

## 審査の結果の要旨

氏名 ブリフォ ファビャン ロジェ ルシアン

本論文は、結晶塑性有限要素法を用いた数値計算により微細構造を考慮して低炭素鋼の疲労挙動の解析を行ったものである。論文は全 5 章で構成されている。

第 1 章では、金属単結晶および多結晶の疲労に関する文献の調査を行っている。高サイクル疲労強度の様々なばらつきの原因や、その分布についての極値理論を用いた取り扱いについて紹介している。次に、疲労損傷の定量化に関する最近の研究動向について述べている。多結晶組織の正確なモデリングと、結晶レベルでの弾塑性挙動を表す結晶塑性モデルを用いた有限要素法を用いることにより、微細構造を考慮したメゾスコピックなひずみ場の評価が可能であることを明らかにしている。また、疲労指標 (FIP) と呼ばれる疲労基準を用いて、多結晶組織の疲労挙動の評価が可能であることも述べている。

第 2 章では、結晶材料の微細組織の特徴付けとそのモデリングに関して記述している。本研究では、楕円体を基にした多結晶組織の再構築について検討しており、結晶粒の形状および配向を考慮して異方性を有する組織配置を生成するための新たな手法を開発している。EBSD 解析結果を用いて、フェライト単相組織、フェライト/パーライト二相組織、マルテンサイト組織を再現することが可能となったことを示している。特にマルテンサイト組織においてはマルチスケールなマイクロ構造を順次的に生成するためのフレームワークを開発している。実験的に得られた EBSD 画像とこの手法で再現された結果には非常に良い相関が得られ、本手法の有効性が検証できたことを示している。

第 3 章では、異なる疲労条件における三種類の鋼の疲労挙動を実験的に調査している。まず、低サイクル疲労実験を一定のひずみ振幅およびひずみ比  $R = -1$  の条件で単軸引張り圧縮試験を行っている。次に、得られた繰返しの応力-ひずみヒステリシス曲線を逆解析して、均質化法により等方性 J2 塑性モデルおよび現象論的結晶塑性パラメータを導出している。さらに、荷重制御による高サイクル疲労実験を行っている。疲労強度と疲労限の両方に影響を与えることなく、き裂開始寿命と短いき裂の進展速度を測定するために楕円形切欠きを有する試験片を用いて実験を行っている。短いき裂の進展に及ぼす微細構造の影響を詳

細に評価するために、き裂進展付近の組織の EBSD 解析も行っており、き裂は粒界破壊をほとんど起こさずに粒内を伝播することを明らかにしている。すべりとき裂進展の方向の比較により、短いき裂の進展は主に結晶学的に生じることを示している。

第 4 章では、多結晶組織における疲労挙動の数値シミュレーションを行っている。まず、理論的および経験的モデルに基づくき裂の発生、進展および遅延に対する FIP を用いた評価方法について詳しく述べている。このシミュレーションの疲労性能予測に関する評価を行うために、3 つの異なる数値シミュレーションを行っている。第 1 の計算では、疲労き裂発生に及ぼす結晶粒の形態および冷間圧延組織の効果についての評価を行っている。冷間圧延組織はき裂発生寿命のばらつきに対して大きく影響を及ぼすことや、隣接結晶粒間の低い結晶配向角度はランダムな結晶配向の組織と比較してき裂進展に対する低い抵抗をもたらすことを示している。第 2 の計算では、第 3 章で行った疲労実験と同様の試験片形状および境界条件を用いて、フェライト単相組織およびフェライト/パーライト二相組織を有する切欠き付き多結晶組織における計算を行っている。計算された 2 つの組織の FIP は、実験結果に対する良好な予測を提供することを示している。また、隣接結晶粒間のねじり角が比較的小さくひずみが大きいすべり系において、主にき裂進展が生じると予測している。き裂発生とき裂停止の寿命の FIP を比較しており、最初の微細組織粒界を越えてき裂進展する寿命は、初期き裂発生の場合と同じくらいの大さかそれ以上であることを示している。また実験結果を用いて FIP を較正する試みがなされている。第 3 の計算では、ブロック境界の有無の両方を考慮してマルチスケールのマイクロ構造を再構築することにより、マルテンサイト鋼におけるすべり系上ひずみ分布を調査している。マルテンサイト粒内のひずみ分配を再現するためにはブロック境界を考慮すべきであると述べている。

最後の章では、まとめと今後の展望について述べている。微視組織の特徴付けおよび再構築、実験によるマクロおよびマイクロな結晶塑性パラメータの較正、結晶塑性 FEM 解析およびいくつかの疲労試験を組み合わせることにより、微視組織に強く依存した鋼の疲労性能を精度良く予測することが可能であると結論している。

以上、本論文で提案している疲労性能の予測手法は、強く微視組織に依存し工学的にも重要である低炭素鋼の疲労寿命を、多数の実験を行うことなしに評価可能とするものであり、鋼以外の金属材料への適用も期待され、マテリアル工学の発展への寄与が大きいと判断できる。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。