

BCC 鉄合金の疲労特性に関する転位論的研究

Study on fatigue properties of BCC iron alloys based on dislocation theory

専攻：機械科学専攻 次世代鉄鋼総合科学

氏名：桜田 栄作

主任指導教員名：潮田 浩作

Abstract: The aim of this study is to clarify the fatigue crack initiation behavior of ferritic steels as bcc polycrystalline materials, and to construct a crystal plasticity model for designing crack initiation in high strength steels. To accomplish the aim, the following investigations have been conducted; 1) explication of dominant factor determining fatigue crack initiation life in practical high strength steels based on dislocation theory, 2) crystal plasticity analysis of cyclic deformation in bcc Fe-16mass%Cr alloy with huge grain, 3) study on the relationship between fatigue crack initiation life and active slip systems considering their interaction, 4) crystal orientation dependency of cyclic deformation behavior and evolution of dislocation structure in Fe-3mass%Al single crystal. From the results of these investigations, it is concluded that material hardening rule, which reflects dislocation interaction between each active system, may be applied to the constitutive equation of materials. However, for establishing the analytical methodology for quantitatively predicting the fatigue crack initiation life, future work is needed on the identification of criteria and the elucidation of mechanism for persistent slip band formation, which is crucial to understand the fatigue crack initiation behavior.

1. 緒言

近年、CO₂ 排ガス規制と安全規制の強化を背景に、自動車車体の軽量化と安全性の両立が進められており、今後、加工性と耐久性に優れた高強度鋼板の開発が求められる。自動車部品は複雑な成形履歴を経て製造される。そのため、部品耐久性を向上させる鉄鋼材料の開発には、成形による微視的な損傷状態を考慮した金属組織設計を行うことで達せられる。近年、金属組織の微視的な損傷状態あるいは力学状態を評価する手法として、結晶塑性論を取り入れた FEM(Finite Element Method)解析(以後、結晶塑性 FEM と呼ぶ)技術が開発されている¹⁾。今後、鉄鋼材料の開発には、このような計算力学を活用して金属組織設計を行うことが必要となると考えられる。そこで本研究では、優れた耐久性を有する自動車部品の提供を可能とする鉄鋼材料の開発のため、結晶塑性論を取り入れた評価技術を確立していくことを大きな目標とする。

しかしながら、これまで結晶塑性 FEM は、結晶回転を伴う大変形現象を対象として発展しており、疲労破壊現象にどのような材料モデルを適用すべきかは、十分に明らかでない。また、疲労変形挙動へ結晶塑性 FEM を適用した研究例は、fcc あるいは hcp 金属を取り扱うものがほとんどで²⁾、これらは塑性ひずみ分布状態と裂発生位置の比較など、定性的な評価技術の領域に留まっている。定量的な評価技術としての確立のためには、疲労き裂発生現象を支配する因子あるいはき裂発生のクライテリアの計算力学上の表現手法を明らかにする必要がある。これまで、観察実験を基盤とした研究では、多結晶材であってもそれを構成する個々の単結晶としての振る舞いが、疲労き裂発生挙動を支配していることが分かっている³⁾。そのため、fcc 金属では単結晶を用いた研究が進められ、疲労き裂の核となる固執すべり帯(Persistent Slip Band を略し、以後、PSB と呼ぶ)の形成応力は、金属によらず一定の値となることが明らかとされた。この応力に至るまでの繰返し変形挙動は結晶方位依存性を持ち、転位間相互作用の違いによる転位下部組織の特徴によって説明できることが明らかとされつつある⁴⁾。さらに、疲労変形中の転位間相互作用と積層欠陥エネルギーとの関係、疲労寿命に及ぼす固溶元素の影響などの転位論的な解釈が進んでいる。一方、bcc 金属である Fe は積層欠陥エネルギーが高く、容易に交差すべりを生ずる特徴がある⁵⁾。この特徴が疲労き裂寿命にどのような影響を及ぼすかなど、bcc 金属の疲労き裂発生現象を支配する因子やそのクライテリアは十分に明らかになっていない。

そこで、本研究の大きな目的を達成するため、本論文では Fe 合金の疲労き裂発生挙動を支配する因子の結晶塑性論的および転位論的な解明をし、結晶塑性 FEM の材料モデルの指針を得ることを目的とした。

2. 学位論文の章構成

前節で述べた目的から、本論文は以下のように構成した。

第1章：緒言

背景および本研究の目標を示し、従来研究の課題に基いた本論文の目的と構成を述べた。

第2章：実用鋼の疲労き裂発生寿命の転位論的解明

実用高強度鋼の強化機構と疲労寿命の関係の調査を行った。その結果、疲労き裂発生に至る繰返し硬化-軟化寿命は、転位運動の抵抗に支配され、繰返し降伏応力で規格化することで、強化機構によらず統一的に整理できたことから、計算力学上で強化機構を微視的降伏応力の違いとして表現すればよいことが分かった。

第3章：Fe-16%Cr合金多結晶材の疲労変形の結晶塑性 FEM 解析

第2章で得られた知見に基づき、従来の結晶塑性 FEM モデルを用い、金属組織内の微視的な力学状態と疲労き裂発生現象との比較調査を行った。その結果、観察結果と計算結果の比較では、活動すべり系の不一致が認められ、材料構成式および硬化発展則に課題があることを明らかにした。

第4章：Fe-16%Cr合金多結晶材の疲労き裂発生寿命と活動すべり系の関係

第3章で明らかとなった課題に基づき、bcc構造を有するFe合金多結晶材の疲労き裂発生寿命に及ぼす活動すべり系の影響を調査することで、微視的な力学状態は主として弾性異方性に起因しており、疲労き裂発生寿命は本質的に単結晶としての転位間相互作用の種類に支配されることを明らかにした。

第5章：Bcc-Fe-3%Al合金単結晶材の繰返し変形挙動と転位下部組織の発達

bcc-Fe-3%Al合金単結晶材の繰返し変形挙動と転位下部組織の発達挙動との関係を調査した。単結晶の疲労変形挙動や繰返し降伏応力の結晶方位依存性は活動すべり系の数に支配されており、結晶塑性モデルにおける材料構成式は、不動転位の形成頻度に基づいた表現する必要があることを明らかにした。

第6章：結言

第5章までに得られた知見をまとめ、本論文での研究課題と将来展望を述べた。

3. 実用鋼の疲労き裂発生寿命の転位論的解明

3.1 目的

自動車用鋼板には強度と成形性の両立のため、さまざまな強化機構が利用されるようになった。例えば、足回り部品では、V, Ti, Nb, Mo などのマイクロアロイを活用した金属組織設計がなされ⁶⁾、延性が必要な場合、マルテンサイト等を利用した複相組織設計がなされる⁷⁾。そこで、繰返し変形挙動と疲労き裂発生寿命に及ぼす強化機構の影響を明らかにするため、Fe-C-Ti 合金と Si で固溶強化させた DP 鋼の 2 種類の供試鋼を用い、繰返し変形中の硬化・軟化挙動とその応力依存性を比較調査した。さらに、疲労破断に至るまでの転位下部組織の変化を TEM 観察した。これらの結果から、強化機構の違いによる疲労き裂発生寿命の違いを転位論的視点で考察し、高強度鋼の疲労き裂発生寿命支配因子を抽出した。

3.2 実験方法

Table 1 に示した組成を有する 2 種の DP 鋼板 (Si を添加し固溶強化させた A 鋼、Ti と Nb を複合添加し析出強化させた B 鋼) を試作した。試作鋼を軸力疲労試験片に加工し、MTS 社製 10 ton 疲労試験機にて、応力比 $R=-1$ 、周波数 $f=15\text{ Hz}$ の応力振幅一定条件で疲労試験を実施した。疲労試験中はひずみゲージにて繰返しひずみを計測し、繰返し硬化・軟化挙動を調査した。疲労停止材および破断材について、転位下部組織の観察を行い、繰返し変形挙動と転位下部組織の形成過程との比較調査を行った。

Table 1. Chemical compositions of Steel A and B

Sample	Chemical Composition (mass%)				
	C	Si	Mn	Ti	Nb
Steel A	0.072	0.94	1.84	tr.	tr.
Steel B	0.046	0.02	1.46	0.10	0.02

3.3 結果及び考察

破断寿命に至るまでの繰返し塑性ひずみの変化を Fig. 1 に示した。鋼種によらず負荷後は塑性ひずみが減少する繰返し硬化域を示した後、塑性ひずみが増加する繰返し軟化を示した。この硬化から軟化に遷移する繰返し数は応力値が高いほど短寿命となる。また、この繰返し硬化寿命は、いずれの応力でも析出強化させた B 鋼が長い。転位下部組織の観察から、繰返し硬化域ではタングルした転位の増加、軟化域では Cell 組織の形成が認められた。なお、析出強化させた B 鋼では、Fig. 2 のように Cell 形成が遅延してた。さらに、転位の観察の結果、TiC にピンニングされることで移動障害となり、長寿命となったことが分かった。この転位の移動障害は繰返し降伏応力の違いとして現れる。そこで、繰返し降伏応力で規格化した応力と繰返し硬化寿命の関係性を調査した結果、Fig.3 のように強化機構によらず統一的に繰返し硬化寿命が整理された。

3.4 小括

実用高強度鋼において疲労き裂発生に至る繰返し硬化・軟化寿命は、転位運動の抵抗に支配され、繰返し降伏応力で規格化することで、強化機構によらず統一的に整理できた。計算力学上は、この強化機構を微視的降伏応力の違いとして表現すればよいことが明らかとなった。

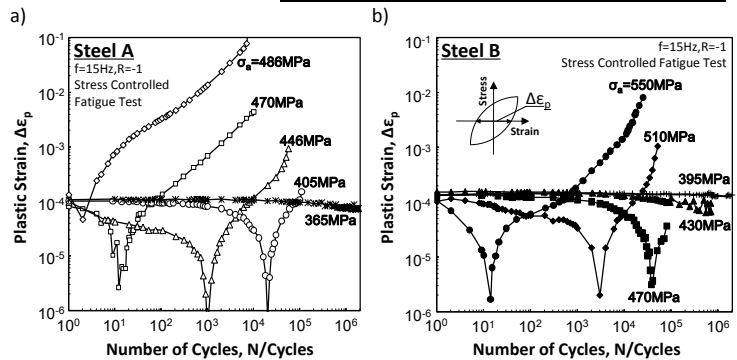


Fig. 1. Effect of applied stress amplitude on the change in cyclic plastic strain with number of cycles of a) steel A and b) steel B

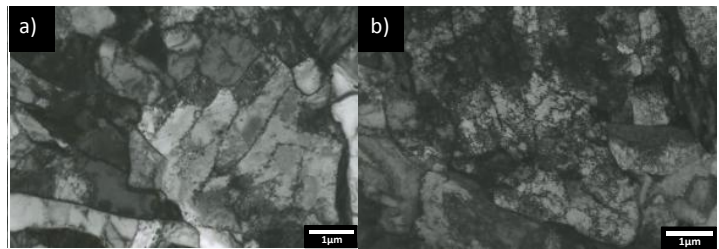


Fig. 2. TEM micrographs showing dislocation structure of fatigue fractured specimen of a) steel A and b) steel B

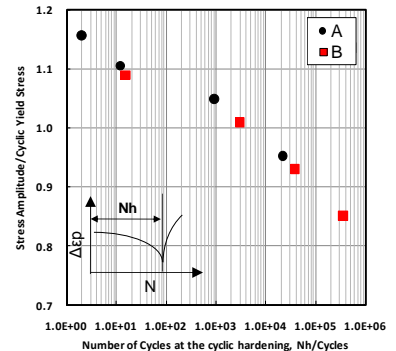


Fig. 3. Effect of cyclic yield stress on cyclic hardening life.

4. Fe-16%Cr 合金多結晶材の疲労変形の結晶塑性 FEM 解析

4.1 目的

前節の微視的降伏応力は、鉄鋼材料の強化機構による内部応力を表現するものであり、降伏状態は金属組織形態に由来した組織内部の不均一な応力にも依存する。この多結晶を構成する結晶間の相互作用は疲労き裂発生挙動を支配する一つの因子と考えられる。そこで、結晶塑性 FEM を用いて、Fe-16%Cr 合金の多結晶材の疲労変形状態を解析し、実験結果によって得られた疲労き裂発生挙動との関係を明らかにしていく。さらに疲労き裂発生挙動に及ぼす活動すべり系の相互作用の影響を調査し、その結果を踏まえ、疲労き裂発生現象を表現可能な結晶塑性 FEM の課題について明らかにすることを目的とする。

4.2 解析モデルおよび実験方法

Cottrell の転位 glide モデルによれば⁸⁾、各すべり系のせん断ひずみ速度は式(1)で示される。疲労変形中には、転位は他の転位と固着反応をすることで、移動が阻害される。そこで、完全等方硬化を再現した硬化則による材料構成式を用いて、弾性異方性に加え塑性異方性を再現できる結晶塑性 FEM 解析を行う。

$$\dot{\gamma} = \rho v b^2 \exp\left(\frac{-\Delta H}{kT}\right) \sinh\left(\frac{\tau^* \Delta V}{kT}\right) \quad \dots (1)$$

Fe-13%Cr の組成を有する bcc 粗大多結晶材から 4 点曲げ切欠き疲労試験片を作製し、疲労試験を行った。試験片表面の SEM 観察および EBSD 解析によって結晶粒形態と方位を同定し、実験に用いた試験片表面の組織を再現した FEM 解析モデルを作製した。この解析モデルに実験と同じ負荷を与え、計算結果と実験結果との比較を行った。

4.3 結果及び考察

疲労試験の結果、疲労き裂が発生位置は、粒界や結晶粒内と試験片によって異なった。例えば、Fig. 4 のように、切欠き底に粒界がある試験片 1 では粒内となり、試験片 2 では粒界となった。また、粒界の無い試験片 3 では切欠き底の右側でき裂が発生した。結晶塑性解析では、いずれの試験片でも数繰返し後には疲労き裂の発生位置で、塑性ひずみが累積していくことが再現できた。このような塑性ひずみ分布は結晶の配置や異方性に由来しており、粒界でも粒内でも個々の単結晶の変形とそれらによる拘束で生まれる不均一な塑性ひずみ分布によって疲労き裂の発生位置が決まると考えられる。また、本結果は既存の結晶塑性 FEM モデルでは疲労き裂発生位置を再現することが可能であることを示している。ところが、き裂近傍のすべり線と計算上の活動すべり系とは対応しない結果が得られ、疲労き裂発生寿命と累積塑性ひずみ量が対応しない結果が得られた。計算上の活動すべり系の数は、極めて少なく、このすべり系の不一致は、一つのすべり系が活動すると全てのすべり系が硬化する完全等方硬化と CRSS に課題があると考えられる。

4.4 小括

以上の結果から、現状の結晶塑性 FEM では、硬化則、すなわち、転位間相互作用や CRSS の表現に課題があり、定量的に疲労き裂発生寿命を評価することは困難であることが分かった。この結果を踏まえ、次節では改めて、bcc 多結晶材の疲労き裂発生挙動を支配する因子を明らかにする。

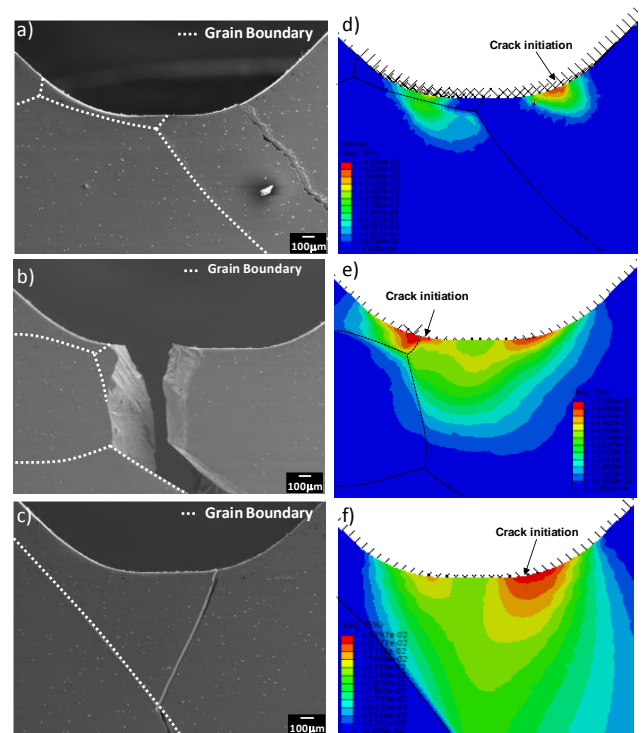


Fig. 4. The fatigue fractures observed and the distributions of accumulated plastic strain by CP-FEM. a) and d): Specimen 1, b) and e): Specimen 2, c) and f): Specimen 3.

5. Fe-16%Cr 合金多結晶材の疲労き裂発生寿命と活動すべり系の関係

5.1 目的

結晶塑性 FEM での累積塑性ひずみ量とき裂発生寿命との間には相関が認められず、疲労き裂発生寿命の定量的な予測までには至っていないことが課題であった。これは疲労変形中の素過程が十分に明らかになっていないこと、き裂発生をもたらす支配的現象とき裂発生クライテリアを十分に表現できていないためと推定する。この結果を踏まえ、粗大な多結晶体の Fe-Cr 合金を用いて 4 点曲げ切欠き疲労試験を追加実施し、活動すべり系と疲労き裂発生挙動の関係を詳細に調査した。その結果に基づき、bcc 金属である Fe の疲労き裂発生寿命を支配する因子を明確化することを目的とする。

5.2 実験方法

前節で用いた Fe-13%Cr の組成を有する bcc 粗大多結晶材から、新たに 6 本の 4 点曲げ切欠き疲労試験片を作製し、疲労試験を行った。疲労試験中はマイクロSCOPEにて、2700 回毎に切欠き近傍の表面状況を写真撮影し、疲労き裂長さが 50 μm を超えた繰返し数を疲労き裂発生寿命とした。前節での塑性挙動に課題があることから弾性異方性のみを考慮した FEM 解析を行い、各すべり系のせん断応力を求め、疲労き裂近傍で観察されたすべり線との比較を行った。

5.3 結果及び考察

疲労試験の結果は前節と同様で、疲労き裂が発生位置は試験片の切欠き周りの結晶粒形態によって異なった。しかしながら、疲労き裂発生位置は弾性異方性のみよってもたらされた応力集中位置と対応していることが明らかとなった。これは高サイクル疲労条件では大きな結晶回転を伴わない変形状態であることに起因すると考えられる。この結果に基づき、き裂発生位置での応力テンソルから求めた各すべり系のせん断応力を基に優先すべり系と、疲労き裂近傍で観察されたすべり線との比較を行った。例えば、Fig. 5 では切欠き肩で疲労き裂が発生し、その近傍には複数のすべり線が認められる。このすべり線は詳細に観察すると、(110)、(101)および(211)のすべり面のトレースに対応する突出しが連なるように構成されている。これらのすべり面の合ベクトルとなるトレースがすべり線の方向と対応する。このような結果は、いずれの試験片でも認められた。そこで、活動すべり系同士の転位間相互作用に着目し、疲労き裂発生位置の主応力と疲労き裂発生寿命との関係を、Fig. 6 に整理した。その結果、優先すべり系が交差すべりを生ずる組合せと、Lomer-Cottrell 固着を生ずる組合せによって、疲労き裂発生寿命が整理できる結果を得た。このことから、多結晶材の疲労変形中では、弾性異方性に基づいた不均一な応力状態に加え、疲労き裂を発生する結晶粒の単結晶の疲労き裂発生寿命に及ぼす転位間相互作用の影響を明らかにすることで、本論文の目的が達せられる指針が得られた。

5.4 小括

Fe-13%Cr 合金多結晶材の疲労き裂発生寿命は、弾性異方性に起因した発生応力と、疲労き裂を発生する結晶の転位間相互作用の種類に支配されており、単結晶の疲労き裂発生寿命を明らかにすることが重要である。

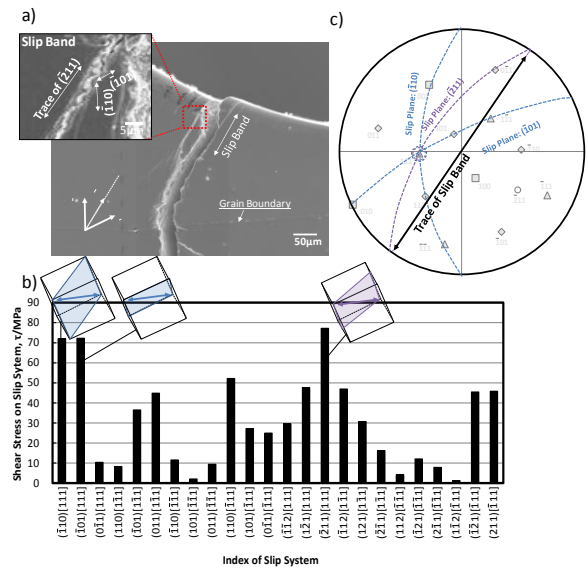


Fig. 5. Relationship between slip bands near initiated crack and active slip systems. a) SEM micrographs showing slip bands, b) shear stress on each slip systems, c) pole figures projecting active slip planes and trace of slip band

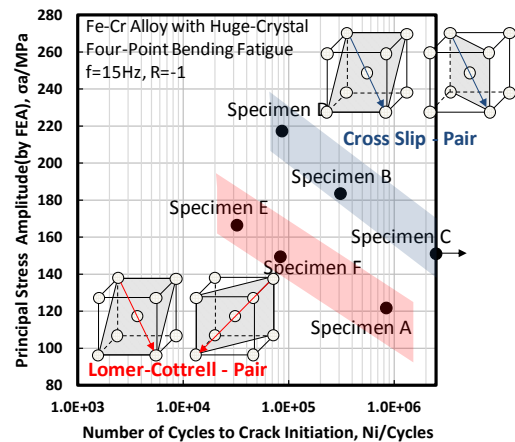


Fig. 6. Relationship between number of cycles to crack initiation and calculated principal stress amplitude

6. Bcc-Fe-3%Al 合金単結晶材の繰返し変形挙動と転位下部組織の発達

6.1 目的

これまでの調査の結果、bcc 多結晶材の疲労き裂発生寿命は、多結晶を構成する個々の単結晶の特性に支配され、活動すべり系間の相互作用が重要な因子となることが明らかとなった。単結晶材においては、一定の負荷応力状態では結晶方位によって活動すべり系が変化する。そこで、bcc 金属の繰返し変形挙動に及ぼす結晶方位の影響を明らかにすることを目的に、Fe-3.0%Al 合金の単結晶試験片を作製し、応力振幅を一定とした疲労試験によって繰返し変形中の応力ひずみ曲線の変化と転位下部組織の変化を調査した。

6.2 実験方法

供試鋼の化学組成は、高温度域でも bcc 相が平衡となる Fe-3.0mass%Al とした。20 kg の鋳片を溶製後、1573 K に設定した窒素置換雰囲気炉内で 72 h の保持を行い、正常粒成長させることにより粗大結晶粒を作製した。得られた粗大結晶粒ブロック試料から、所定の結晶方位となる軸力試験片を作製した。試験片断面は正方形とし、応力軸の結晶方位が[001]や[111]として、断面内での非対称変形を避けるよう他の面の結晶方位を決定した。疲労試験は、周波数 $f=5$ Hz、応力比 $R=-1$ 、応力一定の条件で行い、 1.0×10^6 回で未破断のものを疲労限とみなした。疲労停止材および破断材について、転位下部組織の観察を行い、繰返し変形挙動と転位下部組織との関係および結晶方位依存性を調査した。

6.3 結果及び考察

Fig. 7 には、[001]方位の疲労試験中に破断あるいは疲労限に至るまで繰返し塑性ひずみの変化と応力漸増試験による繰返し降伏応力の測定結果を示した。数十回まで繰返し塑性ひずみが減少し、その後、増加する傾向が認められ、この変化は繰返し降伏応力を分岐として、それより低い応力では認められない。繰返し塑性ひずみが減少する領域では転位の交差や直線的な転位の消滅が確認され、増加領域に転じプラトーを示した段階では点状の転位組織が形成されていた。この傾向に結晶方位依存性は認められなかった。しかし、Fig.8 に示したように、活動すべり系の多い[001]方位では、ある特定の結晶面に点状の転位は配列し転位下部組織のような形態をとる。一方、[011]方位では疎らに分散するのみとなる。この点状の転位は、せん断応力から計算される優先すべり系同士の反応によって生ずる不動転位の交差線トレースと対応する。[001]方位では最も活動すべり系の数が多く、不動転位の形成頻度が高いが、[011]方位では交差すべり頻度が高くなる。疲労破断は[001]方位にのみ認められている。これらの結果から、活動すべり系同士の相互作用に基づいた不動転位の形成頻度によって、転位下部組織の結晶方位依存性が決められ、疲労き裂発生から破断までの特徴づけがなされると考察した。

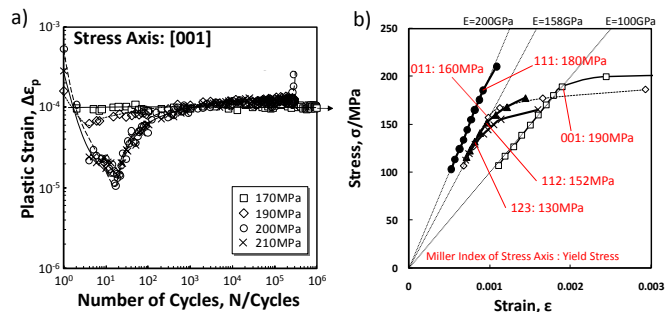


Fig. 7. a) Changes in cyclic plastic strain with the number of cycles, b) cyclic stress-strain curves when the stress axes are [001],[112], [123] and [111]

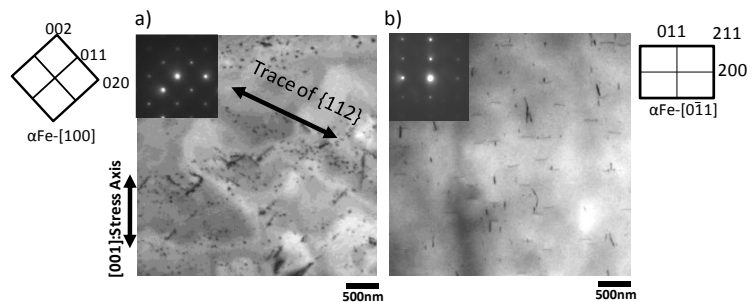


Fig. 8. TEM micrographs showing dislocation structure of fatigue fractured specimen. a) when the stress axis is [001] and b) [011].

6.4 小括

bcc-Fe-3%Al 合金単結晶材の繰返し変形挙動と転位下部組織の発達挙動を調査した。疲労後の転位は活動すべり系同士の転位反応によって生ずる不動転位から構成され、不動転位の形成頻度によって転位下部組織の特徴づけがなされると考察された。今後、下部組織の特徴と PSB の形成の関係を明らかにする必要がある。

7. 結言

本研究の目的は、優れた耐久性を有する自動車部品の提供を可能とする鉄鋼材料の開発を目指すべく、自動車部品の耐久性を向上させる金属組織の設計手法として、結晶塑性論を取り入れた評価技術を確立していくことである。そのため、本論文では、Fe合金の疲労き裂発生挙動を支配する因子の結晶塑性論的および転位論的な解明をし、結晶塑性 FEM の材料モデルの指針を得ることを目的とした。目的を達成するための各章で得られた知見を列挙する。

- ・ 実用高強度鋼において疲労き裂発生に至る繰返し硬化-軟化寿命は、転位運動の抵抗に支配され、繰返し降伏応力で規格化することで、強化機構によらず統一的に整理できた。計算力学上は、この強化機構を微視的降伏応力の違いとして表現すればよいことが明らかとなった。
- ・ 現状の結晶塑性 FEM では、硬化則、すなわち、転位間相互作用や CRSS の表現に課題があり、定量的に疲労き裂発生寿命を評価することは困難であることが分かった。
- ・ この結果を踏まえ、活動すべり系と疲労き裂発生挙動の関係を詳細に調査した結果、多結晶材の疲労き裂発生寿命は、弾性異方性に起因した発生応力と、疲労き裂を発生する結晶の転位間相互作用の種類に支配されており、単結晶の疲労き裂発生寿命を明らかにすることが重要であることが分かった。
- ・ そこで、bcc-Fe-3%Al 合金単結晶材の繰返し変形挙動と転位下部組織の発達挙動を調査した。疲労後の転位は活動すべり系同士の転位反応によって生ずる不動転位から構成され、不動転位の形成頻度によって転位下部組織の特徴付けがなされると考察された。

本研究では、bcc 金属の疲労き裂発生挙動を表現するための結晶塑性モデルを構築することを最終目標に、基礎的検討を行った。しかし、基礎的検討として、単結晶の疲労き裂発生挙動そのものを明らかにするには至っていない。そのためには、bcc 単結晶材の PSB 形成と転位下部組織の関係、また、その結晶方位依存性を明らかにし、PSB 形成をもたらすクライテリアを明確にすることが課題である。

今後はこれらの課題を解決することが必要である。またこれと同時に、BCC 金属における 3 次元の疲労き裂発生に関する結晶塑性 FEM 解析手法を平行して確立・実行し、実験による検証を行うことが重要であろう。また、将来的にはき裂の発生だけでなく、き裂の伝播挙動に対するモデル化も必須となる。これらを合体させ、疲労耐久性に優れる金属組織の提案に結び付けたい。

参考文献

- 1) R. Asaro and A. Needleman: Acta Metall. 33 (1985), 923.
- 2) F. P. E. Dunne, A. J. Wilkinson and R. Allen: Int. J. Plasticity., 23 (2007), 273.
- 3) T. Tanaka and M. Kougi: J. Soc. Mat. Sci., 33 (1984), 659.
- 4) P. Li, S. X. Li, Z. G. Wang, Z. F. Zhang: Acta Mater., 58 (2010), 3281
- 5) P. Franciosi, L. T. Le, G. Monnet, C. Kahloun and M. -H. Chavanne: Int. J. Plasticity., 65 (2015), 226.
- 6) Y. Funakawa, T. Shiozaki, K. Tomita, T. Yamamoto and E. Maeda: ISIJ Int., 44 (2004), 1945.
- 7) M. Takahashi : Tetsu-to-Hagane, 100 (2014), 1.
- 8) A. H. Cottrell: Dislocation and Plastic Flow in Crystals, OUP, UK (1953), 193.

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

BCC 鉄合金の疲労特性に関する転位論的研究

2. 論文提出者 (1) 所属 機械科学 専攻

(2) 氏名 桜田 栄作

3. 審査結果の要旨（600～650字）

当該学位論文に関し、平成29年2月3日に第1回学位論文審査委員会を開催し、提出された学位論文および関連資料について詳細に審査した。同日に口頭発表の後、第2回学位論文審査委員会を開催し、慎重に協議の結果、以下の通りの判定をした。

本論文は、鉄鋼材料の高強度化ニーズを背景に、BCC 鉄合金の疲労特性向上指針を提示することを目的に、転位論と結晶塑性論をベースに基礎的に取り組んだものである。すなわち、疲労き裂発生挙動に焦点を絞り、それに及ぼす強化機構や結晶方位の影響を評価する技術基盤を確立し、以下の重要な知見を得た。具体的には、1) 強化機構の異なる実用鋼を用いたき裂発生に関する研究から、強化機構に依らず微視的降伏応力が繰り返し硬化／軟化挙動に影響を与え、き裂の発生を支配することを明確化した。2) 粗大結晶粒から成る鉄合金多結晶体を用いた疲労試験と結晶塑性解析から、多結晶体においてもそれを構成する個々の単結晶におけるすべり系の相互作用を考慮することにより疲労き裂発生が理解できることを明示した。3) BCC 鉄合金単結晶を用いた疲労試験を行い、疲労き裂発生は結晶方位依存性を示すこと、また活動すべり系の相互作用、すなわち不動転位の形成が支配的であり、特定の転位下部組織の発達疲労き裂に発展することを明示した。疲労き裂発生に関する結晶塑性論的手法を確立しつつある点も特筆される。

以上のように、本論文は自動車用高強度鋼板の疲労特性向上に資する基礎的原理を与えるものであり、学術的にも工業的にも価値が高く、博士（工学）の学位に値すると判定した。

4. 審査結果 (1) 判定（いずれかに○印） 合格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博士（工学）