

平成 30 年 6 月 9 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14120

研究課題名(和文) き裂論に基づく耐疲労材料の開発と評価

研究課題名(英文) Development and evaluation with theory of crack

研究代表者

野口 博司 (Hiroshi, Noguchi)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：80164680

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：A. 0.18%すべてがInterstitial Cとなる時の疲労限度比は、 $w_0/B = 0.65$ 、 $w_0/\text{下降伏点} = 1.13$ であった。粒界で発生した疲労き裂は粒内ですべて停留し、疲労破壊は、粒界で発生した疲労き裂の合体によって生じた。 $K_{th}$ とInterstitial-Cの量の関係を世界で初めて、測定した。  
B. き裂でのひずみの特異分布とビッカース圧こんでのひずみの特異分布には相関があることを解析的にしめした。その相関がもっともよい圧子形状を2次元平面ひずみ条件下で探索し、加工硬化係数に依存した圧子形状を提案した。

研究成果の概要(英文)：A. The fatigue limit ratio of the stellwas  $w_0/$  (ultimate tensile strength)  $= 0.65$  and  $w_0/$  lower yield strength  $= 1.13$ , when Interstitial Carbon content is 0.18%. All fatigue cracks which occurred in the grain boundary have been stopped in the grain boundary and fatigue fracture was occurred by coalescence of the intergranular fatigue crack. The relationship between  $K_{th}$  and interstitial Carbon content was measured.  
B. I showed analytically that there is correlation in the singular distribution of the strain by the crack and the siglar distribution of the strain by the Vickers impression. The best indenter shape under the two-dimensional plane strain condition was proposed dependent on the work-hardening coefficient.

研究分野：材料力学

キーワード：き裂 疲労限度 停留 硬さ 炭素

### 1. 研究開始当初の背景

国土強靱化計画、水素社会の構築などで金属疲労が益々問題になることが予測される。しかしながら金属疲労の研究は衰退の一途をたどっている。それは、金属疲労特性は受動的に計測されるものであり、また機械設計者の利便性を考慮して、過去のデータに基づいて経験式が提案されているためである。受動的に計測するという事実と、この経験式が存在が研究の駆動力を阻害している。

### 2. 研究の目的

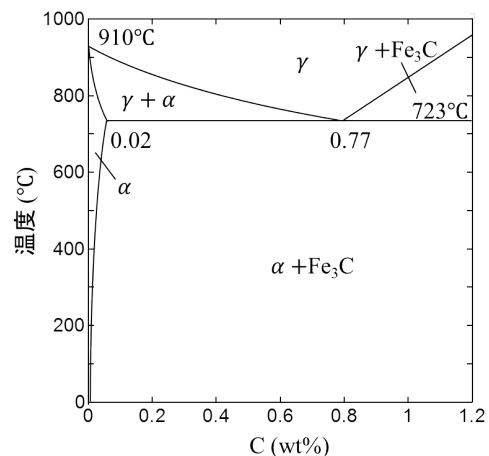
本研究は、金属疲労特性を「き裂論」という新しい切り口で再評価し、それによって、過去の経験式の物理的意味を問い直し、経験式から離れた特性を能動的につくれることを示すことによって、金属疲労研究に新しい展開を切り開くことを目的とする。具体的には、疲れない鋼を「き裂論」によって開発することによって、新しい可能性を示すことを目標とする。

### 3. 研究の方法

Fe-Cの状態図を参考に、炉冷すれば室温では、炭素はほとんどFeに固溶できず、微細なFe<sub>3</sub>Cの形態で存在する。しかしわずかなInterstitial Cがコットレル雰囲気を作り、大きなひずみ時効を誘起し、疲労き裂停留現象を安定なものし、鋼に疲労限度を付与している。しかし特殊な熱処理を行えば、0.18%すべてがInterstitial Cとなる。その時の疲労限度比は  $w_0/w_B = 0.65$ ,  $w_0$ /下降伏点 = 1.13であった。この材料における  $a/w_B = 0.8$  ( $a$ は応力振幅)のときの疲労破壊過程を明らかにした。粒界で発生した疲労き裂は粒内ですべて停留し、疲労破壊は、粒界で発生した疲労き裂の合体によって生じた。 $w_B$ で表されない極めて大きな疲労き裂停留能力を有しており、 $w_0/w_B = 0.8$ 以上を達成できる可能性が示唆された。事前研究に明らかのようにInterstitial-Cが多い材料では、平滑材では疲労き裂の停留限界応力を測定

することができない。そこで、微小応力集中源を導入することによって、停留限界  $K_{th}$ を測定する方法を採用した。 $K_{th}$ とInterstitial-Cの量の関係を世界で初めて、測定する。ところで従来の鋼におけるInterstitial-Cは制御されていないので、取得するデータは耐疲労特性を開発する際の新規であり最も基本となる疲労データとなる。対象とする鋼は、粒界にCがないため、粒界強度が弱く、粒界強度で疲労強度が支配されている。粒界のみに偏析し、粒界の強度を上げる元素は金属学では知られているので、その元素を微量添加した鋼における粒界疲労き裂発生限界を測定する。そして、粒界疲労き裂発生限界と添加元素の量の関係を明らかにする。

そして、これらの研究成果から得られた、二種類のデータ(粒界き裂発生限界と粒内き裂停留限界)の定量的競合関係を利用して、疲れない鋼(極めて疲れにくい鋼)を作製し、その疲労特性を公開することによって、「き裂論」による耐疲労材料の開発方法を例示する。



状態図

## B. 耐疲労特性を硬さで代表させるときの最適なピッカース圧子形状を決定

Aに結果によれば、き裂先端近傍の材料挙動は平滑材のそれとは大きく異なる。一方、経験的に疲労特性をピッカース硬度で表した。そこで、き裂でのひずみの特異分布とピッカース圧こんでのひずみの特異分布には相関があるはずである。その相関がもっともよい圧子形状を2次元平面ひずみ条件下で探索した。本研究で得られた2次元解析での最適な圧子角度を基に、き裂先端の特異ひずみ場と最も相関がある圧子の三次元形状を探索した。そして、従来の形状のピッカース圧子で得られた硬度と最適な圧子で得られた硬度を実際に比較し、疲労強度との相関性について議論した。このことによって、従来の経験式の根拠と限界が明確になり、その拡張も可能となる。

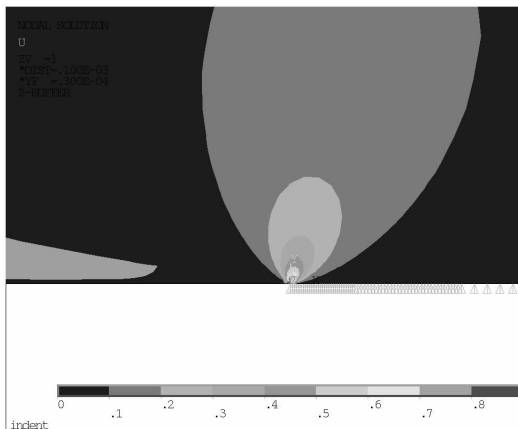
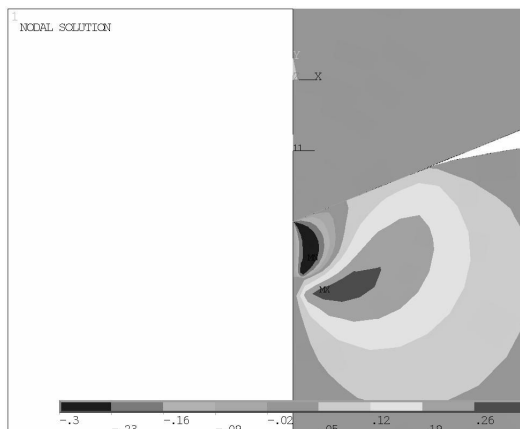


図 き裂の弾塑性解析結果( r )



図硬さ試験の弾塑性解析結果( r )

## 4. 研究成果

A. 疲れない鋼の開発 炉冷すれば室温では、炭素はほとんど Fe に固溶できず、微細な Fe<sub>3</sub>C の形態で存在する。しかしわずかな Interstitial C がコトトレル雰囲気を作り、大きなひずみ時効を誘起し、疲労き裂停留現象を安定なものし、鋼に疲労限度を付与している。しかし特殊な熱処理を行えば、0.18%すべてが Interstitial C となる。その時の疲労限度比は  $\sigma_{w0}/\sigma_B=0.65$ ,  $\sigma_{w0}$ /下降伏点=1.13 であった。粒界で発生した疲労き裂は粒内ですべて停留し、疲労破壊は、粒界で発生した疲労き裂の合体によって生じた。 $\sigma_B$  で表されない極めて大きな疲労き裂停留能力を有しており、 $\sigma_{w0}/\sigma_B=0.8$  以上を達成できる可能性が示唆された。Interstitial-C が多い材料では、平滑材では疲労き裂の停留限界応力を測定することができない。そこで、微小応力集中源を導入することによって、停留限界  $K_{th}$  を測定する方法を採用した。  $K_{th}$  と Interstitial-C の量の関係を世界で初めて、測定した。従来の鋼における Interstitial-C は制御されていないので、取得するデータは耐疲労特性を開発する際の新規であり最も基本となる疲労データとなった。

B. 耐疲労特性を硬さで代表させるときの最適なピッカース圧子形状を決定「き裂論」によれば、き裂先端近傍の材料挙動は平滑材のそれとは大きく異なる。一方、経験的に疲労特性をピッカース硬度で表す。そこで、き裂でのひずみの特異分布とピッカース圧こんでのひずみの特異分布には相関があることを解析的にしめした。その相関がもっともよい圧子形状を2次元平面ひずみ条件下で探索し、加工硬化係数に依存した圧子形状を提案した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 4 件)

1. Dependence of Fatigue Limit on Step Height for Stepped 0.45% Carbon Steel with Singular Stress Field, Shigeru HAMADA, Tsuyoshi MORIYAMA and Hiroshi NOGUCHI, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 188 (February 2018), pp. 20-35.
2. Effects of the Shape of Small Flaws and Damage due to a Focused Ion Beam on the Fatigue Strength Characteristics of Annealed Medium-Carbon Steel, Junji SAKAMOTO, Shigeru HAMADA and Hiroshi NOGUCHI, Engineering Failure Analysis, Vol. 87(May 2018), pp. 49-68.
3. Investigation on Mode I Propagation Behavior of Fatigue Crack in Precipitation-Hardened Aluminum Alloy with Different Mg Content, Samsol Faizal bin ANIS, Motomichi KOYAMA and Hiroshi NOGUCHI, Materials Science Forum Vol. 889 (2017), pp. 143-147.
4. Temperature Dependence of Transgranular Fatigue Crack Resistance in an Interstitial Free Steel and Fe-C Steel with a Supersaturated Carbon: Effect of Dynamic Strain Aging and Dynamic Precipitation, Bochuan LI, Motomichi KOYAMA, Eisaku SAKURADA, Nobuyuki YOSHIMURA, Kohsaku USHIODA and Hiroshi NOGUCHI, International Journal of Fatigue, Vol. 110 (May 2018), pp. 1-9.

〔学会発表〕(計 2 件)

1. 野口博司、難燃性マグネシウムの疲労特性, 日本軽金属学会第133回秋期大会, 2017年5月20 - 21日。
2. 沈洲暁, 濱田繁, 小山元道, 野口博司, 疲労き裂とインデンテーションの塑性域の相似点に基づいた硬さによる疲労限度予測の改善, 日本機械学会九州支部総会講演会2018年3月1日

〔産業財産権〕

なし

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.mech.kyushu-u.ac.jp/~solid/>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者のみ

野口 博司(Hiroshi NOGUCHI)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号 : 80164680