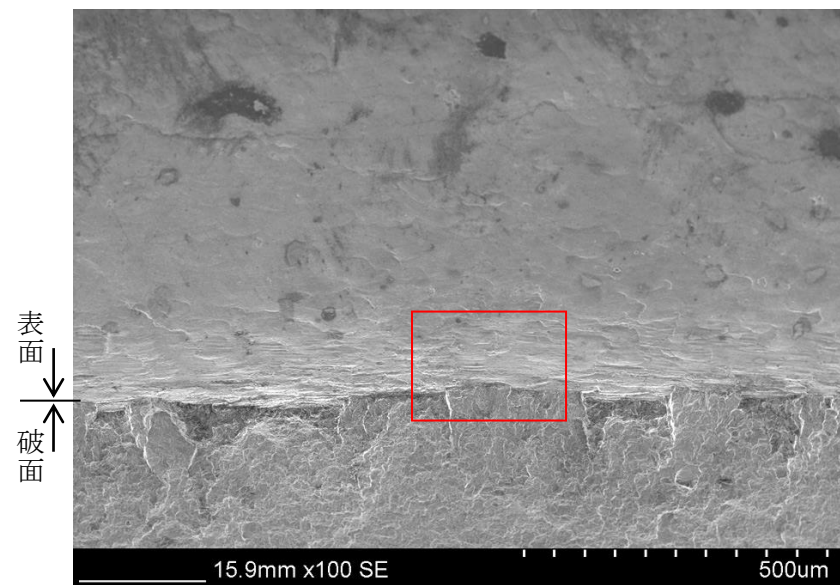


マクロ破面は、光源の種類や向きによって、大きく見え方が変わるため、注意が必要です。損傷要因を誤って判断しないためにも、弊社のような専門機関での破面解析を推奨します。

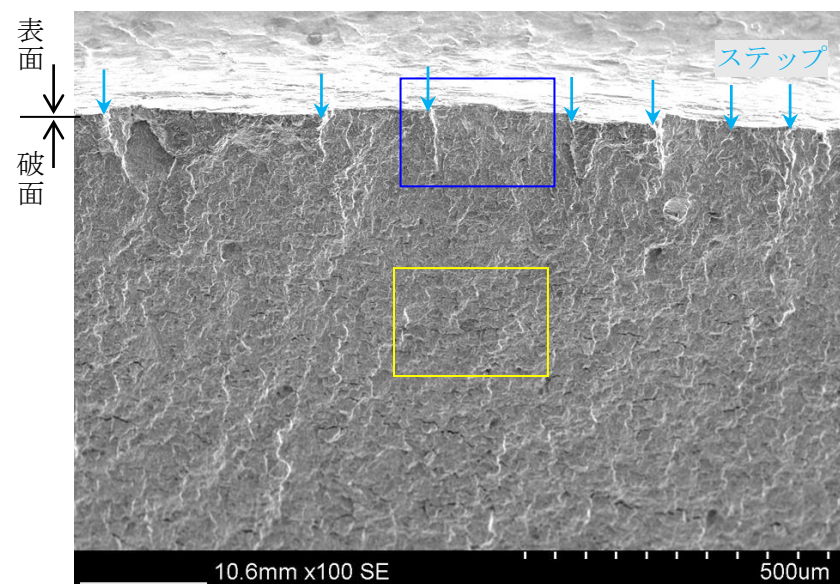
図 2 マクロ破面観察



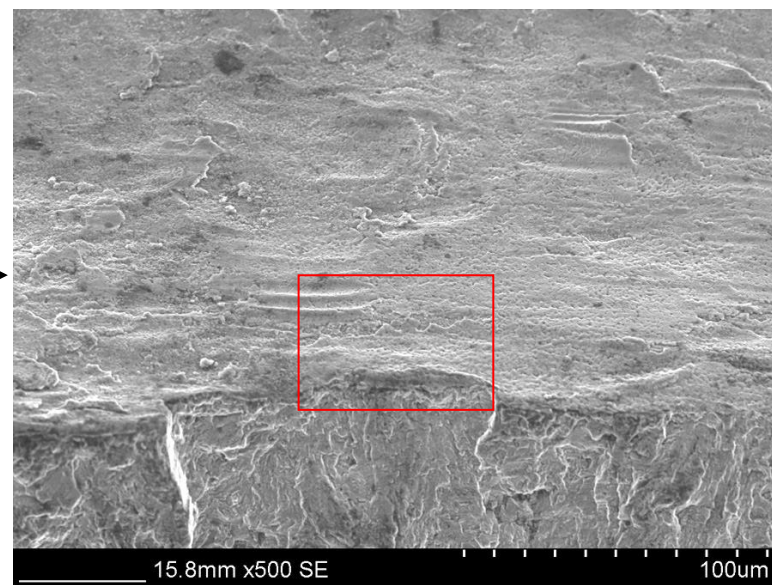
起点のSEM観察状況



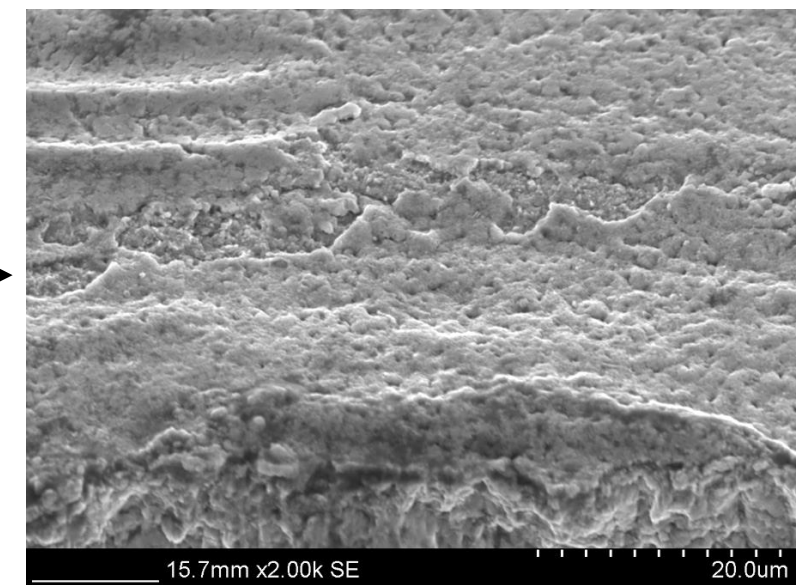
同下：起点部の表面拡大 ×80



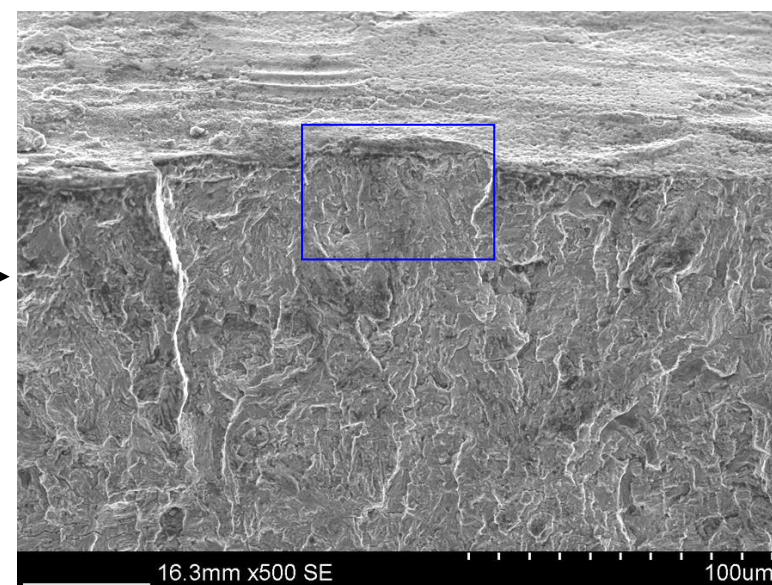
起点部の破面拡大 ×80



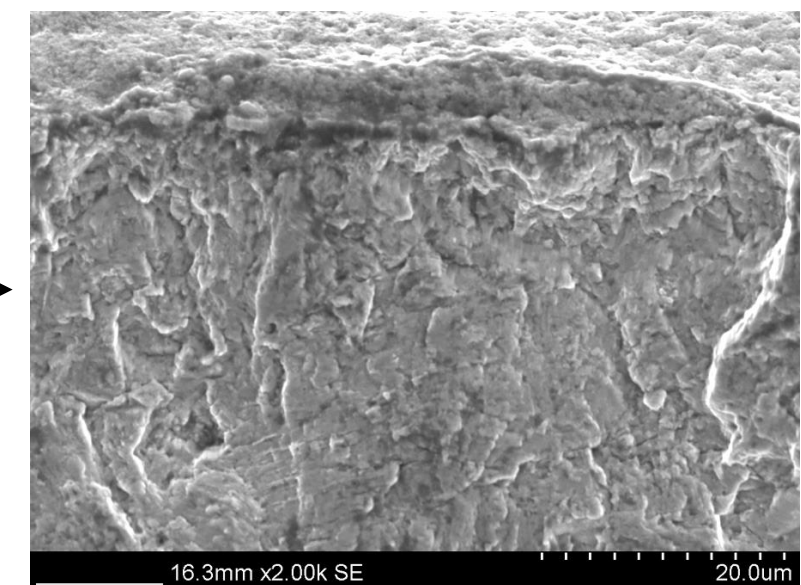
同左の拡大 ×400



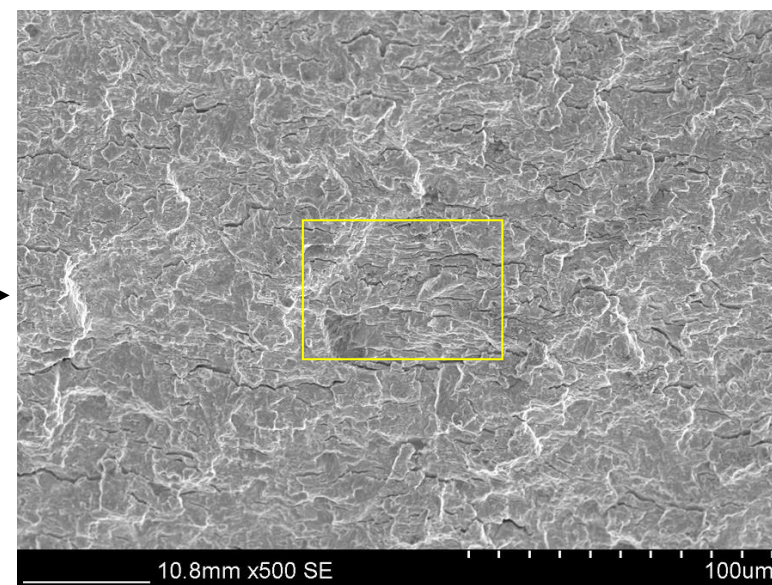
同左の拡大 【顕著な疵や腐食なし】 ×1600



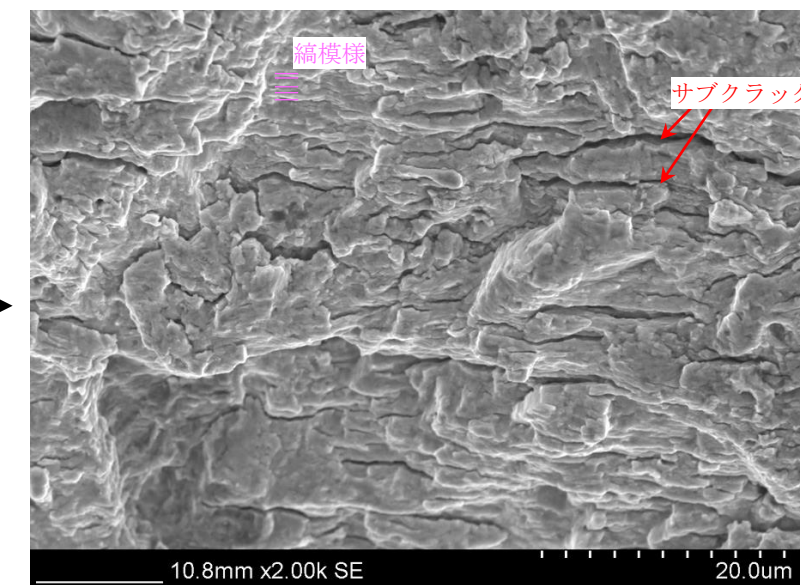
同左の拡大 ×400



同左の拡大 【金属組織に依存した模様】 ×1600



同左の拡大 ×400



同左の拡大 【ストライエーション状模様】 ×1600

- ・起点部の異常有無やマイクロ破面形態を確認するため、走査電子顕微鏡(SEM)で破面の拡大観察(マイクロ破面観察)を実施した。
- ・起点部である外周部には、マクロ破面でみられたステップが明瞭に観察され、多数箇所からき裂が発生したことが窺われる。
- ・ねじ底の表面は比較的なめらかで、有害と思われる顕著な加工疵や腐食ピットなどの異常はみられない。
- ・起点部直下の破面には、疲労破面に観察される“金属組織に依存した模様”や“ストライエーション状模様”が認められる。なお、サブクラック(破面での開口部)が散見されることから、比較的高応力なマイクロ疲労破面様相と推測され、マクロ破面形態とも符合する。
- ・なお高強度のボルトでは、遅れ破壊(水素脆化)が懸念されるが、その破面様相(粒界破面)はなく、遅れ破壊による破断の可能性はない。

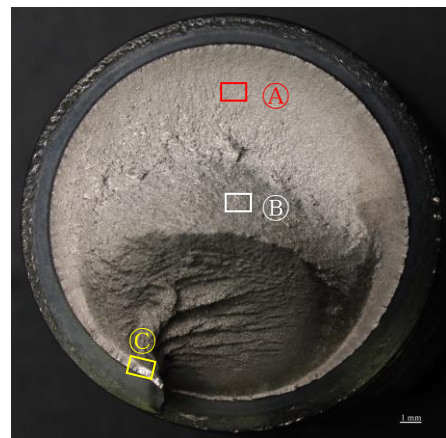
🔗 金属組織に依存した模様 (Structure-dependent pattern)

疲労破面に見られる尾根状の模様
き裂進展速度が比較的に遅い場合に観察される

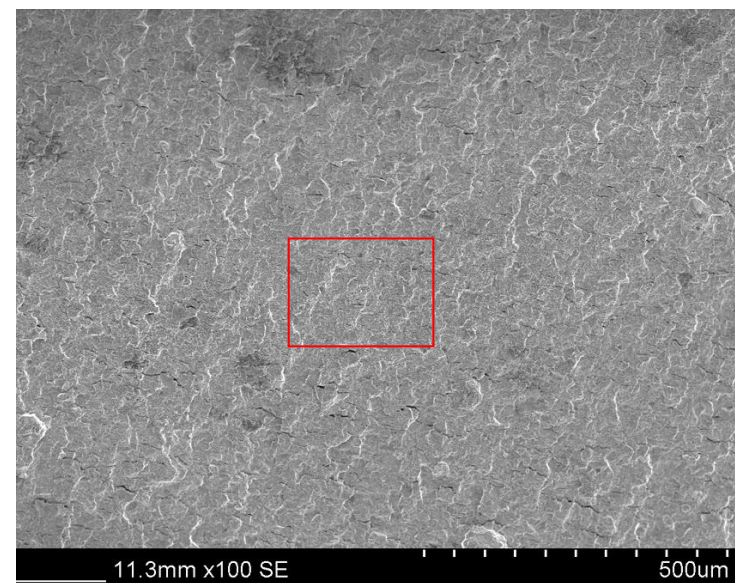
🔗 ストライエーション状模様 (Striation-like marking)

疲労破面に見られる縞模様、
応力サイクルに対応しない不規則な縞模様

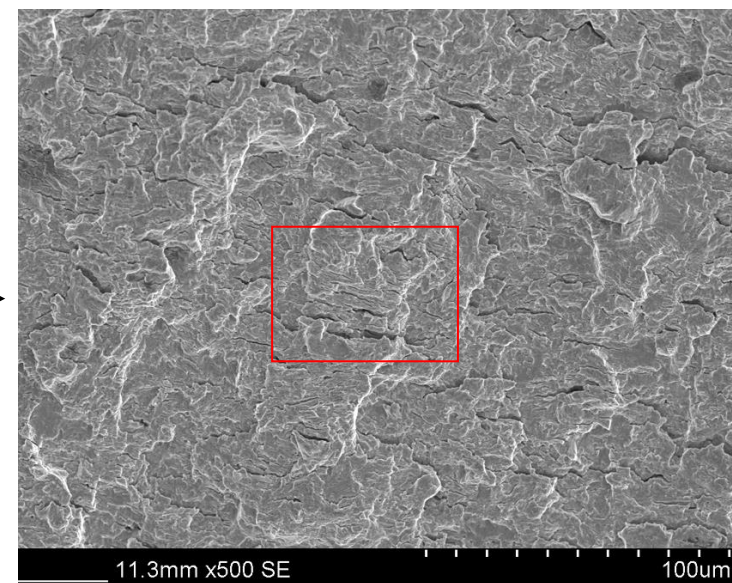
図 3-1 ミクロ破面観察



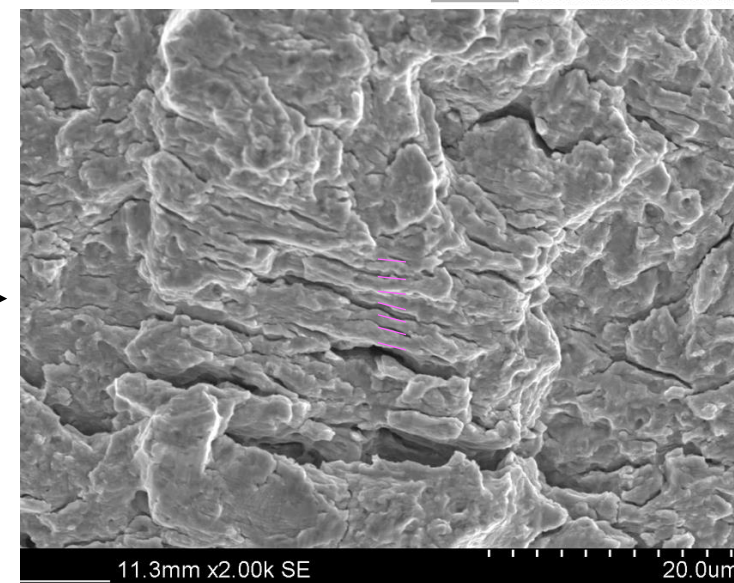
SEM 観察位置



①平坦部の拡大 ×80

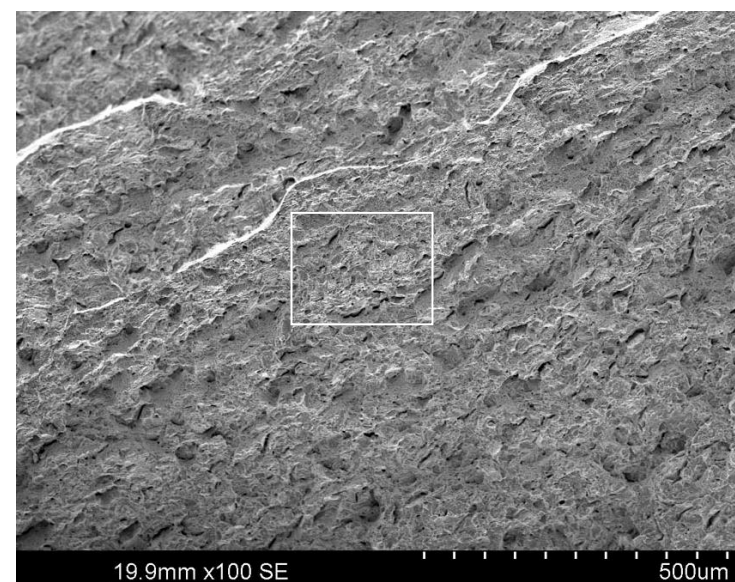


同左の拡大 ×400

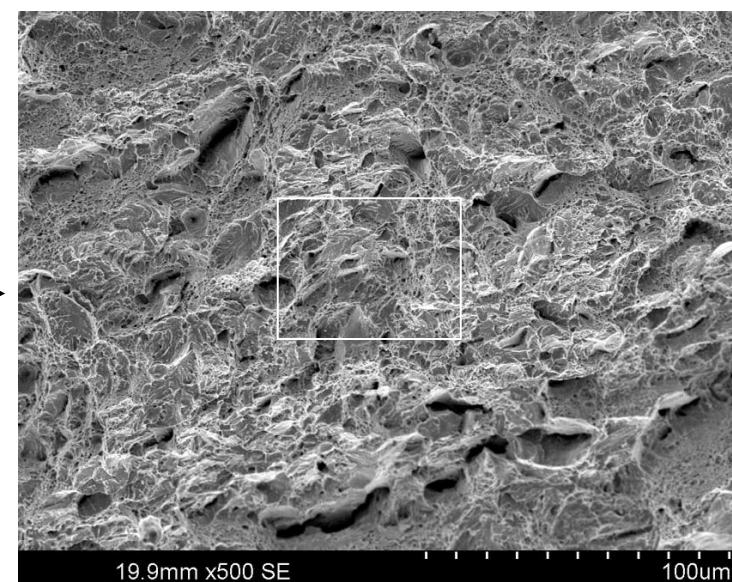


同左の拡大 ×1600
【ストライエーション状模様】

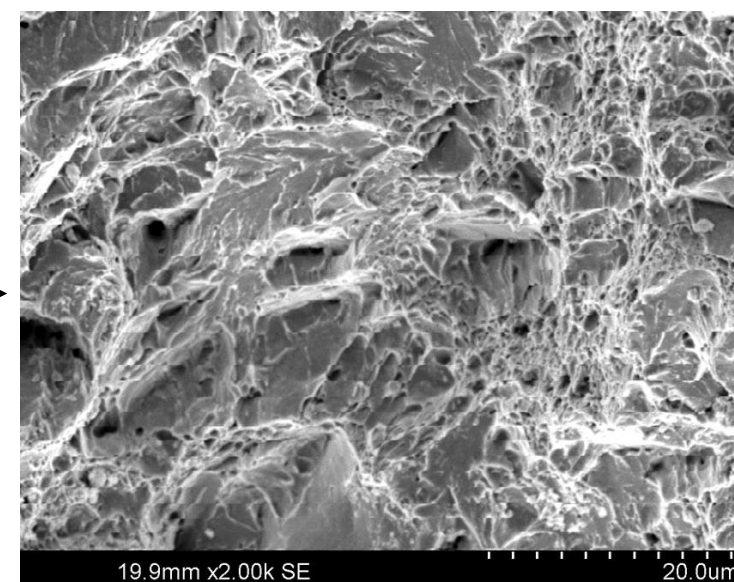
- ・き裂進展部についても、SEM 観察を行った。
- ・進展部ではストライエーション状模様が観察されることから、疲労損傷によりき裂が進展したことが判る。
- ・傾斜部には、延性破面であるディンプルが見られ、急進破壊部と追認される。
- ・主起点の反対側の外周でも、ねじ底から浅い疲労き裂が発生している。破面の擦れがやや多いが、疲労破面としては通常的に生じ得る擦れ具合である。



②傾斜部の拡大 ×80



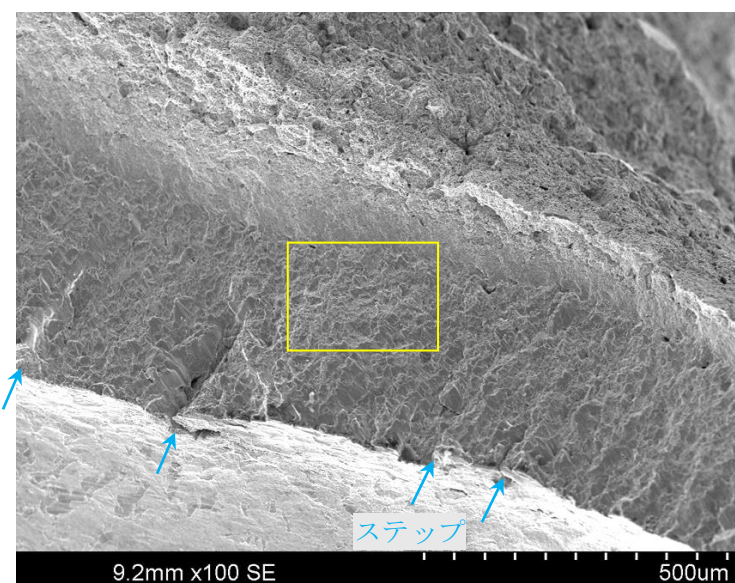
同左の拡大 ×400



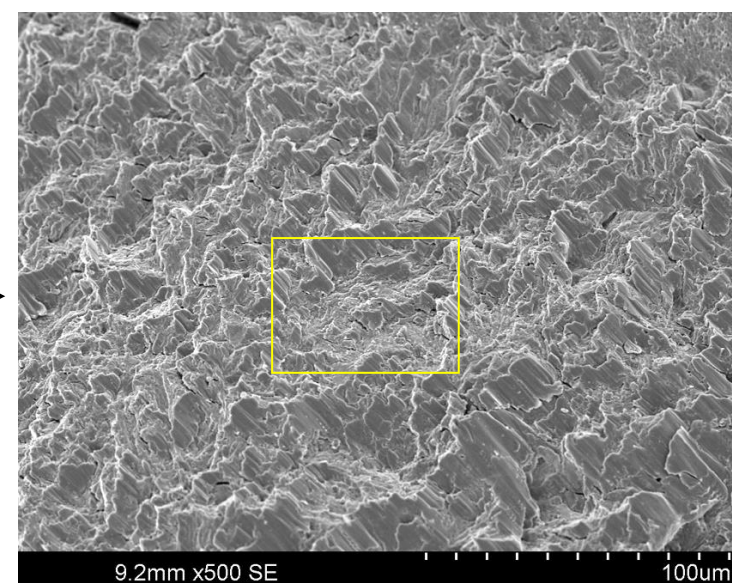
同左の拡大 ×1600
【ディンプル】



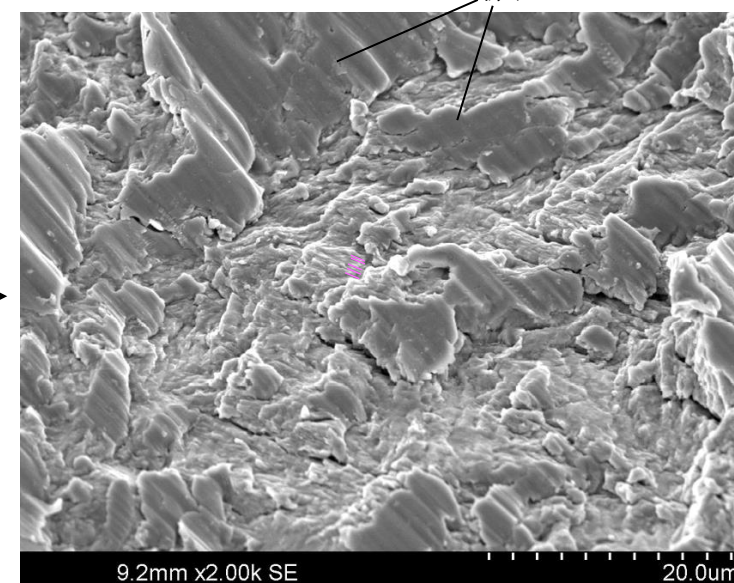
今回の破面は疲労試験で作製しているため、擦れや汚れが少ないですが、実機破断品の場合には、擦れに加え、腐食や破断後の二次的損傷などがあり、破面模様が不明瞭な場合が多いです。付図に典型的な破面模様を掲載していますが、このような明瞭な模様は観察されず、その痕跡から破壊形態を推測せざるを得ないことも往々にしてございます。



③180°側の外周部拡大 ×80



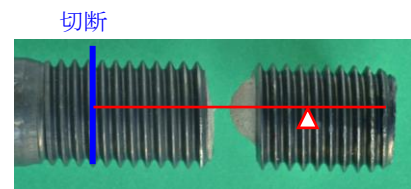
同左の拡大 ×400



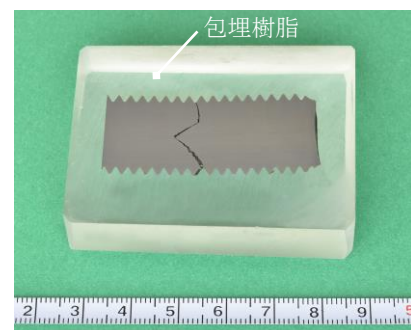
同左の拡大 ×1600
【ストライエーション状模様】

○ディンプル (Dimple)
延性破面に見られる“くぼみ模様”

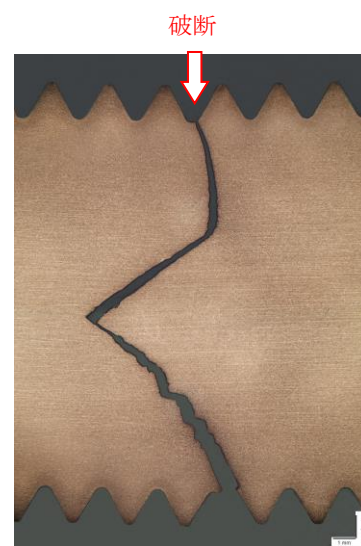
図 3-2 ミクロ破面観察



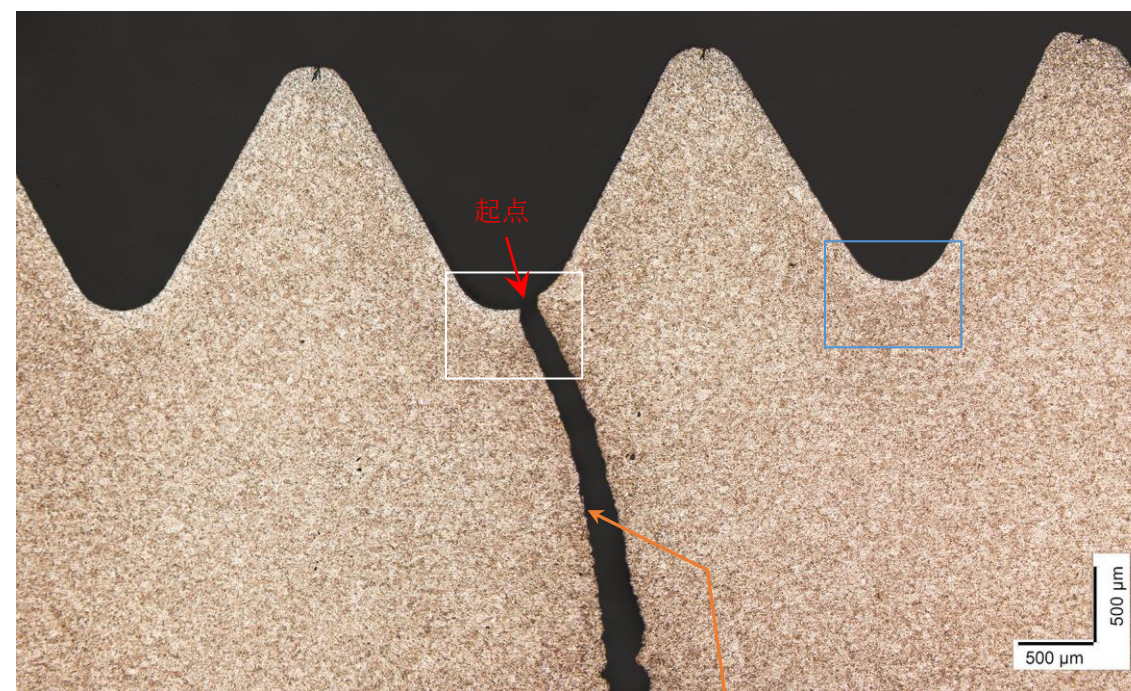
断面の観察方向



断面試料の作製状況



破断部の断面状況



ねじ部の断面マイクロ組織

×20



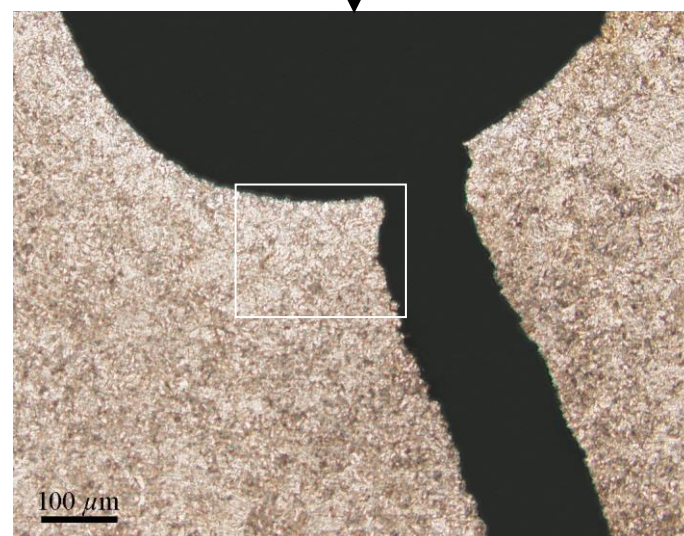
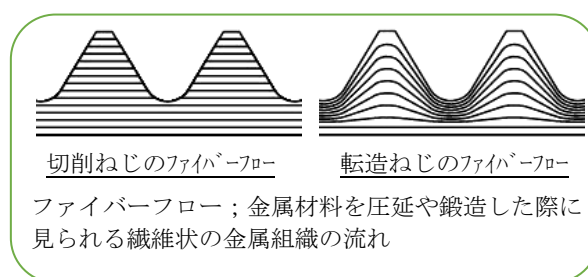
ねじ山部の拡大

×200



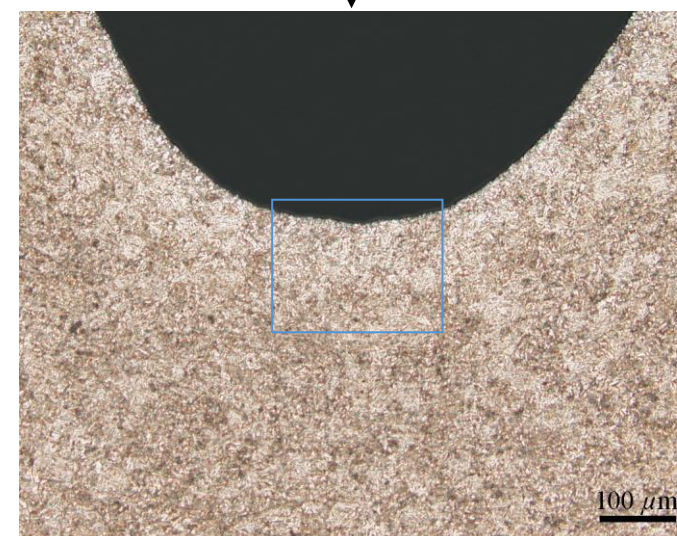
起点部に異常(ねじ部の場合、被さりや脱炭など)があると、き裂が発生しやすくなります。再発防止のため、断面観察や硬さ測定等を行い、材料性状を把握することを推奨します。

- ボルトの金属組織やねじ部の様相などを把握するため、断面組織観察を行った。
- ③き裂の断面は、比較的直線的で枝分かれもなく、疲労き裂進展の特徴を呈しており、断面観察からも疲労損傷と追認される。
- 起点であるねじ底や他のねじ底においても、顕著な加工疵や、脱炭、材料欠陥等の異常は認められない。
- ねじ部の組織は、表面に沿ってファイバーフローが流れており、④ねじ山には微細なシーム(転造加工時に生じる山頂の割れこみ)も見られることから、本ボルトは転造加工品と判断される。なおファイバーフローが不明瞭なことから、転造加工後に熱処理されたと考えられる。



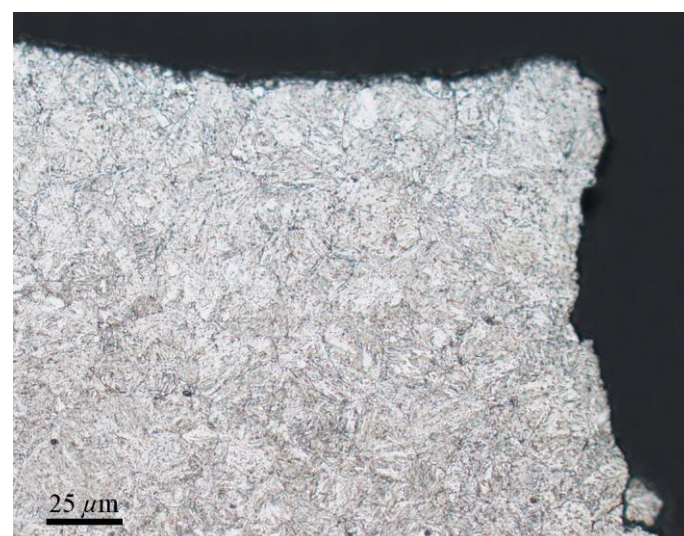
起点部ねじ底の拡大

×100



健全ねじ底の拡大

×100



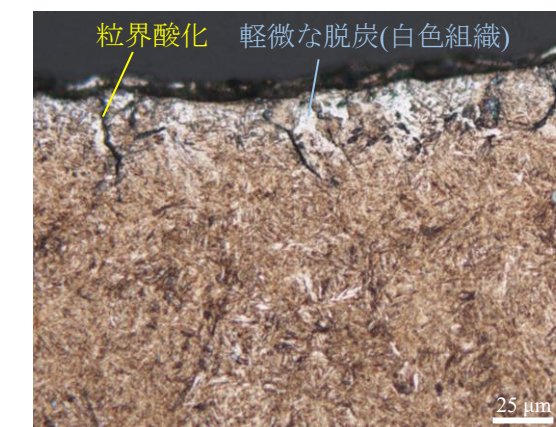
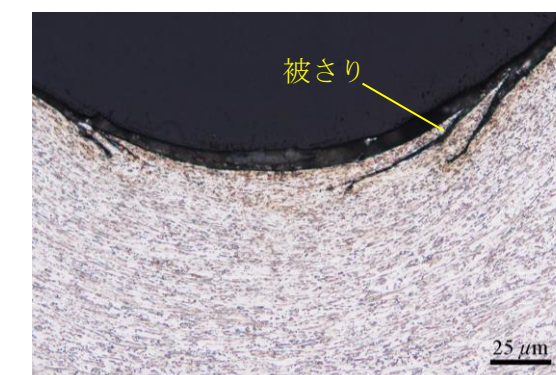
同上の拡大

×400



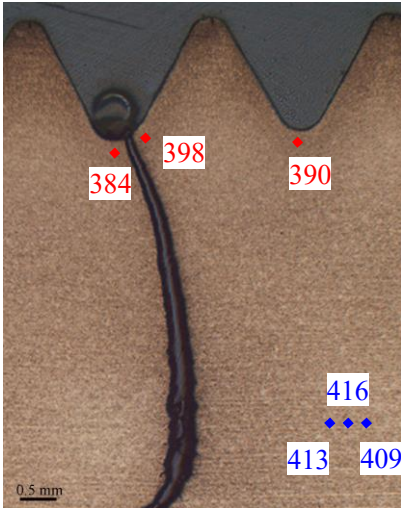
同上の拡大

×400



ねじ底の不具合例

図4 断面組織観察



ビッカース硬さ測定結果（HV0.3）

ビッカース硬さ測定結果

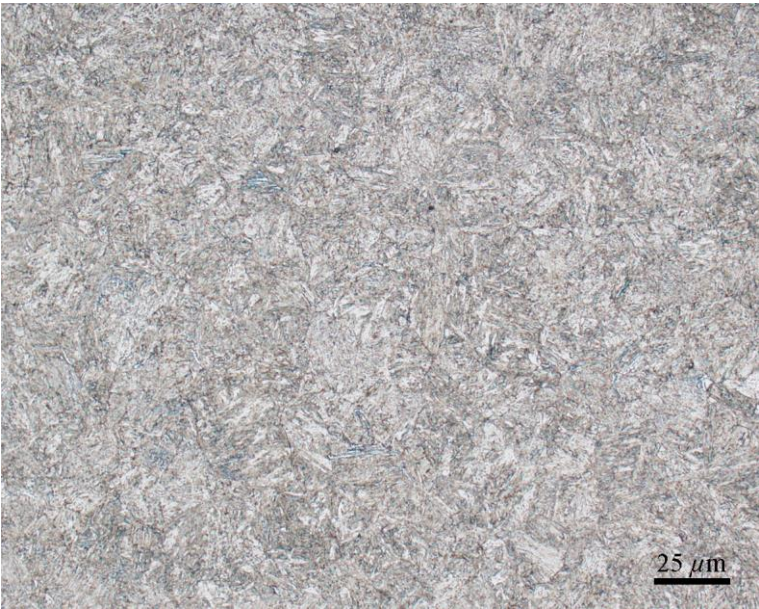
測定位置	硬さ値 HV0.3	平均
◆ ねじ底	384, 398, 390	391
◆ 芯部	413, 416, 409	413
JIS B 1051 : 2014	ビッカース硬さ, HV F≧98	強度区分 12.9 最小 385 最大 435

- ・試験力の選定は、ねじ底の硬さ値が把握できる条件とした。
- ・硬さ記号 HV0.3 は、硬さ試験力；2.942 N (300 gf)で試験したことを示す。



芯部のマイクロ組織

×100



同左の拡大

×400

- ・芯部のマイクロ組織は、“焼入れ焼戻し組織”を呈しており、熱処理不良などの特段の異常はない。硬さ測定結果も鑑みて、SCM435 の調質材(熱処理品)としては、一般的な組織性状と推測される。

- ・ボルトの機械的性状に異常がないか把握するため、ビッカース硬さ試験を行った。
- ・硬さ値は、起点部近傍で 384、398HV、健全部のねじ底で 390HV、芯部で 409～416HV である。
- ・芯部に比べて表層部ではやや低くなっており、表面処理(黒染め)の影響と考えられる。
- ・なお強度区分 12.9 での JIS 規格値と比べ、表層部で極僅かに下回った部分もあるが、顕著な異常はない。

- ・ボルトが SCM435 材として、化学成分に異常がないかをエネルギー分散型 X 線分析装置(EDS)で簡易的に分析を行った。
※EDS 分析は、C などの低元素の定量が難しく、湿式分析に比べ精度が低めというデメリットがあるものの、多元素同時分析(分析が簡便で短時間)の長所があり、凡その成分把握には十分な分析法である。
- ・EDS 半定量分析の結果、ボルトは SCM435 の化学成分を概ね満足しており、材質間違いなどの特段の異常はない。

今回の破断は、ボルトのねじ底からの疲労損傷によるものです。そのため、損傷要因の考察には、ねじ底の機械的強度の把握が重要となります。引張試験やロックウェル硬さ測定は、局所的な強度把握には不向きなのに対し、ビッカース硬さ測定は局所的な測定や、サンプルサイズが小さく強度測定用試験片が採取できない場合等の強度把握に有効な試験法です。なお硬さ値は、引張強度や疲労強度と相関がある物性値となります。

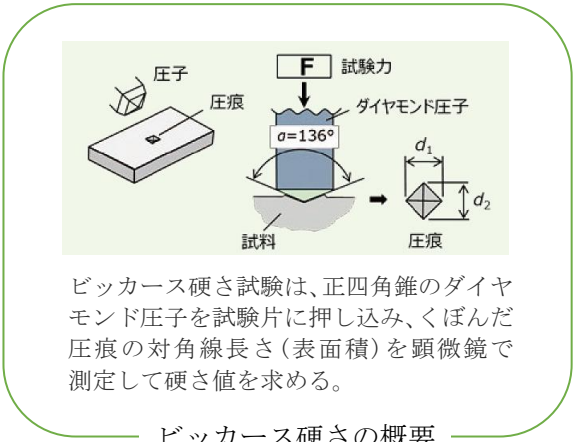
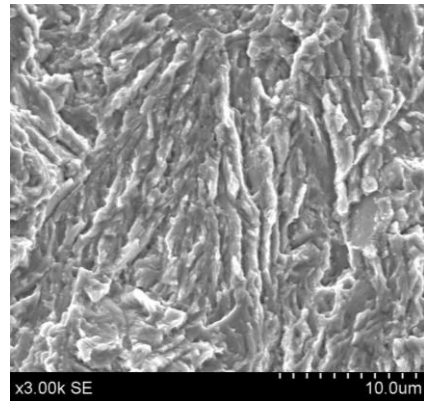


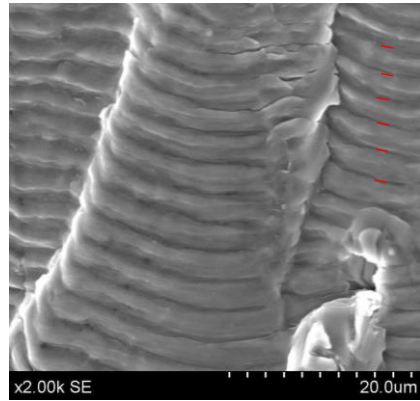
図 5 ビッカース硬さ測定および EDS 分析

疲労破面の例



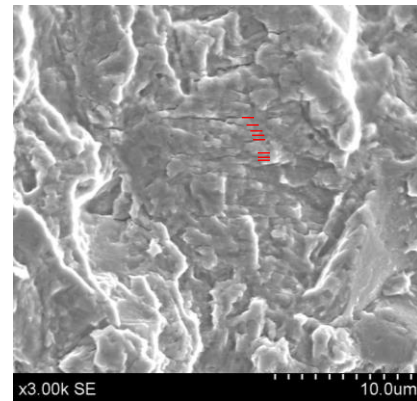
金属組織に依存した模様

疲労破面に見られる尾根状の模様，き裂進展速度が比較的遅めな場合に観察される



ストライエーション

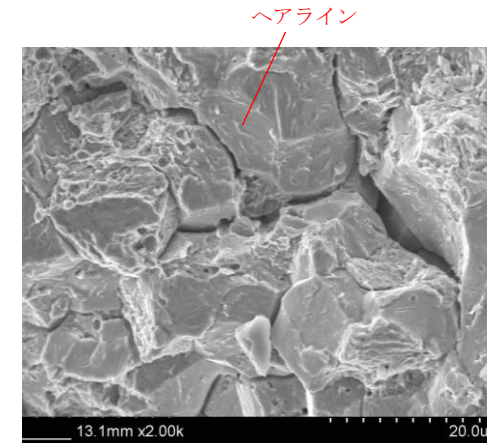
疲労破面に見られる規則的な縞模様，縞間隔は，応力サイクルに対応する



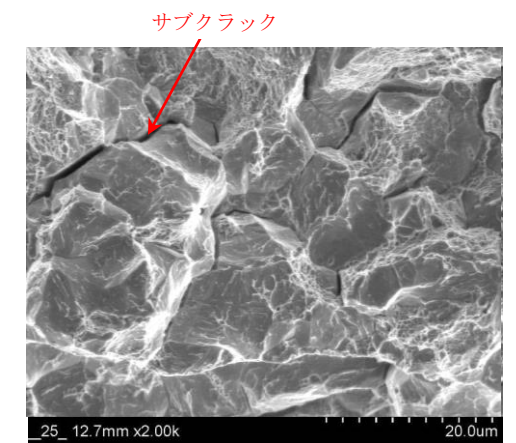
ストライエーション状模様

疲労破面に見られる不規則な縞模様，応力サイクルに対応せず，不明瞭な場合も多い

水素脆化破面の例



ヘアライン

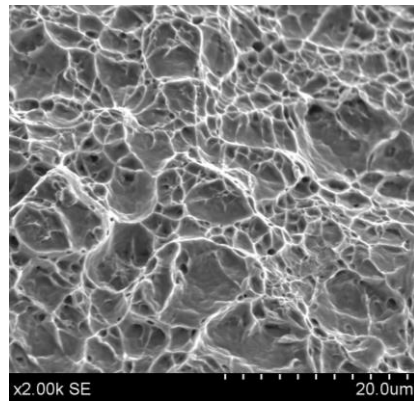


サブクラック

粒界破面

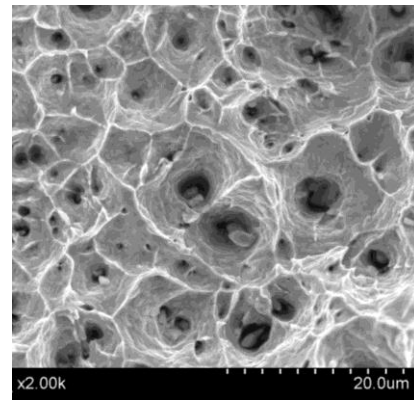
遅れ破壊(水素脆化割れ)は，材料が水素を吸収して脆性破壊する現象のことで，強度区分 10.9 以上のボルトなどの高強度鋼に起こり易いと言われている。遅れ破壊に関わる水素としては，製造段階での酸洗いや，電気めっき，使用中の腐食などが挙げられる。破面形態は，粒界破面を呈することが多く，ヘアラインやサブクラックを伴うのが特徴である。

延性破面の例

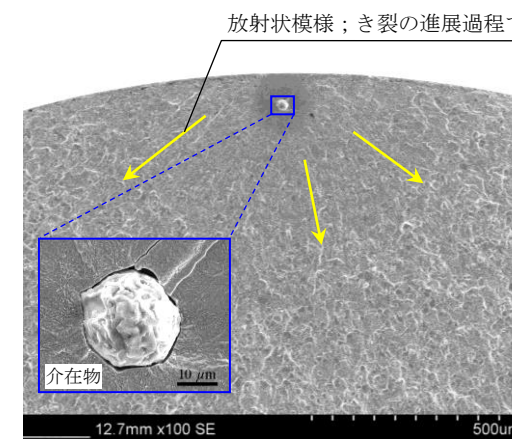


ディンプル

延性破面に見られる多数の小さな“くぼみ”，延性破壊における変形の過程で，材料中の介在物や析出物が核となって微小空洞(ポイド)が形成し，それらが成長・合体することでクレーター状の破面様相が形成される

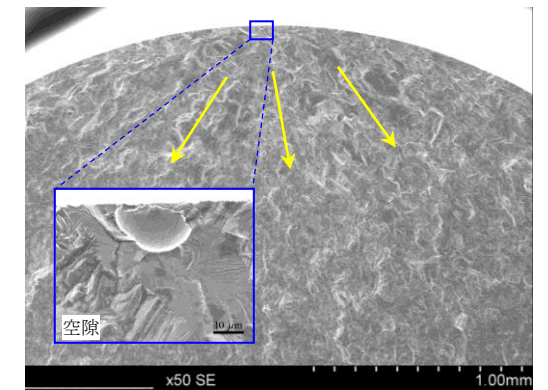


欠陥起点の例



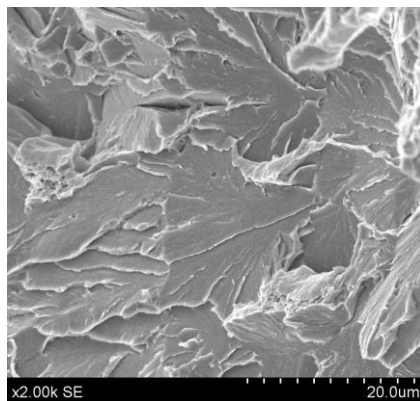
放射状模様；き裂の進展過程で生じる模様，進展方向に平行な段差

介在物



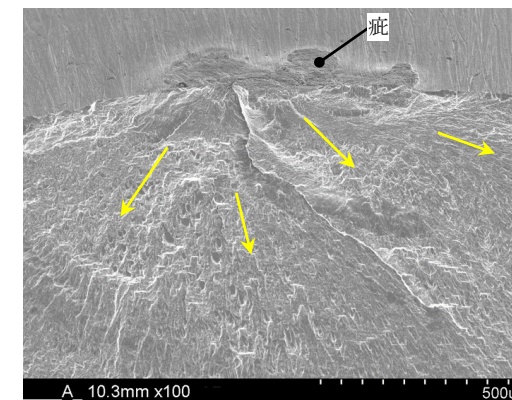
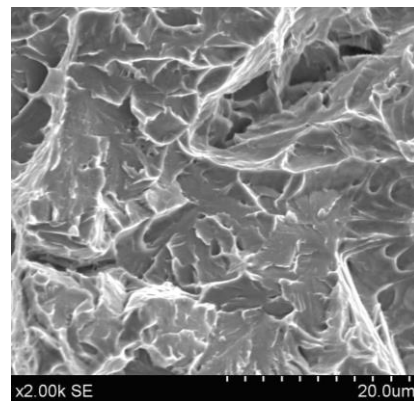
空隙

脆性破面の例

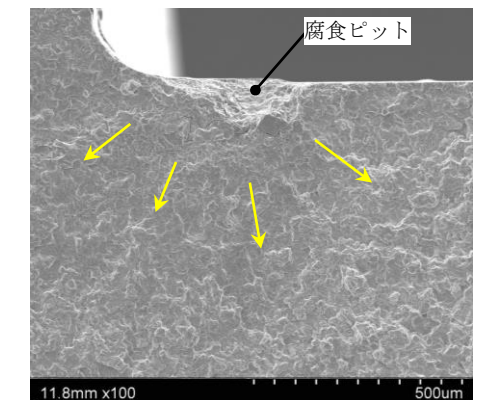


へき開破面、擬へき開破面

脆性破面に見られる河川模様、へき開面での割れは、リバーパターン(へき開破面)と呼ばれるが、へき開面に沿った破壊であるかどうか明瞭でない場合には擬へき開破面とされる



疵



腐食ピット

欠陥起点

材料に粗大な介在物や空隙、表面に疵や腐食ピットなどが存在すると，当該部に応力集中が生じ，き裂(破断)が発生しやすくなる。延性破壊では応力集中は殆ど影響しないが，疲労破壊や脆性破壊では，これらの影響が顕著となる。破面においては，応力集中部(欠陥起点)からの放射状模様などが観察されることが多い。上に示す写真は，単一起点で，欠陥から優先的にき裂が発生した様相が窺える。