

氏 名	飯 野 豊
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 5 2 年 4 月 1 3 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭和 4 2 年 3 月 東北大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程修了
学 位 論 文 題 目	鉄鋼材料の疲労き裂伝播に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 鈴木 正彦 東北大学教授 玉手 統 東北大学教授 横堀 武夫 東北大学教授 島田 平八

論 文 内 容 要 旨

疲労破壊による機械や構造物の破壊事故は、不連続部での疲労き裂の発生と伝播によりもたらされることが非常に多い。不連続部ではき裂の発生は早く、き裂の伝播が疲労寿命の大半を占めるためき裂の伝播が特に重要な問題である。疲労き裂は常にき裂先端近傍に形成される塑性域の中を進展していくものであるから、疲労き裂の伝播の究明においては、塑性域の大きさや塑性域の内部の変形特性を明確にし、その上き裂のまわりになされる塑性仕事（蓄積エネルギー）を取り扱うことが是非とも必要である。

本論文は以上の観点にたつて

- (1) 疲労き裂先端に形成される塑性域やその内部の変形状態を実測し
- (2) 塑性域内に費やされる仕事量をもとめ、き裂伝播速度との関係を明確にする。
- (3) この関係の材料依存性を調べ、どのような機械的性質を有する材料が疲労き裂伝播に対して抵抗（靱性）があるかを明らかにする。

(4) さらにこの結果をもとに機械的性質のみからある材料の疲労き裂伝播挙動の推定や疲労破壊に対する靱性の評価を行う方法を確立する。

ことを目的としたものである。

第1章は緒論で現在までの疲労破壊の研究経過，現時点での問題点ならびに本論文の研究目的を述べたものである。

第2章では疲労き裂先端の塑性域の観察に関する従来の方法とその成果を述べた。また本研究の目的達成のためには新しい塑性域の観察法が必要であることを示した。

第3章ではこの新しい方法を述べた。市販のオーステナイトステンレス鋼（SUS304）の再結晶現象と変態現象の応用により，塑性ひずみ $\epsilon = 0.02$ 以上の領域と $\epsilon = 0.2$ 以上の領域を金属組織学的に直接観察できることを見出した。またこの結果は繰り返し変形を受ける場合（疲労）にも適用できること——すなわち 950°C 24時間の再結晶熱処理により蓄積ひずみ $\epsilon_{ac} = 0.02$ （蓄積エネルギーと密接な関係を持つ転位組織が単調変形における塑性ひずみ $\epsilon = 0.02$ のそれと同等である変形量）以上の領域を，また 670°C 3時間のマルテンサイトの黒化熱処理により $\epsilon_{ac} = 0.2$ 以上の領域を直接観察できること——を示した。

第4章ではSUS304の疲労き裂伝播試験を行うための実験条件を述べた。用いた試験片は厚さ25mmの標準コンパクトテンション試験片である。

第5章においては，SUS304のき裂伝播挙動（き裂伝播速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK の関係）を調べた後，第3章に述べた方法により種々のき裂伝播速度（ $da/dN = 0.048, 0.2, 0.7, 3 \mu\text{m}/\text{cycle}$ ）を持つ疲労き裂先端の塑性域を直接観察し，塑性域とき裂伝播速度の関係を明らかにした。蓄積塑性域の大きさはき裂伝播速度の増大とともに大きくなっており，その形状は模式的に第1図のように示すことができる。蓄積塑性域の大きさ $R(R_{x0.02}, R_{y0.02}, R_{x0.2}, R_{y0.2})$ とき裂伝播速度は第2図に示すように平面ひずみ状態では

$$da/dN = C(R)^2 \quad (1)$$

C：定数

なる関係を持つことが分かった。この関係式は，SUS304と機械的性質が非常に異なる $60\text{kg}/\text{mm}^2$ 級高張力鋼と珪素鋼 Fe-3Si（これらの材料については蓄積塑性域がすでに観察されている）についても成立することが示された。3つの材料について式(1)の係数Cを比較したところ，Cは降伏応力 σ_y が大きい材料ほど大きな値であった。このことは同一のき裂伝播速度を持つ疲労き裂のまわりの塑性域の大きさは σ_y が大きいほど小さいことを示すものである。1例として da/dN と $R_{x0.02}$ の関係式は

$$da/dN = 6.2 \times 10^{-5} \sigma_y^{1.3} (R_{x0.02})^2 \quad (2)$$

となる。式(2)は互いに機械的性質の異なる3つの材料から導かれた式であるから鉄鋼材料の

da/dNとR_{x0.02}の関係を与える一般式であるとみることができる。

第6章では、はじめに疲労き裂先端前方のある点が疲労破壊にいたるまでのひずみ履歴（繰返しひずみ挙動と蓄積ひずみ挙動の関係）を考察した。第3図に示すように疲労破壊は、繰返しひずみε_cによりひずみが蓄積されていき、蓄積ひずみε_{ac}がその材料の延性破壊ひずみε_fになると生じるものであることを示した。次に疲労き裂のまわりの塑性域形成に費やされる蓄積塑性仕事W_{0.02}を表示する式

$$W_{0.02} = 0.1 (\sigma_y + \sigma_{0.2}) R_{x0.02} \cdot R_{y0.02} \quad (3)$$

σ_{0.2}：真ひずみε=0.2に対応する真応力

を導き、3つの材料（SUS304，Fe-3Si，HT60）について式(3)からW_{0.02}を求め、da/dNとの関係を調べた。第4図はその結果を示す。この図から平面ひずみ状態ではW_{0.02}とda/dNは比例関係にあり

$$W_{0.02} = Q_{0.02} \cdot da/dN \quad (4)$$

Q_{0.02}：定数

であることがわかる。式(4)から

$$Q_{0.02} = \frac{W_{0.02}}{da/dN} \quad (5)$$

となりQ_{0.02}は単位き裂長さを伝播させるのに必要な塑性仕事量（エネルギー）を表わす。

Q_{0.02}はda/dNの値に依存せず材料により定まる定数でありHT60，Fe-3Si，SUS304の順に大きな値である。本論文ではこの材料定数Q_{0.02}を疲労き裂伝播仕事係数と名付けた。Q_{0.02}が大きいほど同一のda/dNの値をもたらすのに必要な仕事量は大きいから、Q_{0.02}の大なる材料ほど疲労破壊に対する抵抗（靱性）は高いといえることができる。

式(2)，(3)，(5)およびR_{x0.02}とR_{y0.02}の実験的關係R_{y0.02}=3R_{x0.02}からQ_{0.02}を導くと

$$Q_{0.02} = 4.8 \times 10^3 \frac{\sigma_y + \sigma_{0.2}}{\sigma_y^{1.3}} \quad (6)$$

となりQ_{0.02}は機械的性質のみで明確に表示される。高強度材料を含む種々の材料について式(6)からQ_{0.02}を求めると表1のようになる。Q_{0.02}が大きいほど疲労破壊に対して抵抗が大きいからSUS304は疲労破壊に対して非常に靱性のある材料であるといえる。

第7章では種々の鉄鋼材料について上記のQ_{0.02}と降伏応力基準設計におけるき裂伝播速度の関係——Q_{0.02}と任意のΔK/σ_yにおけるda/dNの関係——を調べた。第5図はその結果を示す。この図からQ_{0.02}の小さい高強度材料ほどあるΔK/σ_yの値に対してda/dNが大きいことが明示される。たとえばΔK/σ_y=1.5√mmにおけるda/dNの値は表1に示したようになりH-11鋼のda/dNはSUS304のその約500倍も大きな値である。設計応力を高めるためにσ_yの高

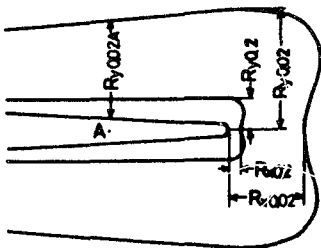
い材料の開発は是非とも必要であるが、静的強度や静的破壊靱性の増大と同時に疲労き裂伝播仕事係数も増大させ、疲労破壊に対する靱性も高めるようにすることが必要である。そのためには σ_y と同時に $\sigma_{0.2}$ も増大するように、すなわちひずみ硬化係数も増大するようにすることが必要である。

第5図からまた単純引張試験によって得られる機械的性質のみで、任意の材料の疲労き裂伝播挙動を求めることができる。その手順をフローチャートに示した。すなわち機械的性質から式(6)により $Q_{0.02}$ を求め、第5図からある $\Delta K/\sigma_y$ における da/dN を求め、これから $da/dN - \Delta K$ 関係を導くことができる。このフローチャートにしたがって推定した原子炉圧力容器用鋼 A533B の照射材の疲労き裂伝播挙動は実測された結果とよく一致した。したがって本研究で得られた上記の方法は構造材料の疲労き裂伝播挙動を調べる上で非常に有効であるといえる。

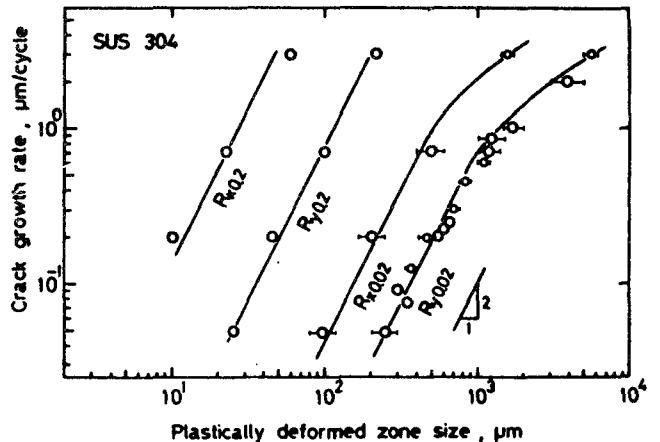
第8章は結論であり本研究で得られた結果が列記してある。

表1 種々の鉄鋼材料の $Q_{0.02}$ と $\Delta K/\sigma_y = 1.5\sqrt{\text{mm}}$ における da/dN

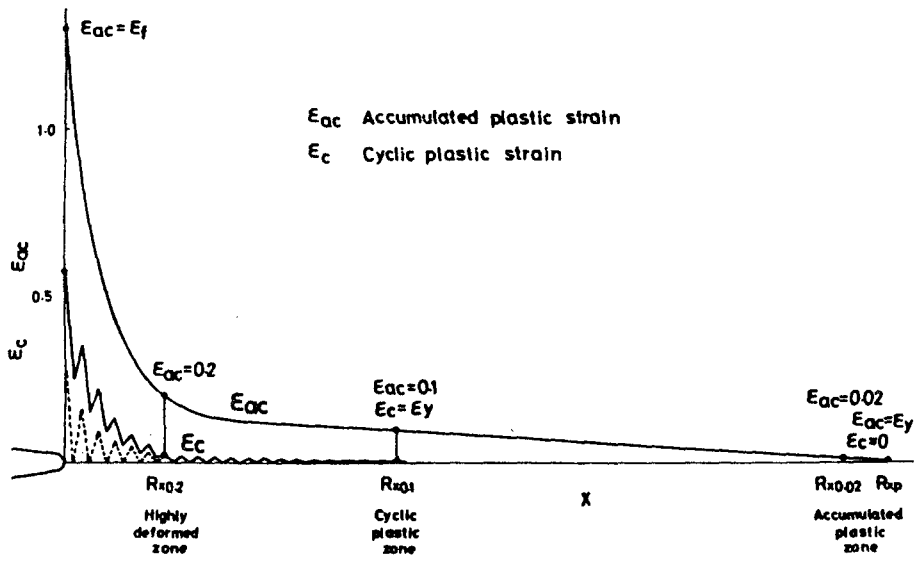
Material	$Q_{0.02}$ (kg · mm/mm/cycle)	da/dN ($\mu\text{m}/\text{cycle}$)
H-11	2250	~ 10
HP9-4-0.2	2290	—
18 Ni (300)	2350	~ 3
Trip Steel	2730	1
HT 60	3400	0.25
Fe-3 Si	4090	—
SUS 304	6390	0.02



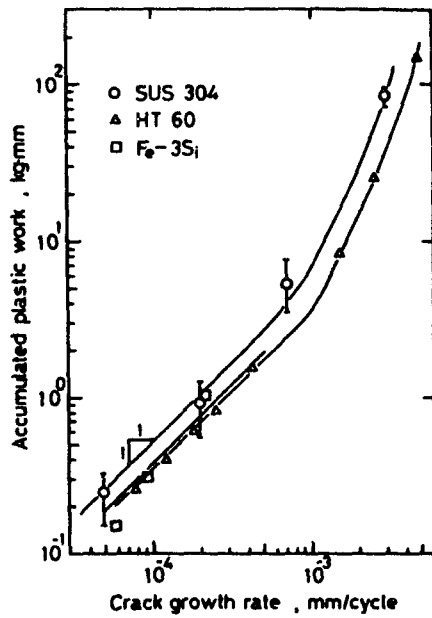
第1図



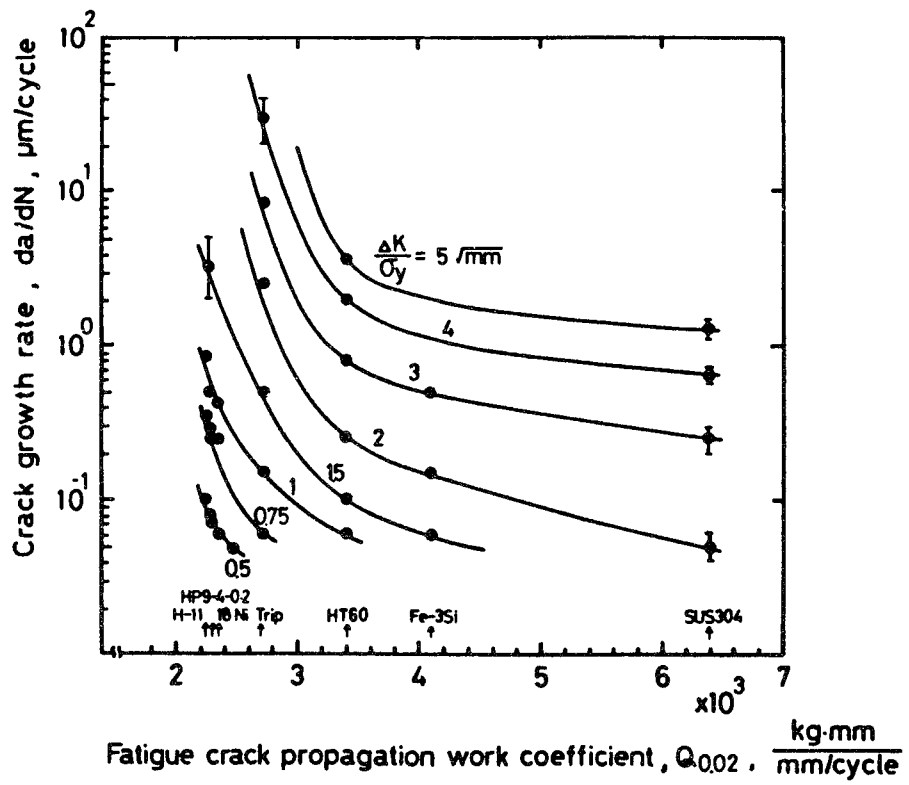
第2図



第 3 图



第 4 图



第 5 图

審査結果の要旨

金属材料の疲労破壊については古くから数多くの研究がなされているにもかかわらず、機械・構造物の疲労破壊はなおあとをたっていない。このため疲労き裂伝播特性の究明が強く要望されている。本論文は疲労き裂先端の塑性域内で費される塑性ひずみエネルギーに着目し、この量によって鉄鋼材の疲労き裂伝播特性の評価を行ったもので、8章よりなる。

第1章は緒論であり、疲労き裂伝播特性を明らかにするためには、き裂先端部の塑性変形挙動を明らかにしなければならないことを強調している。

第2章ではき裂先端部の塑性域検出法に関する従来の方法を述べ、これらの方法によっては実用鋼材について実用繰返し荷重下の条件では塑性域は検出し難いことを述べている。

第3章は著者の創意による実験法を述べたものであり、この方法によれば従来の方法では実測することの出来なかった2%までの塑性ひずみが明らかにされることを示している。

第4章は前章で得られた塑性ひずみ検出法を疲労き裂先端に応用するための疲労試験について述べたものである。

第5章では疲労き裂先端の塑性域を実測し、この大きさと疲労き裂伝播速度との関連性を検討し、定量的な関係式を導いている。

第6章では前章で得られた塑性域の大きさ及び塑性ひずみ分布より疲労き裂先端部で費される塑性ひずみエネルギーを算出し、これが疲労き裂伝播速度に直接比例すること、その比例定数は材料に特有な値であることを見出している。さらにこの比例定数は一軸引張試験から得られる材料の性質のみによって評価できるものであることを示している。著者はこの定数を疲労き裂伝播仕事係数と名づけ、この係数が材料の疲労き裂伝播に対する抵抗の尺度を与えるものであることを明らかにしている。

第7章では前章で与えられた疲労き裂伝播仕事係数によって降伏応力基準設計における鉄鋼材の疲労き裂伝播特性を論じ、疲労に対する靱性の高い鋼種の開発に対する指針を述べている。さらに中性子照射をうけた原子炉圧力容器用鋼の疲労き裂伝播特性を疲労き裂伝播仕事係数によって評価し、これが既存の実験値と一致することを得ている。この結果は疲労き裂伝播仕事係数による疲労き裂伝播特性の評価が妥当でありかつ実用上有用であることをしめしているものといえる。第8章は結論である。

以上要するに本論文は疲労き裂先端の塑性ひずみを検出する新しい実験法によりき裂先端部で費される塑性ひずみエネルギーを求め、これより鉄鋼材の疲労き裂伝播特性が一軸引張試験によって得られる材料の性質のみから評価できることを明らかにしたものであって、機械工学に寄与するところ少なくない。

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。