破壊の基礎

ものづくり基礎講座(第53回技術セミナー) 『金属の魅力をみなおそう 第三弾 観察・分析編 第四回』

東北大学金属材料研究所 正橋直哉

masahasi@imr.tohoku.ac.jp

2018. Feb. 2 14:05~14:35



クリエイション・コア東大阪 南館3階 技術交流室A





- 2. 金属の破壊とは
- 3. 延性破壊
- 4. 脆性破壊
- 5. 疲労破壊
- 6. 破壊力学と破壊靭性



様々な破壊事例

『金属の魅力をみなおそう 第4回 破壊』 2018 Feb. 2 14:05~14:35 東北大学 正橋直哉





1943年1月16日溶接構造船(リパティシップ)の亀裂破壊



1988年4月28日機体外壁損壊したALOHA航空243便



1995年1月17日阪神淡路大震災で落橋した3号神戸線



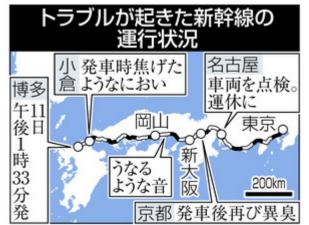
2011年3月11日東北地方太平洋沖地震で損壊した自家用車

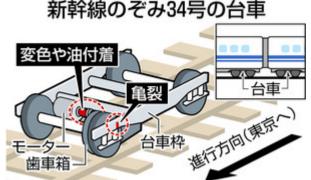


新幹線車両台車の亀裂事故

『金属の魅力をみなおそう 第4回 破壊』 2018 Feb. 2 14:05~14:35 東北大学 正橋直哉









http://www.tokyo-np.co.jp/article/national/list/201712/CK2017121302000124.html

〇小倉駅発車時、7、8号車付近でパーサーおよび客室乗務員より「焦げたようなにおいがする」との申告があり、車掌による車内点検を行いました。車掌はその旨を東京指令所の指令員に報告しました。

O14:30 頃、指令員が岡山支所に対して車両保守担当社員の出動を指示しました。

〇福山〜岡山駅間走行中、パーサーがお客様(30代男性)から 13 号車車内にモヤがかかっている旨の申告を受けました。パーサーからの報告を受けた車掌長は指令員に報告しました。

〇岡山駅から車両保守担当社員が添乗して確認したところ、13~14 号車間で「うなり音」を確認しましたが、指令員とのやりとりのうえ、指令員が走行に支障するような音ではないと認識し、運転を継続しました。においは若干ありましたが、継続的なものではございませんでした。

〇車掌は、<u>においがしたりしなかったりという状況だったとのことであり</u>、運転に支障がある 状況とは認識しておりませんでした。

車両台車亀裂事故の報告

『金属の魅力をみなおそう 第4回 破壊』 2018 Feb. 2 14:05~14:35 東北大学 正橋直哉



1 概要

2017年12月11日(月曜日)、「のぞみ34号」〔博多駅(13時33分)発 東京駅 (18時33分) 行き 16両編成〕において、走行中に異臭と床下からの異音を認めたため、17時3分ごろ、名古屋駅で床下点検を実施しました。点検の結果、13号車歯車箱付近に油漏れを認めたため、前途運休としました。

また、その後の点検において、当該台車に亀裂および継手の変色が確認されました。

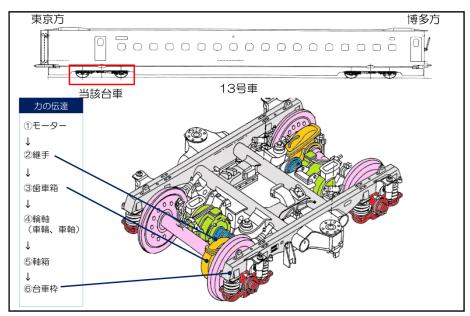
- 2 車両に関する事実
 - O 当該車両:弊社所有車両 N700系16両編成(N700Aへの改造車)
 - 車両状態:13号車東京方の台車で次の内容を確認しました。
 - 台車枠の一部に亀裂
 - ・継手の変色および油脂の付着
 - ※注釈:継手とは、モーターの回転を歯車に伝達するためのもの
 - ・歯車箱への油脂の付着(歯車箱内の油量は正常)
 - ※注釈:歯車箱とは、継手からの動力を車輪に伝える歯車を収めた箱

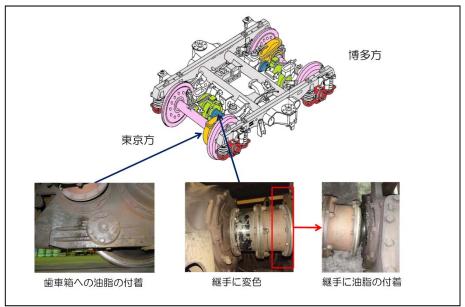


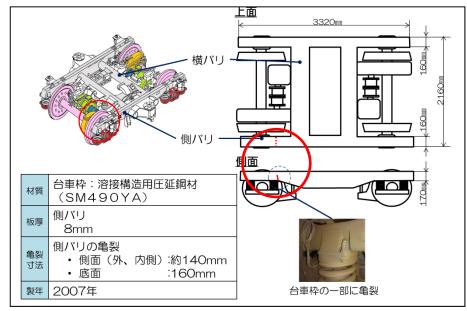
車両台車亀裂の詳細

『金属の魅力をみなおそう第4回 破壊』 2018 Feb. 2 14:05~14:35 東北大学 正橋直哉











https://www.westjr.co.jp/press/article/items/171219_01_betu1.pdf

車両点検対策

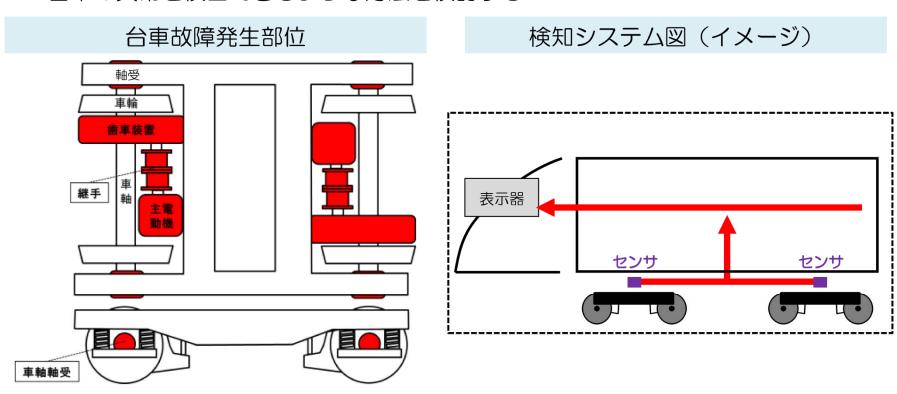
『金属の魅力をみなおそう 第4回 破壊』 2018 Feb. 2 14:05~14:35 東北大学 正橋直哉



〇 走行中の車両の異常検知の検討

車上からの異常検知

台車の異常を検出できるような方法を検討する



地上からの異常検知

台車の異常を検出できるような方法を検討する



車両台車事故について考える

『金属の魅力をみなおそう 第4回 破壊』 2018 Feb. 2 14:05~14:35 東北大学 正橋直哉



SM490YA 溶接構造用圧延鋼材 (JIS3106)

- ●Cを抑え溶接性を考慮した、高降伏強度鋼材
- (1) 鋼板・鋼帯・形鋼・平鋼
- (2) 適用厚さ100 mm 以下
- (3) $C \le 0.20$, $Si \le 0.55$, $Mn \le 1.65$, $P \le 0.035$, $S \le 0.035$
- (4) 降伏点≧325 N/mm² (t ≧ 75 mm) 引張強さ≧490~610 N/mm² (t ≦100 mm) 伸び≧ 21 % (t ≧ 40 mm)

油漏れによるトラブル

- ●1991年9月30日 ひかり291号5号車前から2個 目の車輪が固着し、東京から三島までレール上 を滑ったため磨耗し、平部は30センチに達する。
- ☞ギアボックスの油漏れによる故障が原因。
- ●1992年6月15日 100系V3編成11号車の車軸付 近から大量の油漏れが発見。



- (1) 破壊の詳細が不明だが繰返荷重による疲労 破壊の可能性が高い。
- (2) 新幹線台車検査の省令は60万キロあるいは 1.5年以内なので1年近くは公的検査なし。



- (1) 「焦げた臭い」「もや」はギヤボックスか ら漏れた油が焼付・揮発した可能性がある。
- (2) 油の枯渇はギヤボックスの破損に由来し、 車軸に力がかかったため台車を破損か。

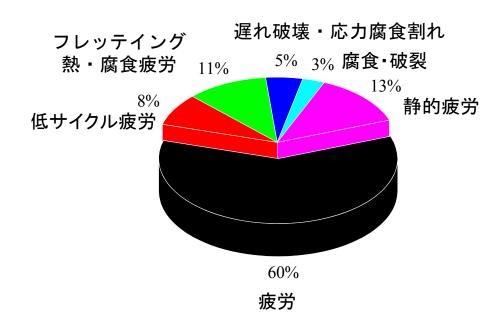
金属の破壊とは

『金属の魅力をみなおそう 第4回 破壊』 2018 Feb. 2 14:05~14:35 東北大学 正橋直哉



材料を2つ以上に分離し、材料にかかる負荷がゼロになるような変形をいう。原子レベルでは格子間距離(10-8cm)の領域で、微視的には結晶粒サイズ(約10-3cm)の領域で、巨視的には割れや切欠(10-1cm)以上の大きさの領域で起こる。

破壊の原因別分類

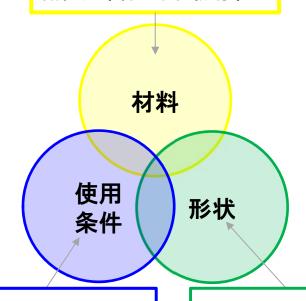


破壊の約80%の原因は疲労破壊

http://www.me.tokushimau.ac.jp/zairyoukyoudo/M 22/No1%20Fracture%20of%20materials.pdf

破壊を支配する三つの要因

強度、靱性、加工性 剛性、環境・不純物効果.....



荷重、温度、不純物. 疲労(振幅·繰返数)... 応力集中、切欠け、 板厚、表面凹凸.....

破壊の原因

『金属の魅力をみなおそう 第4回 破壊』 2018 Feb. 2 14:05~14:35 東北大学 正橋直哉



① 材料に起因する要因

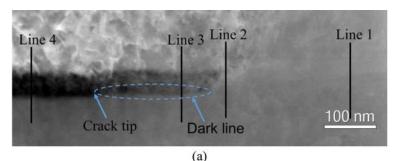
強度(剛性率)、組織(粗大粒、高エネルギー粒界...)、脆化元素の粒界偏析...

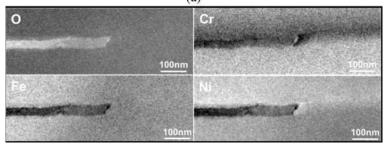
② 使用条件(環境)に起因する要因

温度(高温、低温)、不純物(水素、塩素等)、疲労(負荷応力、繰返し数、応力比)...

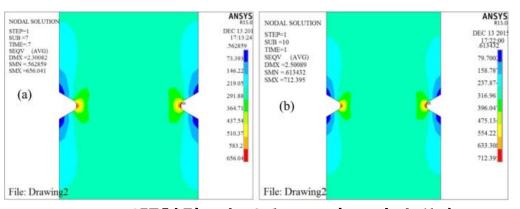
③ 形状に起因する要因

応力集中(Rなどで集中を回避)、引張残留応力(圧縮力を付与)...





Ni**超合金のクラック先端部の**TEM**像** Corrosion Science, (2018) in press



A356の引張試験におけるノッチ部の応力分布 (左)室温(YS=230MPa), (右)-80℃(YS=251MPa)

Mater. Sci. Eng. A, 667(2016)459-467

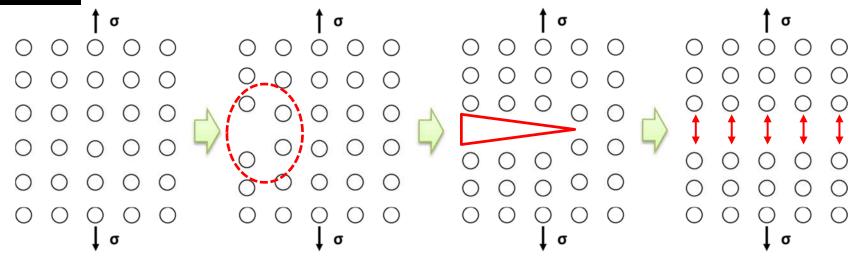


破壊の微視的現象

『金属の魅力をみなおそう 第4回 破壊』 2018 Feb. 2 14:05~14:35 東北大学 正橋直哉



引張破断



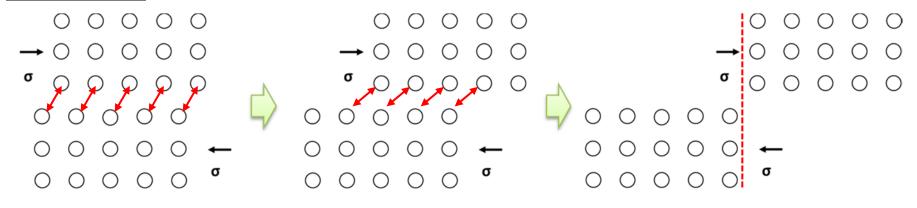
引張変形

最弱の結合が切れる

亀裂の進展

破断

せん断破断



せん断変形

ずれによる塑性変形の拡大

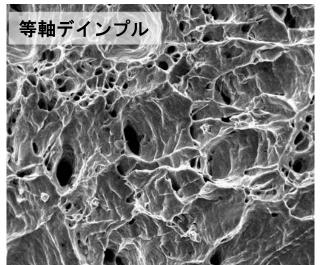
破断

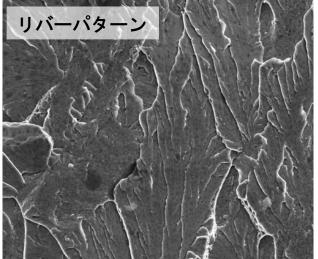


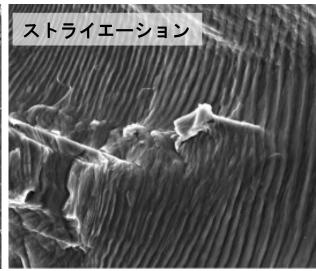
特徴的な破壊組織

『金属の魅力をみなおそう 第4回 破壊』 2018 Feb. 2 14:05~14:35 東北大学 正橋直哉





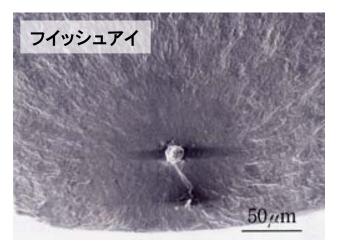




http://www.atengineer.com/pr/panasonic_aec/20140220001.html

Scripta Mater., 68 (2013)277-280





SUP7鋼の長期常温疲労試験

http://www.nims.go.jp/jpn/nimsnow/Vol4/2004-06/



破壊の分類

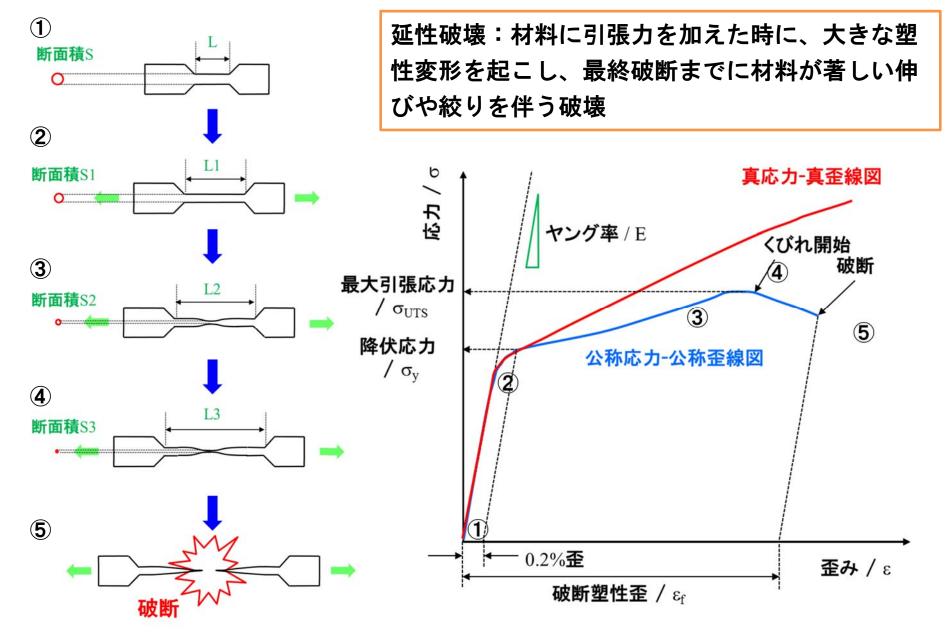
『金属の魅力をみなおそう 第4回 破壊』 2018 Feb. 2 14:05~14:35 東北大学 正橋直哉



破壊様式		破面の特徴	
		マクロ	ミクロ
延性破壊		鈍い灰白色 シェアーリップ:せん断破壊 最終破断部	等軸デインプル:引張試験 伸長デインプル:せん断試験 うねった縞模様:すべり面破壊
脆性破壊		キラキラした銀白色の反射 シェブロンパターン(山形模様): 粒内型急速破壊、亀裂の進展方向 放射状模様:亀裂の進展方向	劈開破面:き裂進展速度が速い ぎ劈開破面:き裂進展速度が遅い リバーパターン 粒状破面
疲労破壊		ビーチマーク(貝殻状模様) ラチェットマーク:複数の応力集中箇所 フイッシュアイ:破壊の起点 放射状模様:亀裂の進展方向	ストライエーション: 応力サイクルと対応 二次クラック ラブマーク又は無特徴破面
環境破壊	水素脆性	キラキラした銀白色の反射	粒状破面 ヘアマーク
	応力腐食割れ	部分的な反射 発錆変色	粒状破面 羽毛状模様
	高温破壊		粒状破面 デインプル 引け巣





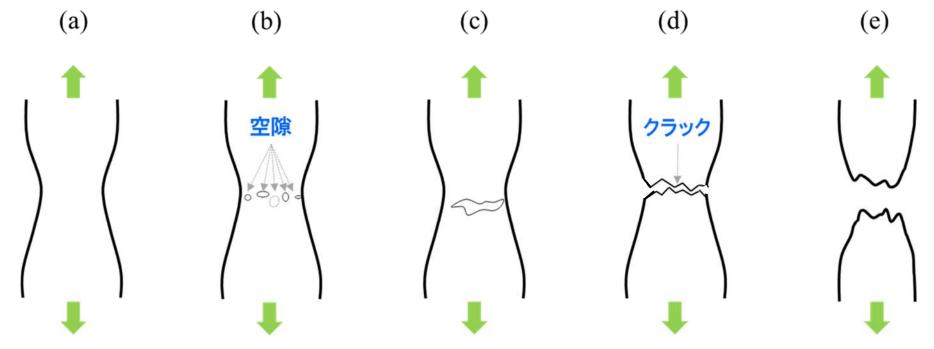


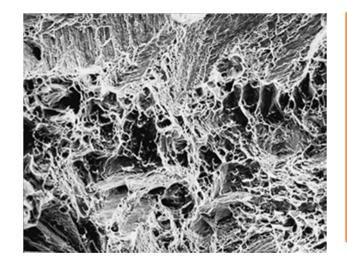


延性破壊の破面

『金属の魅力をみなおそう 第4回 破壊』 2018 Feb. 2 14:05~14:35 東北大学 正橋直哉







【特徴】

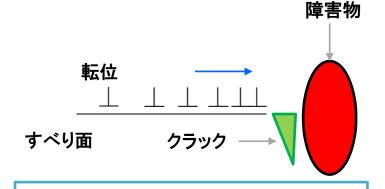
巨視的には引張方向に垂直で、微小の凹凸がある繊維状破面(カップアンドコーン)が観察できるが、ミクロ的にはせん断や引き裂きによりジグザグにき裂が伝播んした結果、伸長形ディンプルが特徴となる。



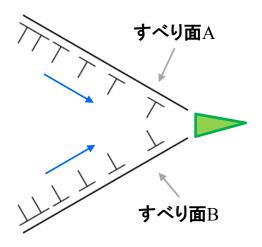
延性破壊の理論

『金属の魅力をみなおそう 第4回 破壊』 2018 Feb. 2 14:05~14:35 東北大学 正橋直哉

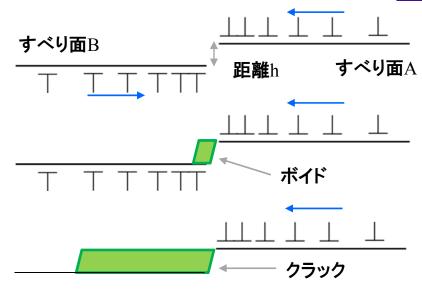




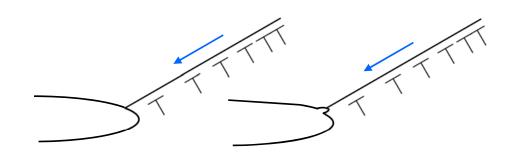
すべり面上を運動した転位が<mark>障害物で集</mark> 積し応力集中を生じ、クラックを生成



異なるすべり面上を運動した転位が、すべり面の 交差点で集積し、応力集中によりクラックを生成



距離 h 離れたすべり面上を正と負の転位群が衝突し、 徐々に反応して空隙を形成し、成長しボイドになる



ボイド表面に転位が供給されることで、原子レベルの 体積増加が起こりボイドが成長

ディンプルと介在物

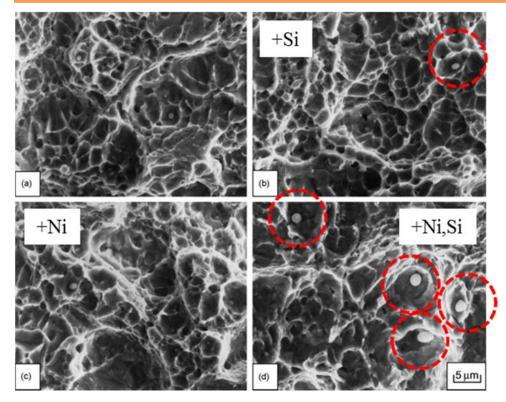
『金属の魅力をみなおそう 第4回 破壊』 2018 Feb. 2 14:05~14:35 東北大学 正橋直哉



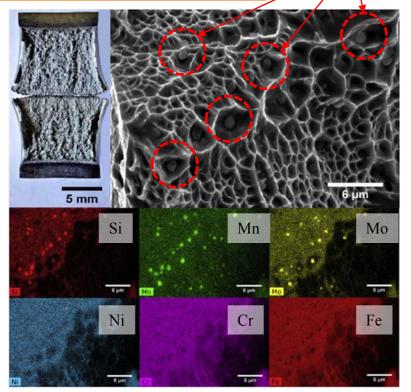
- ① 介在物の周りに空隙が生じる。
- ② 空隙が拡大し、隣接する介在物から同様に生じた空孔と連結する
- ③ その結果、き裂が生じ、繰り返されて最終破断に至る

☞ 破面には空孔が連結した痕跡があり、中心には介在物が存在する。

Moを含む Mn, Si酸化物



Fe-0.39C-1.47Ni-1.01Cr-0.49Mn-0.01Si-0.005S-0.008P Mater. Sci. Eng. A, 505 (2009) 52-61



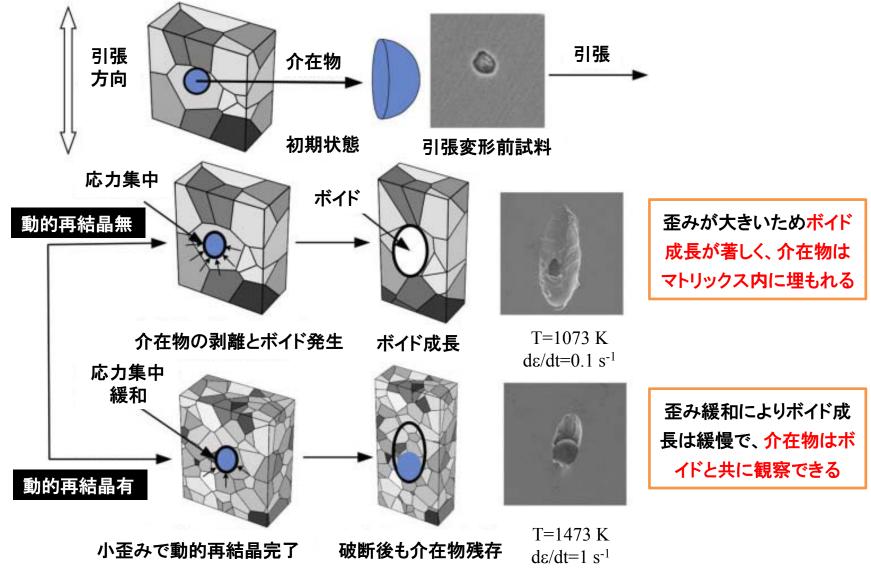
Fe-0.02C-10.7Ni-0.19Cr-1.02Mn-0.74Si-2.29Mo-0.05V J. Nucl. Mater. 499 (2018) 182-190



延性破面における介在物の役割

『金属の魅力をみなおそう第4回 破壊』 2018 Feb. 2 14:05~14:35 東北大学 正橋直哉



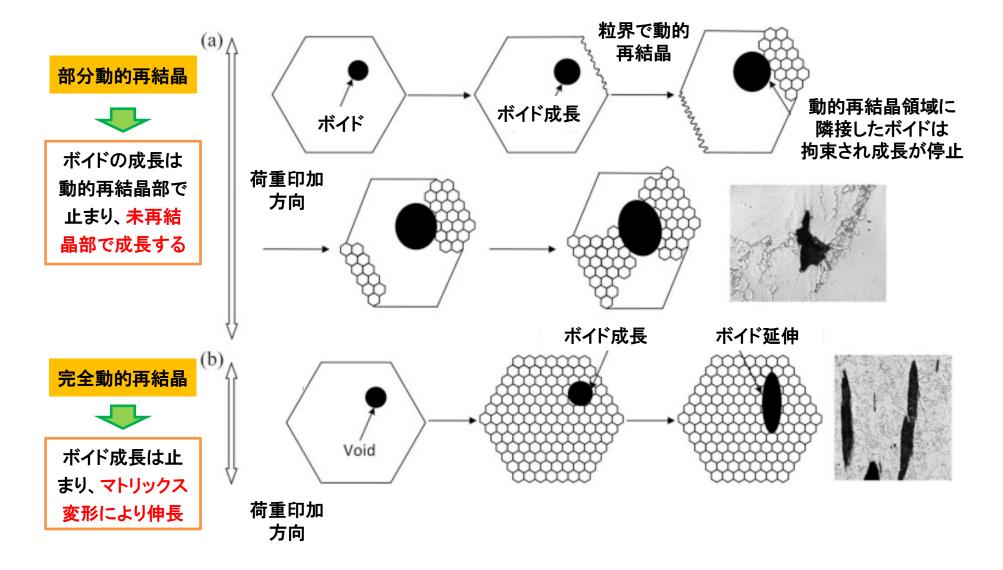




動的再結晶とボイドの成長

『金属の魅力をみなおそう 第4回 破壊』 2018 Feb. 2 14:05~14:35 東北大学 正橋直哉



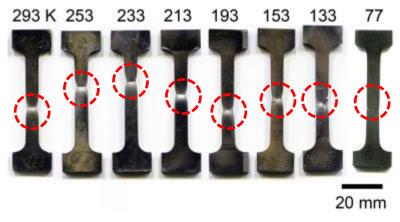




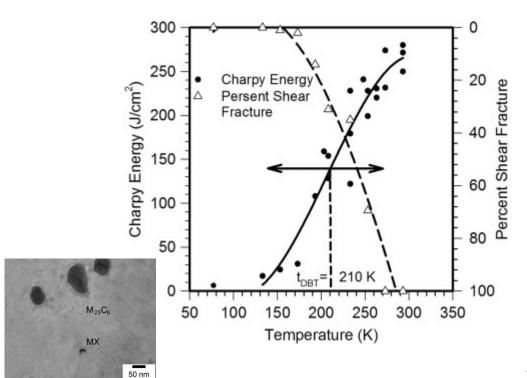
破壊の温度依存性

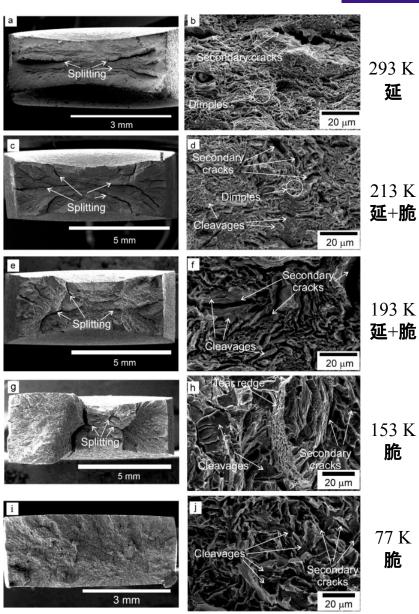
『金属の魅力をみなおそう 第4回 破壊』 2018 Feb. 2 14:05~14:35 東北大学 正橋直哉





Fe-0.1C-0.17Si-0.54Mn-8.75Cr-0.21Ni-0.51Mo-1.60W-0.23V-0.07Nb





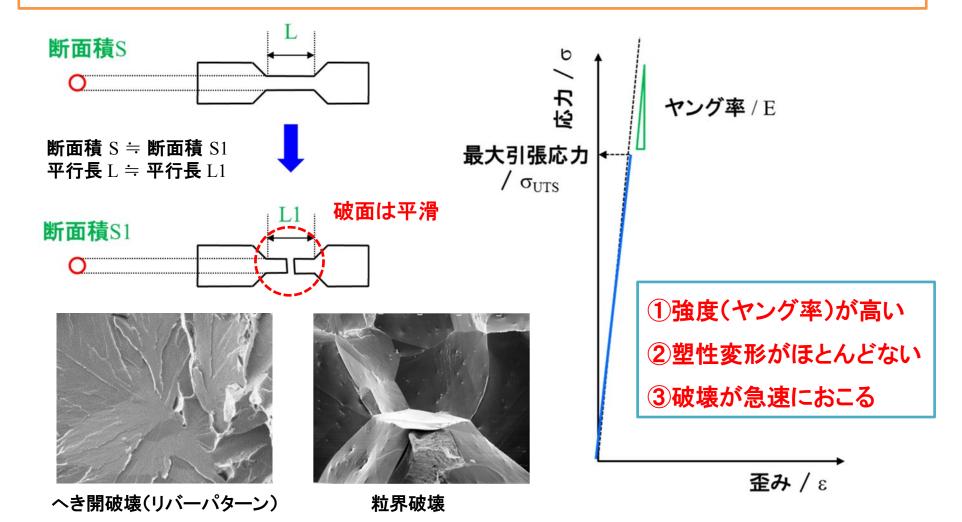
Materials Science and Engineering: A, 682 (2017) 73-84

脆性破壊

『金属の魅力をみなおそう第4回 破壊』 2018 Feb. 2 14:05~14:35 東北大学 正橋直哉



ほとんど塑性変形が起こらず瞬時に破壊する。一般に強度が大きく、比較的平滑な破面を示す。ミクロ的には、①結晶粒内部の特定の結晶面に沿って破壊する「へき開破壊」と、②結晶粒界に沿って破壊する「粒界破壊」に大別できる。





脆性破壊(劈開破壊とぎ劈開破壊)

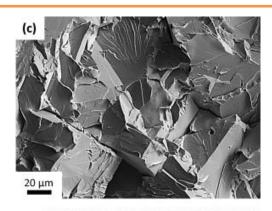
『金属の魅力をみなおそう第4回 破壊』 2018 Feb. 2 14:05~14:35 東北大学 正橋直哉

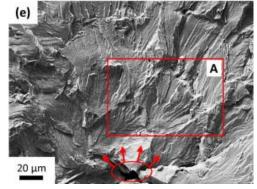


へき開破壊ではファセットが特定の結晶面を示すが、擬へき開破面はファセットがへき開面かどうか不明確で、リバーパターンが不明瞭。原則、へき開はリバーが閉じる向き、擬へき開はリバーが開く向きに亀裂が進展します

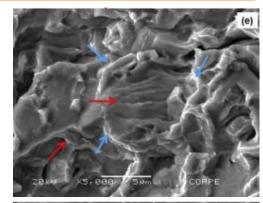


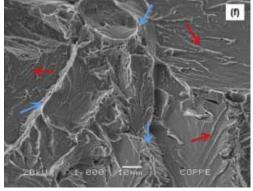
Fe**シリサイドの破面の**STM**像** Fractography, Derek Hull, Cambridge University Press (1999)





(上) -196°C, (下) Hチャージ/RT Mater. Sci. Eng. A, 665(2016) 35-46





(上) Hチャージ, (下) 溶接材 Inter. J. Hydrogen Energy, 40 (2015)17091-17101

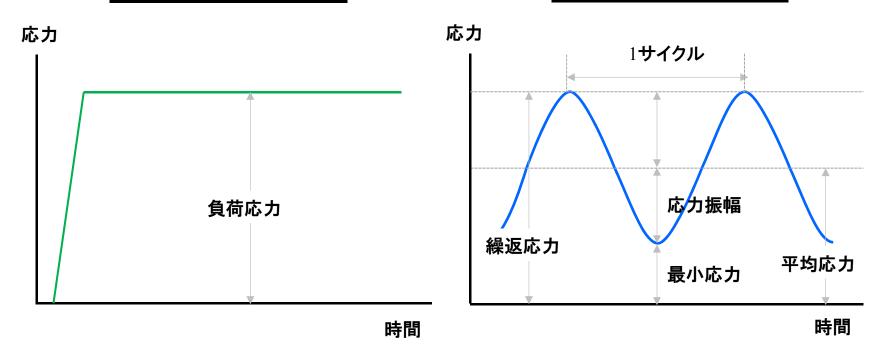
静的破壊と疲労破壊

『金属の魅力をみなおそう 第4回 破壊』 2018 Feb. 2 14:05~14:35 東北大学 正橋直哉



静的使用の応力推移

疲労使用の応力推移



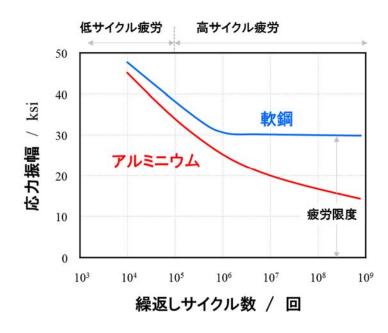
- (1) 同じ応力を負荷していても、材料寿命は疲労使用時の方が静的使用より短い
- (2) 疲労使用では材料の破断応力よりも低い応力でも破壊することがある
- (3) 実環境試料のほとんどは材料にかかる荷重は変動しているため疲労特性が重要

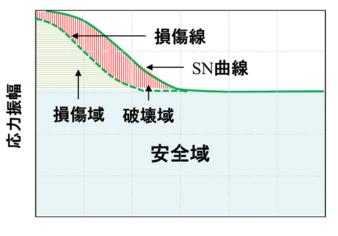


SN曲線と疲労亀裂

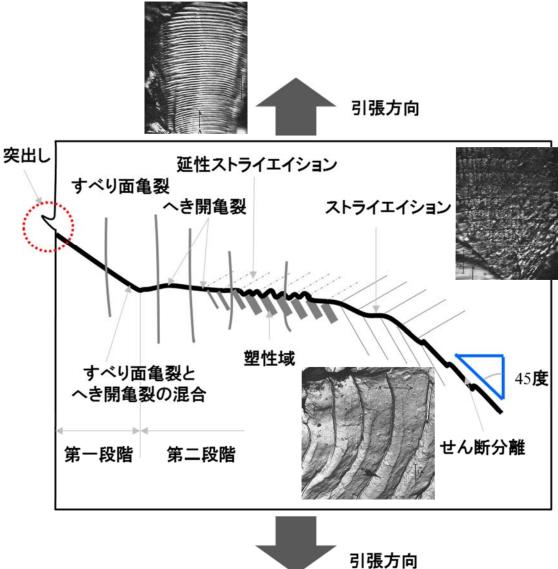
『金属の魅力をみなおそう 第4回 破壊』 2018 Feb. 2 14:05~14:35 東北大学 正橋直哉







繰返しサイクル数 / 回

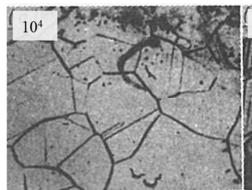




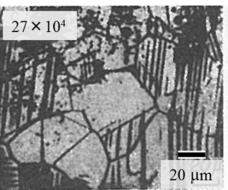
疲労破壊の組織との特徴

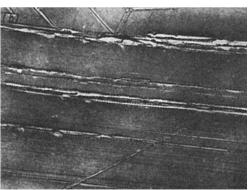
『金属の魅力をみなおそう第4回 破壊』 2018 Feb. 2 14:05~14:35 東北大学 正橋直哉





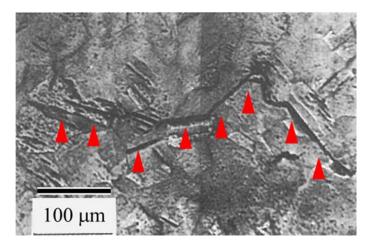




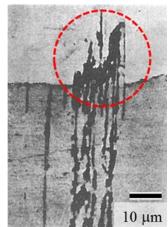


ニッケルの疲労組織:ストリエーションの数の増加と局在化が確認できる

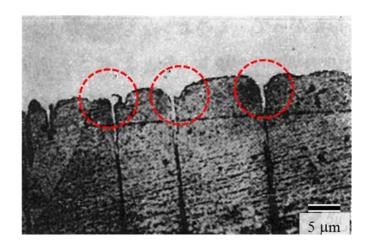
Alの疲労後の太いすべり帯



銅の疲労クラック



銅の突出し



銅の入れ込み

- ① 疲労試験と共に太いすべり帯(ストリエイション)が増加し、局在化する
- ② 表面には内部に入り組んだ領域や、外部に突き出した領域が観察できる

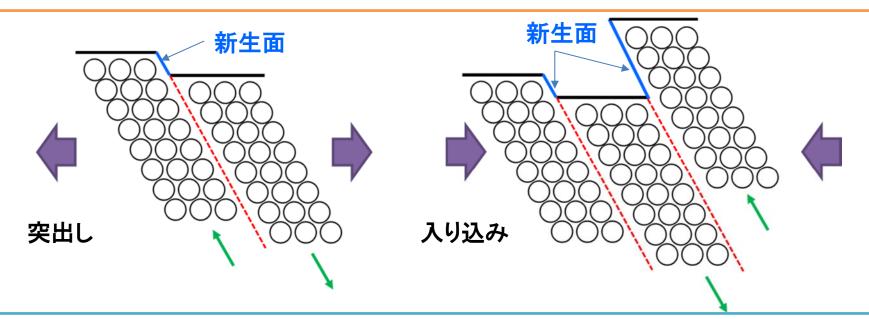


疲労クラックの発生機構(マクロ的)

『金属の魅力をみなおそう 第4回 破壊』 2018 Feb. 2 14:05~14:35 東北大学 正橋直哉



材料に局部的な塑性変形が繰り返し作用して微小なクラックが発生し、それが次第に拡大して起こる破壊を「疲労破壊」と称し、最大応力以下でも発生する。



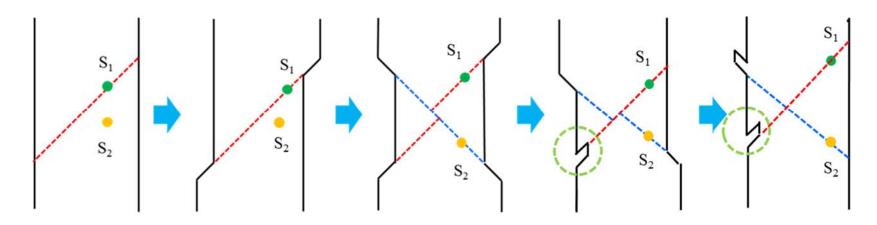
- ① 材料の左右方向に荷重がかかった時、最大せん断応力は荷重方向に45°傾いたときだが、その方向にすべり面が存在すると、変形しやすい箇所ができる。
- ② 力によりすべりで突き出されたり、押し込まれた面は活性なため、瞬時に酸素や水 蒸気が吸着して表面状態が変わるため、除荷されても元に戻れない。
- ③ この繰り返しで、すべり面周辺のすべり帯は長さと深さを増大し、クラックとなる。



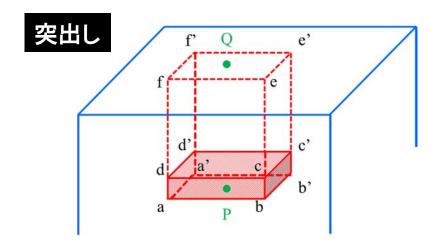
疲労クラックの発生機構(ミクロ的)

『金属の魅力をみなおそう 第4回 破壊』 2018 Feb. 2 14:05~14:35 東北大学 正橋直哉

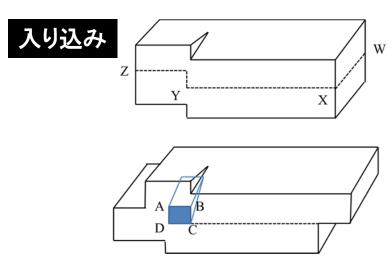




転位源S1とS2は上記のような順番ですべり面上で転位を発生し、入り込みや突出しを形成する



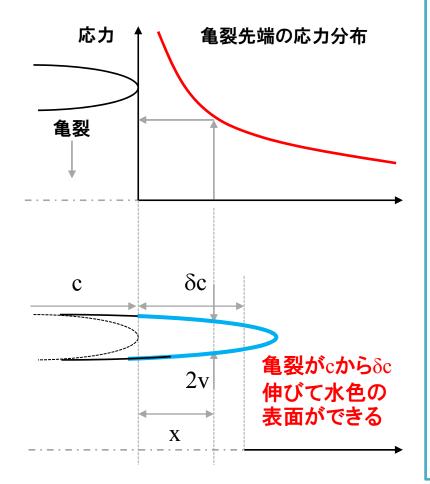
空隙(真ん中の赤い直方体)下端Pがその周囲を動く ような同一のバーガースベクトルをもつらせん転位PQ は、その運動で点線の直方体を押し上げる



らせん転位がXWの方向にすべり面WXY上を 移動してY点で階段を作ったのち、すべり面上 でZX方向に滑るとABCDの空隙を作る



破壊における欠陥(き裂)の関与を工学的に扱う力学。き裂の形状や荷重条 件等に依存しないパラメータにより、破壊現象を容易に扱うことを可能とした。



亀裂がδc伸びた時の歪エネルギー増加Uが、亀裂により新しくできる表面エネルギー増加Wより大きくないと亀裂は伸びない。



Alan Griffith (1893–1963)

 $\partial U/\partial a \ge \partial W/\partial a$ グリフィスの破壊条件 ($\delta a = t \times \delta c$)

$$U = \frac{\sigma^2}{E} \cdot \pi a^2 \qquad \partial U/\partial a = \frac{2\pi a \sigma^2}{E}$$

単位厚さ当りのエネルギーをγとすると、

$$W = 2 \cdot (2a) \cdot \gamma \qquad \partial W / \partial a = 4\gamma$$

$$\therefore \frac{2\pi a \sigma^2}{E} \ge 4\gamma \quad \text{or} \quad \sigma \ge \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi a}}$$

$$K_1 = \sigma \sqrt{\pi a} \qquad K_1 \ge \sqrt{2\gamma E}$$



塑性域を考慮したき裂進展

『金属の魅力をみなおそう 第4回 破壊』 2018 Feb. 2 14:05~14:35 東北大学 正橋直哉





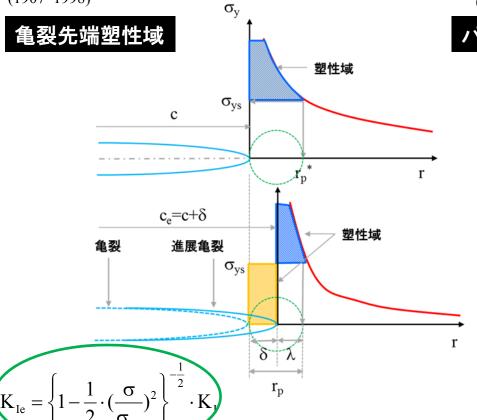
George Irwin (1907–1998)

- ① Griffithの理論は脆性材料には 適用できるが、他は不可。
- ② 延性材料では塑性変形に伴う歪みエネルギーを加えるべき。



Paul C. Paris (1930–2017)

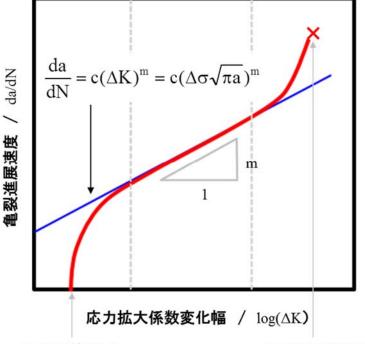
- ① たとえ亀裂があってもK_{th}より低け れば、亀裂は成長しない。
- ② 長さaの亀裂を含む材料の引張強 度σから求まるKが破壊靭性値。



パリス則不連続進展域

連続進展域

静的破壊域



下限界値(Kth)

最終破壊値(Kmax)





◎ 破壊の考え方

- ① 破壊は材料特性・使用環境(条件)・形状の三つの因子に強く影響を受ける 使用環境に応じた材料とデザインの選択が重要
- ② 破壊の多くは疲労が原因 クラック伝搬(成長)挙動を知ることが重要
- ③ 金属の強度は理論強度の1/10~1/1000程度 低強度の原因は金属中に存在する欠陥(転位・空隙等)の存在
- ④ 破壊は欠陥に関与する現象で、破面からその原因を推察できる 破面は破壊の要因を反映する

◎ 破壊力学

① 破壊靭性

破壊に対する粘り強さの指標で欠陥サイズと応力できまる

② パリス則

部材の疲労特性や安全性の評価の拠り所になりうる