

氏 名	ふる や やす ぶみ 古 屋 泰 文
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 54 年 3 月 27 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 金属加工学専攻
学 位 論 文 題 目	直接格子法による疲労き裂先端のひずみ変化と伝播 に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 島田 平八
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 島田 平八 東北大学教授 高橋 裕男 東北大学教授 増本 健 東北大学教授 川崎 正

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 言

機械・構造物金属材料の疲労き裂伝播を統一的に支配する力学的因子を明らかにして、より一般的なき裂伝播速度式を導出することは、機械構造物の設計・安全保守という機械工学・安全工学の面のみならず、き裂伝播抵抗の大きな新材料の開発や金属組織の改善法などの材料工学的な面でも極めて重要な問題である。

疲労き裂伝播に関しては、巨視的な立場から様々な破壊力学的パラメーターによる伝播速度式が提案されており、また、き裂伝播機構の解明という微視的な立場からき裂先端部で起る塑性変形の内容が研究されてきた。しかし、依然として不明な点も多くあり、両者の関連性を含んだ形で疲労き裂伝播問題を検討する試みが様々な立場からなされているのが現状である。

著者は、このような複雑な様相を呈している疲労き裂伝播問題の解明には、従来とは異なる新しい観点からの方法論と疲労き裂伝播という破壊現象の原点に戻った立場からの再検討が必要であるという基本的な認識に立って本研究を行なった。すなわち、疲労き裂伝播は極めて局所的な性格の強い動的な破壊現象であり、従来のように試験片の破断後の結果をもとに推論するのではなく、いままでブラックボックスとして扱われてきたき裂先端部の破壊がおこる領域での局所的な連続観察と変形挙動の定量的な把握ができれば、疲労き裂伝播に関する様々な問題をもっと整理した形で理解でき、さらには普遍的でかつ統一的なき裂伝播を支配する力学的パラメーターを

導出できる可能性も十分にあるものと考え、まずき裂先端部のひずみの測定を試みた。

そして、従来、技術的にも測定困難とされていた疲労き裂先端の微小領域でのひずみを試験片上に特殊な方法で刻んだ微小格子の変形を直接かつ連続的に観察する方法（直接格子法）により測定することに成功し、それにより新たに得られた繰返し荷重下での実時間的なデータをもとにして疲労き裂伝播問題への考察を行なった。

第2章 実験方法

試料は鉄鋼材料で純鉄 (αFe)、炭素鋼 (S40C, SS41), 3%ケイ素鋼およびステンレス鋼 (SUS304) を用いた。

試験片表面には島田らにより開発されたピッチ 25, $4\mu\text{m}$ の直交耐熱格子が刻まれている。疲労試験は荷重制御の ΔK テストと変位制御の ΔJ テストを行なった。き裂先端近傍の格子の直接撮影は読取顕微鏡の台上に自動露出カメラ付きの光学顕微鏡を組合せた装置を用いて行ない、各き裂伝播段階で手動により繰返し荷重を与えて連続的に撮影した。

き裂先端のひずみはネガフィルム上の3格子 ($76.2\mu\text{m}$) をゲージレンジスとして、その変位量から順次求めた。また、き裂の開閉挙動も調べた。

第3章 疲労き裂先端の変形の様子とひずみ分布

疲労き裂先端部のひずみ変化を試験片表面に刻んだ微小格子の変形を直接かつ連続的に観察する手法（直接格子法）により求めた。

図1には純鉄のき裂伝播曲線と各伝播段階での最大荷重時のき裂先端の格子写真を示す。図2に繰返しひずみ分布を示す。き裂の進展につれてき裂先端部の繰返し変形域は拡がり、ひずみ変化幅も増大している。本論文ではひずみ振幅 $\Delta\epsilon_y = 0.4\%$ を繰返し塑性域の

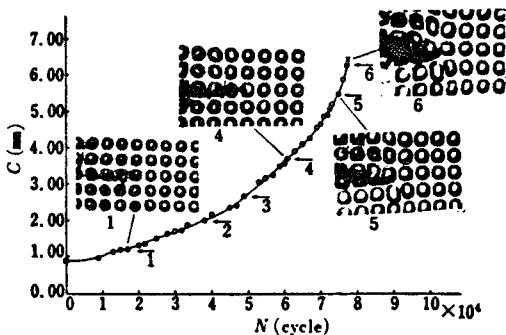


図1. き裂伝播曲線と格子写真 (αFe)

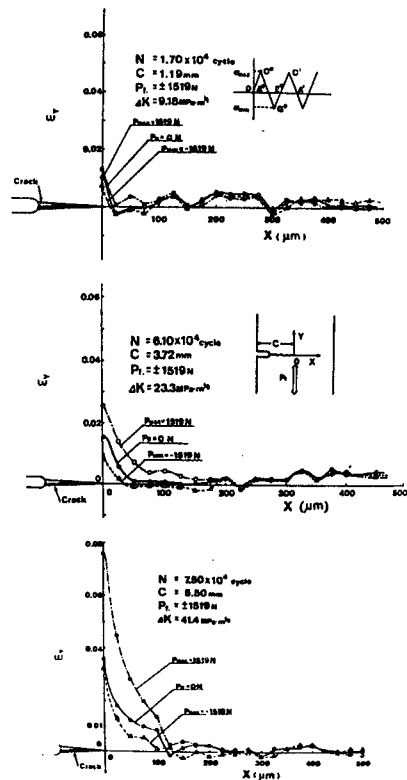


図2. き裂前方の繰返しひずみ分布 (αFe)

範囲と決めた。

さらに、3%ケイ素鋼に顕著にみられる転位腐食像とき裂先端部のひずみ分布との対応を調べ、繰返し塑性域内の強変形域でのひずみ履歴がき裂の伝播に対して実質的に重要な役割を果たしていることを示した。

第4章 疲労き裂先端のひずみ履歴 (CTSループ)

3章で疲労き裂先端の強変形域内の変形挙動がき裂の伝播に対して重要であることを示したが、本章ではさらにき裂先端で破壊が進行する、いわゆる破壊進行領域を含むき裂先端領域でのひずみ履歴に注目して、その一般的な特徴を調べた。CTS領域は軸方向長さ3格子(76.2 μm)、幅1格子(25.4 μm)で規定され、1サイクル中でのき裂先端部のひずみ履歴をCTSループ(Crack tip strain loop)と定義した。

その結果、CTSループの挙動はき裂の進展(ΔK の変化)や平均応力(R)さらに材質等により大きな相異がみられた。(図3)

この事実は外的力学因子や材料因子によって疲労き裂先端部のこうむる損傷の度合いが異なることを示すもので、疲労き裂伝播の様々な問題にとって実時間的なCTS挙動の解明の重要性が認められた。

さらに、疲労き裂の開閉挙動をき裂後方のき裂をはさんだ3格子の変位ループの屈曲点から調べた結果、CTSループの閉じた損傷のほとんどない部分はき裂後方の閉口現象に対応することがわかった。

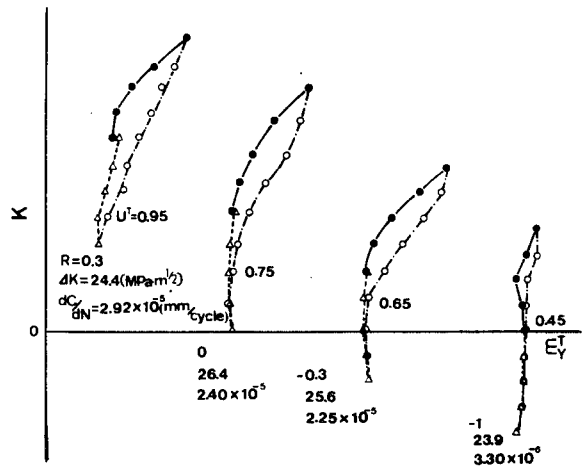


図3. 応力比(R)の異なる場合のCTSループ

第5章 疲労き裂伝播速度のCTSループによる整理

本章では疲労き裂伝播に直接的に関係しているものと考えられるCTSループからの情報をもとにして、き裂伝播速度を定量的に整理できるパラメータの導出を試みた。

まず、従来からの巨視的破壊力学量の補正、拡張として有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff}^I と有効 ΔJ 積分 ΔJ_{eff}^I を定義し、次にき裂先端の局所力学量としてのき裂先端のひずみ振幅 $\Delta \epsilon^T$ を新たに提案して整理を試みた。

得られた主な結果を下に示す。

1. CTSループの開いた応力成分から定義される有効応力拡大係数 ΔK_{eff}^I は、Elberらの ΔK_{eff} よりもさらに広い範囲にわたって、平均応力の効果や過大応力などの ΔK 領域における伝播の非線形現象を整理できる有効なパラメータであることがわかった。また本研究で用いた材

料では、 ΔK_{eff}^T の 2 乗則で表示された。(図 4, 図 5)

2. CTS ループの開いた部分から補正した有効 ΔJ 積分, ΔJ_{eff}^T は広い範囲にわたってかなり良い直線性が得られるが, 詳細に検討すると, き裂先端の塑性変形状態の変化による影響が全面降伏以後の大変形領域であらわれ, 伝播速度は直線関係から逸脱する傾向がみられた。(図 6)

3. 局所力学量としてのき裂の開口変位 (COD) による整理を試み, き裂後方の $100 \mu m$ の開口変位の範囲 ($\Delta \phi^{-100}$) と伝播速度の関係を調べたが広い範囲にわたって統一した整理はできなかった。

4. CTS ループのひずみ成分から 1 サイクル中のき裂先端のひずみ振幅 $\Delta \epsilon^T$ を新たに定義して整理を試みた。 $\Delta \epsilon^T$ はき裂先端部で規定される平均的な局所力学量であり, 小規模降伏領域から全断面降伏以後の大変形領域までの広い範囲にわたって直線で統一的に整理できることがわかった。また平均応力による伝播速度の相異はほとんどみられず, 過大応力の場合にみられる時間的な伝播挙動の変化に対しても $\Delta \epsilon^T$ で整理された。(図 7)

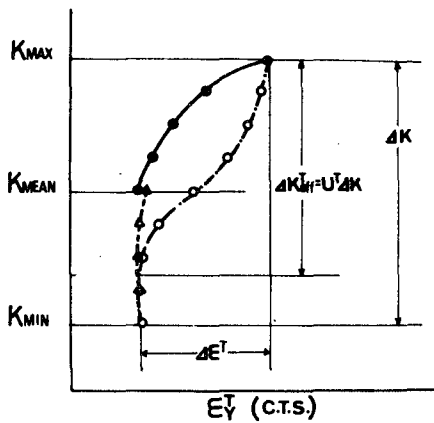


図 4. CTS ループと ΔK_{eff}^T , $\Delta \epsilon^T$

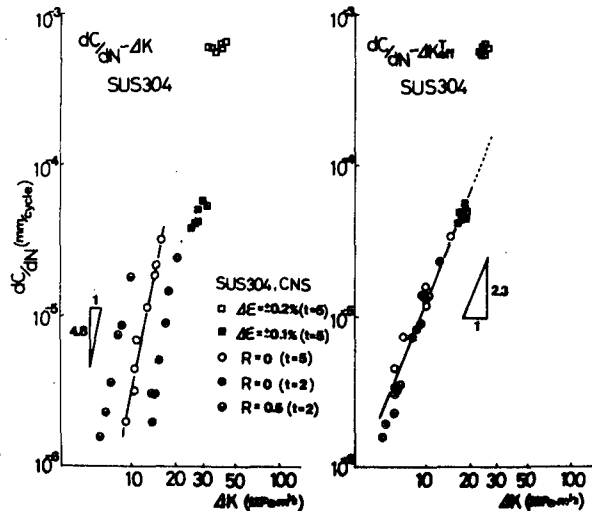


図 5. き裂伝播速度の ΔK と ΔK_{eff}^T による整理

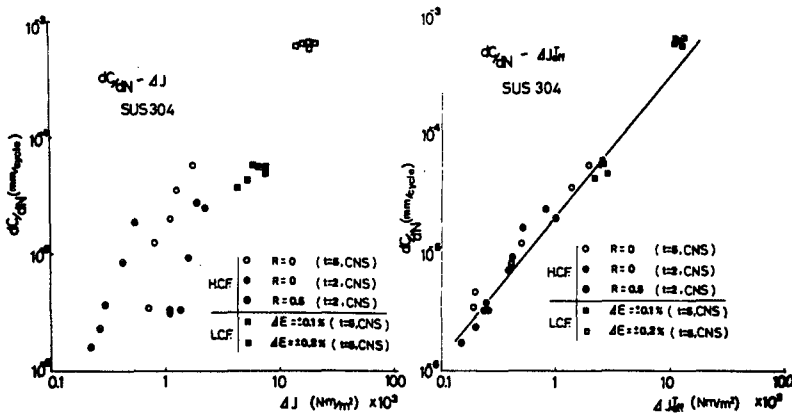


図 6. き裂伝播速度の ΔJ , ΔJ_{eff}^T による整理

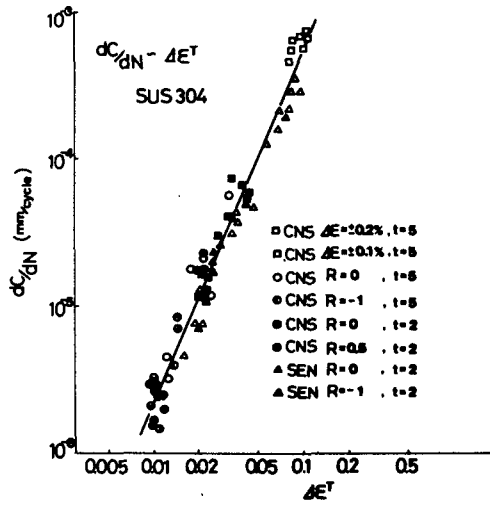


図 7. き裂伝播速度の $\Delta \epsilon^T$ による整理

第 6 章 き裂先端のひずみ振幅 $\Delta \epsilon^T$ による整理について

本章では新たに提案したパラメーター $\Delta \epsilon^T$ による疲労き裂伝播速度の整理法の特徴を示した。そして、 $\Delta \epsilon^T$ にみられた以上の特徴からして、 $\Delta \epsilon^T$ は弾塑性状態下での疲労き裂伝播速度表示法として有利な点があり、さらに構造用金属材料の選定などの実用面へ応用し得る可能性があることを示した。

第 7 章 結 論

本章では、直接格子法による疲労き裂先端のひずみ変化と伝播に関する研究で得られた知見を総括した。

審査結果の要旨

機械・構造用金属材料の疲労き裂伝播について、小規模降伏より大規模降伏条件下まで統一的に支配する因子を明らかにして、一般的なき裂伝播速度式を導出することは弾塑性破壊力学はもとより、疲労強度の高い材料の開発の上からも重要な問題である。しかし現在までに解明されているとは言い難い現状である。本論文は従来困難視されていたき裂先端近傍のひずみを実時間的に測定する新しい実験方法を考案し、その結果得られたひずみ変化曲線を基にして、疲労き裂伝播速度を鉄鋼材料について整理したもので、全文7章よりなる。

第1章は緒論で、従来の研究の概要と本研究の目的および意義について述べている。

第2章では疲労き裂先端近傍の局所的ひずみ変化を直接格子法を用いて実時間的に測定する実験方法と供試材料について述べている。

第3章では直接格子法を用いて測定したき裂先端のひずみ分布の変化より、き裂先端近傍の塑性変形の内容を検討している。

第4章ではき裂先端のひずみ履歴とき裂の開閉挙動とを関連づけて検討しており、その結果ひずみ履歴曲線の開いている応力範囲がき裂先端部に損傷を与えていることを示している。

第5章および第6章では第4章の結果をふまえて、ひずみ履歴曲線の形より得られた有効応力範囲を用いて、従来から用いられていた巨視的力学量 ΔK および ΔJ の補正・拡張として新たに ΔK_{eff}^T , ΔJ_{eff}^T を提案している。この方法でき裂伝播速度を整理し、これまで統一的に整理できなかった平均応力の効果や過大応力による遅延現象も統一的に整理できることを見出している。これは新しい知見である。さらにき裂先端のひずみ振幅 $\Delta \epsilon^T$ を提案し、これによりき裂伝播速度が小規模降伏より全断面降伏まで統一的に整理できる興味ある結果を得ている。これらの結果は構造用材料の選定など実用面へ応用し得ることを示唆している。

第7章は結論である。

以上要するに、本論文は鉄鋼材料の疲労き裂先端近傍のひずみ履歴測定法を考案し、その履歴を基にして、新しいき裂伝播則を導いたもので、金属工学の発展に寄与するところが少なくない。よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。