低炭素鋼の疲労限度の負荷速度依存性に対する速度過程論的解析[†]

Benjamin GUENNEC* 高橋 順**
小熊 規泰*** 酒井 達雄****

Rate Process Analysis of the Loading Frequency Effect on the Fatigue Endurance of Low Carbon Steel

by

Benjamin GUENNEC*, Jun TAKAHASHI**,
Noriyasu OGUMA*** and Tatsuo SAKAI****

Due to the bcc microstructure of α -phase ferrite, low carbon steels highlight a significant effect of the strain rate on its mechanical properties, such as yield stress. Indeed, at a constant temperature, the higher the strain rate is, the higher the uniaxial yield stress becomes. Some studies also pointed out similar trend for the fatigue strength of low carbon steels in high cycle fatigue regime. An influence of the loading frequency on the dislocation arrangement of observed fatigued specimens has also been reported. Nevertheless, strain rate effect on the fatigue strength of low carbon steels has not been discussed from a viewpoint of rate process yet. Referring to this point, an analytical model based on the activation energy of dislocations was proposed to evaluate the fatigue endurance of low carbon steels. Accepting five typical data sets actually obtained by fatigue tests, analytical results based on the present model were compared with the experimental data. Thus, it was found that the analytical results are in good agreement with the experimental results. In addition, this work also includes a discussion on the activation energy of the dislocation related to the present model. Activation volume of the dislocations thus calculated showed good agreement with corresponding experimental data available in the literature.

Key words:

Material for general structural applications, Reliability, Fatigue strength, Dislocation activation energy.

1 緒 言

金属材料の疲労強度の負荷速度依存性については、これまで多くの研究が行われてきた^{1)~14)}。その多くがいくつかの負荷速度で疲労試験を実施して、 $S-N$ 特性に対する負荷速度の影響を実験的に調べた研究が主であった。一般に、アルミニウム合金や銅合金などの非鉄金属は明確な疲労限度が現れず、疲労特性に対する負荷速度の影響も小さいと考えられている^{7)~14)}。一方、多くの鉄鋼材料については明確な疲労限度が現れる特徴があると共に、体心立方晶系のフェライト相組織をもつ低炭素鋼の場合は、疲労限度に対する負荷速度の依存性が大きいことが知られている^{1)~6)}。

このような背景の中で、Bennetら¹⁵⁾は疲労限度と負荷速度の関係を反応速度論と類似の観点から考察し、降伏強度のひずみ速度依存性を基礎とした解析モデルを提案した。そして、このモデルにより負荷速度を変えた実験結果の傾向をうまく説明できることを報告している。この

モデルをもとに豊貞ら¹⁶⁾はひずみ速度と温度の効果を含めた軟鋼の構成式を提案している。また、田川ら¹⁷⁾は低中強度の鋼について降伏強度に着目したひずみ速度依存性の理論的解釈を展開している。一方、著者ら⁹⁾は繰返し荷重下での転位運動を基礎として、疲労限度の負荷速度依存性に対する物理モデルを提案すると共に、種々の負荷速度下で低炭素鋼に関する疲労試験を実施して、提案モデルの適合性を検証した。

著者らはこれまで、転位の運動論を基礎とした Seegerモデル¹⁸⁾に依拠した研究成果を報告してきたが⁹⁾、Bennetら¹⁵⁾の提案に端を発する速度過程論的な観点から負荷速度と疲労限度の関係を論ずることはしてこなかった。そこで、本研究では低炭素鋼の疲労限度に対する負荷速度依存性について、一連の実験結果について改めて速度過程論の立場から再検証を行い、速度過程論的な解析モデルの拡張とその適合性を検証した。

[†] 原稿受理 平成30年8月10日 Received Aug. 10, 2018 ©2019 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 立命館大学 理工学部機械工学科 〒525-8577 草津市野路東
Department of Mechanical Engineering, College of Science and Engineering, Ritsumeikan University, Nojihigashi, Kusatsu, 525-8577.

** デンカ(株) デンカイノベーションセンター 〒194-8560 東京都町田市旭町
Denka Innovation Center, Denka Company, Asahi-cho, Machida, Tokyo 194-8560.

*** 富山大学 理工学部 〒930-8555 富山市五福
University of Toyama, Faculty of Engineering, Gofuku, Toyama 930-8555.

**** 立命館大学 総合科学技術研究機構 〒525-8577 草津市野路東
Research Organization of Science and Technology, Ritsumeikan University, Nojihigashi, Kusatsu, 525-8577.

2 疲労特性の負荷速度依存性に関する既往の研究概要

金属材料の疲労特性の負荷速度依存性を詳細に調べるため、これまで何人かの研究者により負荷周波数を幅広く変化させた疲労試験が実施されている^{1),2)-4)}。1960年代の初頭に、平ら¹⁾や山根²⁾は種々の負荷速度で低炭素鋼の平面曲げ疲労試験を行い、負荷周波数に対する疲労限度の負荷速度依存性を調べ、Fig.1 に△および□で示すとおり負荷速度の上昇と共に疲労限度が上昇することを明らかにしている。続いて、菊川ら⁴⁾は2種類の低炭素鋼(S10CとS20C)について種々の負荷周波数で軸荷重疲労試験を行い、1964年に疲労特性の負荷速度依存性に対する体系的な研究成果を報告している。ここでは、40Hzから100kHzにわたる炭素鋼の疲労挙動を調べるため、油圧サーボ式疲労試験機と超音波疲労試験技術を用いた疲労試験を実施して、*S-N*特性の比較を行っている。その結果をFig.1 に●および▼で示す。S10CとS20Cのいずれの炭素鋼についても、疲労限度は負荷速度の上昇と共に連続的に上昇しており、疲労限度に対する顕著な負荷速度依存性が見られる。その特徴は平ら¹⁾、山根²⁾の実験結果とも一致しており、平面曲げ・軸荷重などの負荷様式によらず共通の負荷速度依存性が確認される。

一方、金属疲労に関する研究の趨勢の中で、1990年代後半頃から応力繰返し数が 10^7 回以上の長寿命域における金属材料の疲労破壊が報告され、金属材料の超高サイクル疲労特性が注目されるようになった^{7),8)}。しかし、通常の負荷速度で超高サイクル領域まで疲労試験を実施するためには長時間を要し、試験時間を短縮する観点から、超音波技術を利用した超音波疲労試験がしばしば実施されるようになった⁹⁾。そして、従来の負荷速度での疲労試験結果と超音波疲労試験結果を比較し、大きな差はないとの立場から、高強度鋼^{10),11)}、アルミ合金¹²⁾、チタン合金¹³⁾、マグネジウム合金¹⁴⁾といった各種金属材料について超音波疲労試験が実施され、貴重な実験結果が報告されてきた。

しかし、平ら¹⁾、山根²⁾、菊川ら⁴⁾の報告に見られるとおり、従来から金属材料の疲労特性は負荷速度の影響を受けることが指摘されており、2000年代に入って、Papakyriacouら¹⁹⁾は体心立方晶純タンタルの疲労特性を調べ、超音波疲労実験による疲労限度は通常の油圧サーボ式試験の疲労限度よりはるかに高くなることを報告している。また、著者ら⁵⁾は、低炭素鋼(S15C)の疲労特性における負荷速度の影響を明確にするため、0.2Hz~20kHzの範囲の種々の負荷速度で疲労試験を実施し、疲労特性の負荷速度依存性について系統的な検証を行った。ここで得られた疲労試験結果に関する*S-N*曲線をFig.2に示す。これより、低炭素鋼の疲労特性が負荷速度に対してかなり顕著な影響を受けることが確認できた。Fig.2の結果における疲労限度の負荷速度依存性は、後述のとおり、従来データに対するFig.1の結果ともほぼ一致している。さらに、Bachら²⁰⁾やTorabianら²¹⁾も、同じく低炭素鋼に

Fig. 1 Effect of the loading frequency on fatigue endurance of several carbon steels^{1),2)-4)}.

Fig. 2 *S-N* curves at various loading frequencies of S15C steel⁵⁾.

(a)

(b)

Fig. 3 Dislocation structure caused by fatigue loading: (a) at loading frequency $f=0.2$ Hz; (b) at $f=20$ kHz⁶⁾.

ついて類似の疲労試験を行い、これらと同様の傾向が確認されたことを報告している。

疲労特性の負荷速度依存性について、著者らは、これまで転位の運動論や転位構造との関係に着目し、疲労過程で S15C 材の組織中に形成される転位構造を観察した⁶⁾。体心立方晶系フェライト結晶粒内で観察された転位画像を Fig.3 に示す。通常の試験機で実施した（負荷周波数は 0.2~140Hz）試料については Fig.3(a) に示すような転位組織が確認され、微細なセルやラダー構造が形成されることがわかる。これらの組織は刃状転位と螺旋転位の両者が激しく運動し、転位壁を形成することにより生じたものである⁹⁾。一方、Fig.3(b) は超音波疲労試験（負荷周波数 20kHz）で観察された転位組織を示すもので、この場合は、局部的に転位が密集したフォレストが見られるだけで、転位壁が形成されることはなく、Fig.3(a) で見られたようなセル構造は形成されない特徴がある。Low ら²²⁾ や Mughrabi ら²³⁾ の論文によれば、高速負荷や低温条件下では螺旋転位の移動性が著しく低下するが、刃状転位の移動性は相対的に影響が小さいことが報告されている。この観点に立てば、刃状転位は写真の外まで容易に移動するので Fig.3(b) 中の転位線は主に螺旋転位に対応すると考えられる。この現象は Caillard²⁴⁾ により最近の TEM 観察でも確認されている。なお、Peierls 応力が低い面心立方晶や稠密六方晶系の金属材料では負荷速度の差による組織の変化が大きく現れず負荷速度依存性は小さくなると推察される。

3 速度過程論的モデル構成

材料の破壊特性値の変動に対する概念として確率過程論があげられる。確率過程論は各種材料の降伏現象、ぜい性・延性破壊、疲労、クリープなどに対する合理的な解釈を与えるものとして多数報告されている^{25),26)}。確率過程論の基本は、対象領域が非破壊状態から破壊状態へ遷移する確率（遷移確率）を基礎として、時間依存性の破壊現象の本質を議論するところにある。この遷移確率の物理的意味は熱活性化過程の速度として認識されている。

一方、破壊に対する作用力の速度の効果については確率過程に含まれていない。しかし、ひずみ速度は材料強度に影響する重要因子であることから、ひずみ速度依存性を熱活性化過程の評価式に組み込むことは有効な手法であると考えられる。これに加えて、著者ら⁶⁾の研究によれば、前述のとおり、繰返し荷重の負荷速度（ひずみ速度）に応じて、低炭素鋼中に形成される転位組織が異なることがわかっている。とくに、高ひずみ速度条件下では、体心立方晶格子の摩擦により転位の運動性に影響が見られることが報告されている^{23),27)}。

崎野²⁸⁾ は負荷速度を鋼材に生じるひずみ速度に置き換え、この変形応力のひずみ速度依存性を転位の熱活性化過程としてアレニウス式に当てはめ、次式で表すことを提案している。

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 \exp\left(\frac{-U_a}{k_B T}\right) \quad (1)$$

ここで $\dot{\varepsilon}$ はひずみ速度、 $\dot{\varepsilon}_0$ は頻度係数、 U_a は活性化エネルギー、 k_B はボルツマン定数、 T は絶対温度である²⁵⁾。また、Bennet ら¹⁵⁾ は次式のようなひずみ速度・温度パラメータ R を提案している。

$$R = T \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_0}{\dot{\varepsilon}}\right) \quad (2)$$

ここで、鋼材の降伏応力 σ はひずみ速度に対してアレニウス型の依存性を仮定すれば²⁹⁾、次式が得られる。

$$\sigma = A \exp\left(\frac{B}{R}\right) \quad (3)$$

ここに、 A と B は材料定数である。これより、式(3)に式(2)を代入し、 A と B を温度依存性型パラメータ α 、 β と考えると、式(4)が得られる。

$$\sigma = \alpha(T) \exp\left(\frac{\beta(T)}{T \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_0}{\dot{\varepsilon}}\right)}\right) \quad (4)$$

著者ら⁵⁾ は負荷周波数を 0.2Hz~140Hz と変えた油圧サーボ疲労試験を行い、各ひずみ速度における降伏応力が疲労限度応力と比例することを確認した。さらに、疲労限度 E の負荷レベルにおけるひずみを ε_E 、そのときの繰返し数を f とすると、ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ は式(5)のように表すことができる。

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_E}{1/(2f)} \quad (5)$$

ここで、式(4)で温度 T を室温 $T_0=293\text{K}$ に固定すると、 $\alpha(T)$ と $\beta(T)$ は室温に対応する材料定数 α_0 、 β_0 となる。この結果、室温 T_0 での疲労限度 E は式(5)を式(4)に代入して、式(6)のように表すことができる。

$$E = \alpha_0 \exp\left(\frac{\beta_0}{T_0 \ln\left(\frac{f_0}{f}\right)}\right) \quad (6)$$

ここに、 f_0 は頻度係数 $\dot{\varepsilon}_0$ に対応する周波数を意味し、式(5)で $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0$ とおくことにより、次式で表される。

$$f_0 = \frac{\dot{\varepsilon}_0}{2\varepsilon_E} \quad (7)$$

4 提案モデルによる解析結果

4・1 解析対象とする実験結果

疲労限度に対する繰返し周波数 f の影響を式(6)で評価する場合、その妥当性を検証するために広い周波数範囲で実施した疲労試験結果が必要である。このためには、油圧サーボ疲労試験機だけでなく、超音波疲労試験機による疲労試験を併用する必要がある。

本研究では、第 3 章に示した提案モデルへの適合性を調べるために、著者らの実験結果だけでなく、広い周波数域で疲労試験を行った既往の文献の結果も解析対象に含めることとした。解析対象とした既往の論文は、低炭素鋼を対象として軸荷重疲労試験を行った菊川ら⁴⁾の実験

Table 1 Data sources used in the present analysis.

Ref.	Ref. code	Material	Loading type	Frequency range (Hz)
4)	(a)-1	S10C	axial	40~10 ⁵
4)	(a)-2	S20C	axial	40~10 ⁵
5)	(a)-3	S15C	axial	0.2~2×10 ⁴
1)	(b)-1	0.23%C	bending	150~2000
2)	(b)-2	S20C	bending	200~18000

Fig. 4 Comparison of fatigue endurance approximation by model and actual fatigue test results (a) in axial loading and (b) in plane bending configurations.

Table 2 Numerical expressions of β_0 and α_0 and correlation coefficient of regression r , for $f_0 = 3 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$.

Ref. code	β_0 (K)	α_0 (MPa)	r
(a)-1	4400	89	0.997
(a)-2	3550	110	0.997
(a)-3	2400	125	0.999
(b)-1	7000	56	0.980
(b)-2	5100	82	0.996

結果と、平面曲げ疲労試験を行った平らりおよび山根²⁾の実験結果である。なお、著者ら⁵⁾の実験は菊川らと同様の軸荷重疲労試験の結果である。それぞれの疲労試験における対象材種、荷重様式、周波数範囲などの試験仕様の一覧を Table1 に示す。

4・2 パラメータの設定

はじめに、式(7)で表される f_0 の値を設定する。前述のように f_0 は $\dot{\epsilon}_0$ と関係する定数なので、鉄鋼材料の研究で報告されている式(2)の $\dot{\epsilon}_0$ を参考にする。栗原²⁹⁾は、鉄材の引張り特性のひずみ速度依存性を実験的に調べ、 $\dot{\epsilon}_0$ として 10^8 s^{-1} を設定している。また、山本ら³⁰⁾は鋳鉄の衝撃引張り強さのひずみ速度と温度依存性の関係を検討する際に同じ値 10^8 s^{-1} を使用している。さらに、崎野²⁸⁾はSS400 鋼の変形抵抗曲線を基礎として $\dot{\epsilon}_0 = 6.13 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ なる値を報告している。これらは $\dot{\epsilon}_0$ を定数として扱った報告であるが、式(1)の $\dot{\epsilon}_0$ がひずみに依存して変化することを示した報告もある。Conrad ら³¹⁾は純鉄における $\dot{\epsilon}_0$ を実験的に検討し、塑性ひずみを 10^{-3} から 2×10^{-2} に変化させたとき、 $\dot{\epsilon}_0$ は概ね 10^7 s^{-1} から $5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ に変わることを報告している。

本報告では、低炭素鋼を対象とした疲労限度の負荷速度依存性の解析が主眼であるが、Conrad ら³¹⁾の実験結果を参照し、ひずみ速度の塑性ひずみ依存性も考慮することとする。ここで、著者らの実験結果によれば低炭素鋼 S15C の疲労限度応力の塑性ひずみの値は約 10^{-3} であった⁵⁾。Conrad ら³¹⁾の報告の 10^{-3} に対応する $\dot{\epsilon}_0$ の値を採用することにし、 $\dot{\epsilon}_0$ の値として 10^7 s^{-1} を用いることとした。また、著者らの実験によれば、0.2Hz~140Hz の周波数範囲で求めた S15C の疲労限度応力における全ひずみ範囲は約 0.002 であったので、 ϵ_E を 0.002 に固定する。その結果、 f_0 については $\dot{\epsilon}_0$ と ϵ_E の数値を式(7)に代入し、有効桁数 1 の概数として $f_0 = 3 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ を設定した。

次に、ここで設定した f_0 を用いて、疲労限度の周波数依存性を式(6)で近似することとする。このとき式(6)の材料定数 α_0 と β_0 についてはパレート解³²⁾ (pareto optimal solution)を援用して各数値を求める。以上のように設定したパラメータ f_0 , α_0 , β_0 を式(6)に代入することで、疲労限度の周波数依存性を速度過程論の立場から解析できることになる。

4・3 解析結果および考察

Table1 に示した実験条件ごとに前節の手順で設定した α_0 , β_0 の値を Table2 に示す。これらの数値を用いることにより、式(6)により疲労限度 E の周波数依存性を解析することができる。Fig.4(a)は軸荷重疲労試験の場合、Fig.4(b)は平面曲げ疲労試験の場合の実験結果と解析結果である。いずれの荷重様式でも解析結果は実験データとよく対応していることがわかる。なお、実験値と解析値の間の相関係数 r 値は Table2 に示すとおりであり、いずれの場合も r は 0.980 以上で高い相関性を示すことがわかった。したがって、疲労限度の負荷速度依存性が本報で提案した速度過程論的解析モデルでよく説明できることがわかる。

ここで Table2 に示す α_0 , β_0 の 2 つのパラメータ間の相関に注目する。Fig.5 にこれら 2 つのパラメータ α_0 , β_0 の関係をプロットした。これより、荷重様式が軸荷重の場合でも平面曲げの場合でも、両パラメータ間に負の相関が

Fig. 5 Relationship between α_0 and β_0 parameter values for every data considered.

あり、 β_0 が大きくなる程 α_0 が小さくなる傾向が見られる。式(6)により β_0 が大きくなる程、疲労限度 E の負荷周波数依存性が顕著になり、Fig.4に示す曲線の傾きが高くなる。また、Fig.5より平面曲げ疲労試験における(b)グループの実験結果は、軸荷重疲労試験で得られた(a)グループの実験結果より β_0 が大きく α_0 が小さくなる傾向がある。ここで、Fig.4を参照すると、疲労限度 E は両荷重様式とも200~400MPa程度の共通の領域にあるので、式(6)からわかるように、 β_0 が大きくなれば α_0 が減少することになる。なお、軸荷重と平面曲げの両荷重様式に対するFig.5中の結果がほぼ一本の共通直線で表示される特徴がみられる。

5 活性化エネルギーの転位論的解釈

疲労限度の周波数依存性について、本章では転位の運動論の観点から考察を加える。最初に、式(1)より、転位の熱活性化エネルギー U_a は次式のように表すことができる。

$$U_a = k_B T \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}_0}{\dot{\epsilon}} \right) \quad (8)$$

ここで温度($T_0=293\text{K}$)に固定し、式(5)および式(7)を式(8)に代入することにより、次式が得られる。

$$U_a = k_B T_0 \ln \left(\frac{f_0}{f} \right) \quad (9)$$

上式中の f_0 について4.2節に示したように $3 \times 10^8 \text{s}^{-1}$ なる定数なので、負荷周波数 f が増加するほど熱活性化エネルギーは減少することがわかる。この傾向は超音波周波数を作用させた実験で、転位エネルギーが低い構造が観察されたこととよく一致する⁶⁾。

Table1に示した疲労試験で用いられた周波数範囲は0.2Hz~100kHzであり、式(9)にその数値を代入すると活性化エネルギーは0.26~0.59eVの範囲に相当することがわかる。これは転位のキンク対を活性化するエネルギーと同程度の値である³¹⁾。

次に、Seegerが提案した理論¹⁸⁾を用いて、低炭素鋼の疲労限度応力 E が有効成分 E^* と内部成分 E_i に分離できると考えると、転位の活性化エネルギー U_a は次式のように表される。

$$U_a = U_0 - V \cdot E^* \quad (10)$$

ここに、 U_0 はキンク対生成の活性化エネルギー、 V は転位の熱活性化体積である。この体積はキンク対が掃いた面積とバーガースベクトル長さ $b=2.48 \times 10^{-10} \text{m}$ の積で与えられる。鉄鋼における U_0 は0.65~0.75eV範囲内で変動すると報告されているので^{33),34)}、本研究では $U_0=0.70 \text{eV}$ に固定する。

また、Seeger¹⁸⁾の報告によれば、ひずみ速度が一定の場合、ある遷移温度を超えると有効応力成分が無視できると考えられる。ここで、有効応力は温度とひずみ速度に依存し、温度が一定の場合はひずみ速度が十分に小さいときに有効応力が無視できることになる。さらに、Polak³⁵⁾は解析モデルの簡素化を図るために、広い温度範囲にわたり内部応力成分は一定であると仮定した。したがって、本研究でも、各実験結果は周波数範囲内で内部応力成分 E_i が変わらないと仮定した。このとき、先に示したモデル式(6)に十分低い負荷周波数 f^* を代入することで、以下のとおり、それぞれの実験結果に対する内部成分 E_i が推定できる。

最初に、一例として(a)-1コードの f^* を決める手順を図示したのがFig.6である。式(11)で与えられる疲労限度の変化率 $dE/d \ln f$ について、使用した鋼材の疲労限度の1%程度の変化率とおくことで、有効成分 E^* を無視可能な内部成分 E_i を推定することができる。すなわち、Fig.6中の曲線の勾配が $4 \text{MPa}/(\ln f / \ln 10) = 4 \text{MPa}/\log f$ となる点の周波数として f^* が決まることになる。同様の手順ですべての実験結果に対して求められた f^* の数値をTable3に示す。こうして、求めた f^* を式(6)に代入することで、内部応力成分 E_i が算出できる。その結果をTable3に併記する。

$$\frac{dE}{d \ln f} = \alpha_0 \frac{\beta_0}{T_0} \frac{1}{\left(\ln \left(\frac{f_0}{f} \right) \right)^2} \exp \left(\frac{\beta_0}{T_0 \ln \left(\frac{f_0}{f} \right)} \right) \quad (11)$$

有効応力成分 E^* は疲労限度 E から内部応力成分 E_i を引くことにより求めることができるので、式(10)より転位の熱活性化体積 V が算出できる。このようにして決められた各実験シリーズにおける活性化体積 V と有効応力 E^* の関係をFig.7に示す。また、本研究で得られた結果の適合性を検証するため、鉄系材料に対して実施された他の研究者らによる単軸引張り試験結果^{36)~41)}についてもFig.7中に併せてプロットした。

図より、本報で用いた著者らの結果についても、他の研究者らによる観察結果についても有効応力が増加するとともに活性化体積が減少する共通の傾向が確認できる。転位の活性化体積 V は転位が掃いた面積とバーガースベクトルの長さ b の積で与えられるので、この体積 V の減少は転位の移動性の低下を意味している。また、著者らの結果と他の文献中の結果を比較すると、本研究における解析結果の方が体積 V の計算結果がいくぶん大きい傾向がみられる。その差の原因は2つあると考えられる。一つには本報の解析においてモデルの簡素化とパラメータの簡略設定がされていることの影響であり、もう一つには

Table 3 Numerical expression of f^* and internal endurance component E_i for every data source considered.

Ref code	(a)-1	(a)-2	(a)-3	(b)-1	(b)-2
f^* (s ⁻¹)	2.63 $\times 10^{-6}$	1.10 $\times 10^{-5}$	1.90 $\times 10^{-3}$	9.40 $\times 10^{-8}$	4.64 $\times 10^{-7}$
E_i (MPa)	137	158	167	105	132

Fig. 6 Graphical approach of the determination of f^* for internal endurance component E_i calculation. Case based on (a)-1 experimental results.

Fig. 7 Dislocation activation volume V as a function of effective endurance component E^* , and comparison with several reports derived from tensile test experiments.

本報の解析対象は繰返し荷重であり、低速度での引張り負荷とは条件が大きく異なることである。すなわち、静的負荷の場合は転位が一方に移動するが、繰返し負荷の場合は各負荷サイクルの途中で引張り側から圧縮側に高速で変化するので、転位の移動状態が静的負荷とかなり異なることになる。そのため、本研究で推定された活性化体積と静的負荷の活性化体積の間に差が生じたものと推察される。

なお、著者らの速度過程論のモデルの有用性を検証するため、本報では疲労限度に対する負荷速度依存性が高い低炭素鋼のみを対象としたが、速度過程論的なモデルは転位論を踏まえて構成されたモデルであり、他の炭素鋼にも適用可能と考える。しかし、中高炭素鋼については疲労特性に対する周波数の影響が低下するので、材種ごとの各パラメータ値を系統的に明らかにする必要がある。

6 結 論

本報では低炭素鋼の疲労特性に対する負荷速度依存性について速度過程論の観点から解析モデルを提案し、その適合性を検証した。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 速度過程論の立場から、任意の負荷周波数 f における低炭素鋼の疲労限度 E が次式で与えられることを示した。

$$E = \alpha_0 \exp \left(\frac{\beta_0}{T_0 \ln \left(\frac{f_0}{f} \right)} \right) \quad (6)$$

- (2) 種々の負荷周波数で実施した5シリーズの疲労試験結果に対して、本報の解析モデルを適用したところ、広範な周波数領域にわたり疲労限度の負荷速度依存性がうまく説明できることがわかった。
- (3) 他の研究者らによる単軸引張り試験における測定結果も併せて、転位の活性化体積 V と有効応力 E^* の関係を調べた結果、有効応力 E^* が増加するとともに、活性化体積 V が減少する共通の傾向が確認できた。

参 考 文 献

- 1) S. Taira and K. Emura, "Investigation on the high frequency fatigue (the 1st report)", Journal of the Society of Material Science, Japan, Vol.12, No.118, pp.535-541 (1961).
- 2) M. Yamane, "High speed plane bending fatigue test", Transactions of the JSME, Vol.30, No.215, pp.772-779 (1962).
- 3) J. W. Corbett and J. C. Bourgoin, "Point defects in solids", p.136 (1975) J. H. Crawford and L. M. Slifkin (Eds.), Plenum, New York.
- 4) K. Kikukawa, K. Ohji and K. Ogura, "Push-pull fatigue test results of carbon steels up to 100 kc/s", Transactions of the JSME, Vol.32, No.235, pp.363-370 (1964).
- 5) B. Guennec, A. Ueno, T. Sakai, M. Takanashi and Y. Itabashi, "Effect of the loading frequency on fatigue properties of JIS S15C low carbon steel and some discussions based on micro-plasticity behavior", International Journal of Fatigue, Vol.66, pp.29-38 (2014).
- 6) B. Guennec, A. Ueno, T. Sakai, M. Takanashi, Y. Itabashi and M. Ota, "Dislocation-based interpretation on the effect of the loading frequency on the fatigue properties of JIS S15C low carbon steel", International Journal of Fatigue, Vol.70, pp.328-341 (2015).
- 7) S.E. Stanzl-Tschegg, "Fracture mechanisms and fracture mechanics at ultrasonic frequencies", Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol.22, No.7, pp.567-579 (1999).
- 8) Q.Y. Wang, J.Y. Berard, S. Rahery and C. Bathias, "High-cycle fatigue crack initiation and propagation behavior of high-strength spring steel wires", International Journal of Fatigue, Vol.22, pp.673-677 (1999).
- 9) C. Bathias and P.C. Paris, "Gigacyclic fatigue in mechanical practice", (2005), Marcel Dekker, New York.
- 10) I. Marines, G. Dominguez, G. Baudry, J.-F. Vittori, S. Rathery, J.-P. Doucet and C. Bathias, "Ultrasonic fatigue tests on bearing steel AISI-SAE 52100 at frequency of 20 and 30

- kHz”, *International Journal of Fatigue*, Vol.25, pp.1037-1046 (2003).
- 11) Y. Furuya, “Ultrasonic fatigue testing with a Dumbell-type specimens having a straight part”, *Transactions of the JSME A*, Vol.73, No.732, pp.121-128 (2007).
 - 12) C.C. Engler-Pinto Jr, R.J. Frisch, J.V. Lasecki, H. Mayer and J.E. Allison, “Effect of frequency and environment on high cycle fatigue of cast aluminum alloys”, *Proceedings of VHCF-4*, pp.421-427 (2007), TMS.
 - 13) E. Takeuchi, Y. Furuya, N. Nagashima and S. Matsuoka, “Effect of frequency on giga-cycle fatigue properties for Ti-6Al-4V alloy”, *Transactions of the JSME A*, Vol.70, No.696, pp.1124-1130 (2004).
 - 14) H. Mayer, M. Papakyriacou, B. Zettl and S.E. Stanzl-Tschegg, “Influence of the porosity on the fatigue limit of die cast magnesium and aluminium alloys”, *International Journal of Fatigue*, Vol.25, pp.245-256 (2003).
 - 15) P.E. Bennet and G.M. Sinclair, “Parameter representation of low-temperature yield behavior of body centered cubic transition metals”, *Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering*, Vol.88, No.2, p.518-524, (1966).
 - 16) M. Toyosada and K. Goto, “Constitutive Equation for Mild Steel involved the Effect of Strain Rate and Temperature”, *Journal of Seibu Zosen Kai, Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects*, Vol.81, pp.259-268 (1990).
 - 17) T. Tagawa, “Basic mechanical testing and evaluated material properties”, *Journal of the Japan Welding Society*, Vol.77, No.4, pp.40-47, (2008).
 - 18) A. Seeger, “The temperature dependence of the critical shear stress and of work-hardening of metal crystals”, *Philosophical Magazines Seventh Series*, Vol.45, pp. 771-773 (1954).
 - 19) M. Papakyriacou, H. Mayer, C. Pypen, H. Plenk, S. Stanzl-Tschegg, “Influence of loading frequency on high cycle fatigue properties of b.c.c. and h.c.p. metals”, *Materials Science and Engineering A*, Vol.308, pp.143-152 (2001).
 - 20) J. Bach, J.J. Möller, M. Göken, E. Bitzek and H.W. Höppel, “On the transition from plastic deformation to crack initiation in the high- and very high-cycle fatigue regimes in plain carbon steels”, *International Journal of Fatigue*, Vol.93, pp.281-291 (2016).
 - 21) N. Torabian, V. Favier, J. Dirrenberger, F. Adamski, S. Ziaei-Rad and N. Ranc, “Correlation of the high and very high cycle fatigue response of ferrite based steels with strain rate-temperature conditions”, *Acta Materialia*, pp.40-52 (2017).
 - 22) J.R. Low and A.M. Turkalo, “Slip band structure and dislocation multiplication in silicon-iron crystals”, *Acta Metallurgica*, Vol.10, pp.215-227 (1962).
 - 23) H. Mughrabi, K. Herz and X. Stark, “The effect of strain-rate on the cyclic deformation properties of α -iron single crystals”, *Acta Metallurgica*, Vol.24, pp.659-668 (1976).
 - 24) D. Caillard, “An in-situ study of hardening and softening of iron by carbon interstitials”, *Acta Materialia*, Vol.59, pp.1974-1989 (2011).
 - 25) T. Yokobori, “Theory of materials strength” 2nd Ed., pp.161-217 (1974) Iwanami, Tokyo.
 - 26) T. Sakai and Y. Kimura, “Probabilistic models on materials strength”, pp.36-47 (2012) Society of Material Science, Japan.
 - 27) H. Mughrabi, K. Herz and X. Stark, “Cyclic deformation and fatigue behaviour of α -iron mono- and polycrystals crystals”, *International Journal of Fatigue*, Vol.17, pp.193-220 (1981).
 - 28) K. Sakino, “Deformation mechanism of SS400 steel at very high strain rates using activation volume”, *Journal of the Society of Material Science, Japan*, Vol.64, No.10, pp.769-774 (2015).
 - 29) M. Kurihara, “Effect of the strain rate on the tensile properties of steels”, *Journal of the Japan Welding Society*, Vol.66, No.1, p.6 (1997).
 - 30) H. Yamamoto, T. Kobayashi and H. Fujita et al., “Strain rate – temperature dependency of impact tensile properties and ductile fracture behavior in ductile cast iron”, *Tetsu-to-Hagane*, Vol.85, No.10, pp.55-60 (1999).
 - 31) H. Conrad and S. Frederick, “The effect of temperature and strain rate on the flow stress of iron”, *Acta Metallurgica*, Vol.10, pp.1013-1020 (1962).
 - 32) F. Kudo and T. Yoshikawa, “Support system for analysis of design variable in pareto solutions in multi-objective optimization problem”, 27th Fuzzy System Symposium, pp.1010-1044 (2011) Japan Society for Fuzzy Theory and Intelligent Informatics.
 - 33) M. Tanaka, E. Tarleton and S.G. Roberts, “The brittle-ductile transition in single-crystal iron”, *Acta Materialia*, Vol.56, pp.5123-5129 (2008).
 - 34) Y. Aono, E. Kuramoto and K. Kitajima, “Plastic deformation of high-purity iron single crystals”, *Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University*, Vol.29, pp.127-193 (1981).
 - 35) J. Polak and M. Klesnil, “The dynamics of cyclic plastic deformation and fatigue life of low carbon steel at low temperature”, *Materials Science and Engineering*, Vol.26, pp.157-166 (1976).
 - 36) D.F. Stein, J.R. Low and A.U. Seybolt, “The mechanical properties of iron single crystals containing less than 5×10^{-3} ppm carbon”, *Acta Metallurgica*, Vol.11, pp.1253-1262 (1963).
 - 37) J.T. Michalak, “The influence of temperature on the development of long range internal stress during the plastic deformation of high-purity iron”, *Acta Metallurgica*, Vol.13, pp.213-222 (1965).
 - 38) D.F. Stein, “The effect of carbon on the strain-rate sensitivity of iron single crystals”, *Acta Metallurgica*, Vol.14, pp.99-104 (1966).
 - 39) R. Arsenault, “Low-temperature creep of alpha iron”, *Acta Metallurgica*, Vol.12, pp.547-554 (1964).
 - 40) Z.S. Basinski and J.W. Christian, “The influence of temperature and strain-rate on the flow stress of annealed and decarburized iron at subatmospheric temperatures”, *Australian Journal of Physics*, Vol.13, pp.299-308 (1960).
 - 41) D.F. Stein and J.R. Low, “Mobility of edge dislocations in silicon-iron crystals”, *Journal of Applied Physics*, Vol.31, pp.362-369 (1960).