

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2010～2013

課題番号：22686082

研究課題名(和文) ミクロ塑性ひずみ発生に基づく疲労き裂発生・伝播寿命予測システムの確立

研究課題名(英文) Prediction of fatigue crack initiation and propagation based on micro-plasticity

研究代表者

堤 成一郎 (Tsutsumi, Seiichiro)

大阪大学・接合科学研究所・准教授

研究者番号：70344702

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,800,000円、(間接経費) 2,940,000円

研究成果の概要(和文)：繰返し応力に伴う非弾性ひずみの大きさと疲労き裂発生や破断寿命との相関は高い。従って材料応答を高精度に予測できれば、構造物の疲労寿命の高精度予測に繋がる。本研究では、低サイクル疲労に限定されず、一般に高サイクル疲労となる巨視的弾性条件下にも適用可能な繰返し弾塑性モデルの構築を行なった。合わせて、汎用FE解析用のユーザサブルーチンを開発し、その精度検証を行なった結果、解析精度の高さが確認された。さらに、繰返し応力下における結晶レベルの変形応答を予測可能な結晶塑性解析技術の構築により、繰返し軟化挙動などの疲労メカニズムの解明を行なった。

研究成果の概要(英文)：Predicting the mechanical fatigue phenomena of materials subjected to cyclic stresses, the mechanisms on generation and accumulation of inelastic deformation has to be clarified. In this study, numerical study based on both macro- and crystal-plasticity FE modeling are conducted to evaluate the mechanical responses under cyclic loading condition. Then, the effects of inclusions on the fatigue behavior at the stress level lower than the yield stress, i.e macroscopically elastic condition, was simulated and compared with the experimental result of a carbon steel.

研究分野：船舶海洋工学

科研費の分科・細目：材料・構造力学

キーワード：疲労 塑性 き裂 数値解析

## 1. 研究開始当初の背景

船舶・海洋構造物、橋梁、鉄道車両、高層ビル、海上空港等、多くの大型構造物が社会インフラとして活用されているが、現在でも多くの疲労損傷が報告されている。道路鋼製橋脚で多くの疲労損傷が生じ、補修に多大な労力を要し続けていることは記憶に新しい。

社会インフラの疲労損傷は大規模死亡事故を誘発する事もあり、大型溶接構造物における疲労損傷事故を防止することは、豊かかつ安全な社会活動を営むために、極めて重要な課題である。

従来法に則って、一定荷重振幅下で得られる疲労設計曲線 (S-N 曲線) を用いて疲労強度設計をする場合、個々の機械・構造物が受ける荷重履歴の影響を評価できない、また疲労事例の多くは、降伏応力 (もしくは弾性限) よりも小さく、低回数繰返し応力下で得られた応力ひずみ関係からは、塑性変形が確認されない、いわゆる“巨視的弾性”の繰返し応力に伴う疲労き裂の発生と、その後の伝播挙動に支配されているにもかかわらず、そのプロセスが全く考慮されていない、という二つの大きな問題が挙げられる。

一方、疲労設計の高度化を目指した研究は、これまで国内外で盛んに行われてきた。しかし、初期き裂 (もしくは切欠き) の存在を前提として、き裂の進展だけを対象とする、破壊力学的手法を用いた研究が主流であり、巨視的弾性応力下の疲労き裂発生を解明し得る理論的研究は極めて限定的である。

つまり、疲労設計の高度化には、巨視的弾性の繰返し応力による疲労き裂の発生メカニズムを解明し、荷重履歴の影響も含めて、“疲労き裂の発生から、伝播までの寿命を定量的に評価可能なシステムの確立”が極めて重要である。

## 2. 研究の目的

疲労設計の高度化を目指した研究は、国内外で盛んに行われてきた。しかし、その多くはき裂発生後の進展だけを対象とする、破壊力学的手法を用いた研究が主流であり、疲労破壊の起点となる巨視的弾性応力下の疲労き裂発生を解明できる理論的研究は見当たらない。

これまで申請者らは、疲労き裂発生メカニズム解明を目的として、降伏応力の 7 割程度 (巨視的弾性) の応力振幅一定・準静的繰返し試験を行なった (機論, 2007)。その結果、①低回数繰返しに対しては、弾性応答 (直線) を示すが、その後、②突如、塑性ひずみ (ヒステリシスループ) が発生する。また、応力を与え続けると、③疲労き裂の発生を伴って破断 (④伝播) することを確認した。さらに、申請者らの先の研究 (日本船舶海洋工学会論文集, 2008) では、巨視的弾性の繰返し応力による、①巨視的弾性応答から②塑性ひずみ急増までの一連の挙動を予測可能な材料モデル、およびそれに基づく③き裂発生規準を提案し

ている。このモデルは、各種材料の一般の繰返し負荷および塑性不安定現象の解析に適用可能な数学的構造を有する、世界で唯一の構成式であり、巨視的弾性・繰返し応力下での疲労現象の解明という、歴史的難題解決の糸口が得られたと考えられる。

しかし、本モデルの適用性検証は極めて限定されており、応力振幅や平均応力を任意に変化させた場合への適用と同時に、結晶レベルのマイクロ塑性変形発生との関係など、解決すべき課題が残されている。

そこで本研究では、結晶塑性解析技術を用いて、疲労き裂の発生から伝播までの一連のメカニズムを解明し、疲労き裂発生から、伝播までの寿命を定量的に評価可能なシステムの確立を目指し、必要な理論構築およびプロトタイプシステムの開発を目的とする。

## 3. 研究の方法

申請者等がこれまでに提案した弾塑性モデルの適用性検証は極めて限定されており、応力振幅や平均応力を任意に変化させた場合への適用と同時に、結晶レベルのマイクロ塑性変形発生との関係など、解決すべき課題が残されている。これらを解明し、“巨視的弾性を含む任意の繰返し応力下での疲労き裂の発生と、その後の伝播挙動を高精度に予測可能な疲労寿命推定システムを確立”することは疲労設計の高度化に不可欠である。

本研究では、結晶塑性モデルを導入した有限要素シミュレーションにより、巨視的弾性条件下で発生する塑性ひずみとその後の繰返し載荷に伴う累積・顕在化など、繰返し負荷に伴う軟化挙動のメカニズム解明およびそれら変形挙動に対する介在物の影響に関する基礎的検討を行なった。

本研究では、汎用 FEM コード ABAQUS に結晶塑性モデルをユーザサブルーチンとして組込むことにより、FE シミュレーションを行った。Figure 1 に解析に用いた有限要素メッシュおよび境界条件を示している。解析領域は 2D 平面ひずみ条件を仮定し、 $100\mu\text{m}$  四方に 27 個の結晶粒を想定した。また、8 節点アイソパラメトリック要素を用いて要素数 2142 にメッシュ分割した FE モデルの下面を上下方向の変位を固定、左側面は横方向変位を固定として上面の全節点に一定速度の強制変位を与えて計算を行う。なお材料の滑り系を指定する必要があるが、本研究では簡単のために BCC のうち主要 12 滑り系を採用する。また、27 個の結晶粒の方位はランダムに与え、さらに全解析領域に結晶塑性モデルを採用したモデル 0 とは異なり、配置の異なる 2 パターンの弾性体介在物を含むモデル A (close-set) および B (random) を想定する (Figure 1 参照)。分解せん断応力を  $\tau_c$ 、その初期値を  $\tau_{c0}$  として、各滑り系は次の硬化特性、 $\tau_c = \tau_{c0} + r$ ,  $r = q[1 - \exp(-a * p)]$  で与える。ここで、 $r$  は硬化・軟化関数であり、 $p$  は各積分点における全滑り系の塑性ひずみの累積値を表している。また、

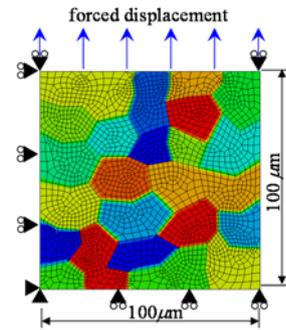
ランダムに与えた結晶方位以外で解析に必要な物性値は、ヤング率 ( $E_0$ ), ポアソン比 ( $\nu$ ), 材料の速度効果に関するパラメータ  $\alpha$  および  $\beta$ 、分解せん断応力の初期値 ( $\tau_{c0}$ ), 材料硬化パラメータ  $a$  および  $q$  である。Table 1 に解析に用いたモデル 0, A, B の分類および各パラメータを示している。なお、本研究においても文献[9]と同様、解析結果に対して実質的に載荷速度の影響が出ないようにパラメータを設定した。また、モデル A(a)-(d) および B(a)-(d) には、それぞれ  $E_0/10$  から  $E_0 \cdot 10^5$  (ridged) まで、母材のヤング率  $E_0$  と異なる 4 種類の弾性係数を採用した擬似的な弾性介在物 (Figure 1(c), (d) 中の黒色) 要素を含んでおり、それ以外の要素は全域において弾塑性応答を示すモデル 0 と同一の材料パラメータを採用して計算を行う。

#### 4. 研究成果

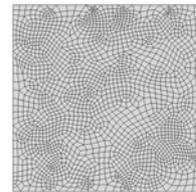
##### (1) 単調載荷挙動

モデル 0 を用いて計算した単調引張過程の応力-ひずみ関係を実験結果と合わせて Figure 2 に示している。ここで示した軸ひずみは、解析領域端部の変位から換算した公称値である。この図より、上降伏後の下降伏挙動およびその後の plateau 挙動がシミュレートできていることがわかる。これは分解せん断応力が臨界値に達した後に、硬化・軟化関数  $r$  に従って急激に減少することで表現されている。なお本研究では、plateau 挙動までのシミュレーションを想定して、硬化・軟化関数  $r$  を規定した。しかし、一般に plateau 挙動後に継続して負荷を加えると加工硬化挙動を示すことが知られているが、この挙動は硬化・軟化関数  $r$  を拡張することにより表現可能である。Figure 3(a)-(c) に、モデル 0 を用いて計算を行った際の軸ひずみの増加に伴う累積塑性ひずみの発展の様子を示している。Figure 3(a) より、上降伏応力より低い、いわゆる巨視的弾性の応力・ひずみ状態でも、結晶方位に依存した塑性滑りが生じていることが確認できる。ただし、塑性滑りは結晶間でリンクするには至っておらず、島状に孤立している。さらに載荷が進んだ状態の Figure 3(b), (c) より、上降伏状態に到達し、下降伏挙動を示すと共に、島状に孤立していた塑性滑りがリンクして、大きな塑性ひずみを生じることが確認できる。次に結晶塑性 FE モデル A(a)-(d), B(a)-(d) により得られた単調載荷過程の応力-ひずみ関係と初めて塑性ひずみが発生した応力状態を、SM400B 材の応力-ひずみ関係と合わせて Figure 4 に示している。この図より、母材中に異種材料が存在するモデル A, B 共に、介在物の弾性係数が小さくなるにつれて巨視的な応力-ひずみ関係の勾配が小さくなる。さらに、モデル A, B 共に、最

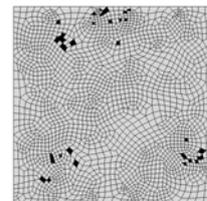
も小さな弾性係数を仮定したモデル A(a) および B(a) の塑性ひずみ発生応力が最も低下していることが確認される。これは、母材とは異なる弾性係数を有する介在物周りの応力集中が高まり、特に小さな弾性係数を示す介在物周りで塑性滑りが促進されたことを意味している。なお、本解析条件における巨視的弾性応力条件下での塑性ひずみ発生応力に影響を与える因子として、介在物のサイズ・配置、弾性係数以外に、その周りの結晶方位関係が挙げられるが、その組み合わせは無数にあり、今後統計的な処理により考察を深める必要がある。



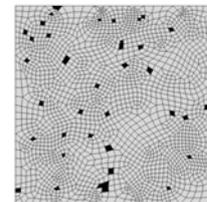
(a) random oriented 27 crystals and boundary condition



(b) model 0 (no-inclusion)



(c) A (close-set)



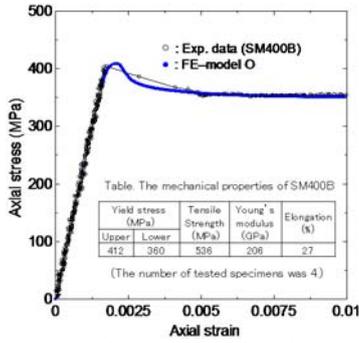
(d) B (random)

**Fig. 1** Analyzed FE models of (a) random-oriented 27 grains with boundary condition, and alignment of inclusions of (b) model 0, (c) model A and (d) model B (volume fraction 1-2%).

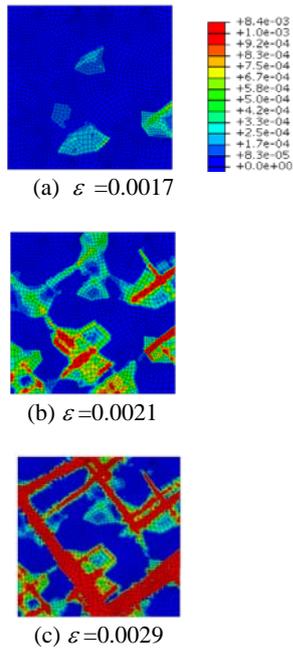
**Table 1** Classification of analyzed models and material parameters

model names and material parameters				
model O	models A and B (with elastic-inclusions)			
$E_0=206$ (GPa)	(a)	(b)	(c)	(d)
	$E_0/10$	$E_0/2$	$E_0*2$	$E_0*10$

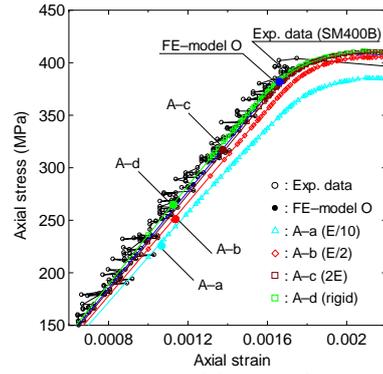
( $\nu=0.3, \alpha=1.0, \beta=0.1, \tau_{c0}=85, q=-170$  and  $a=10$ )



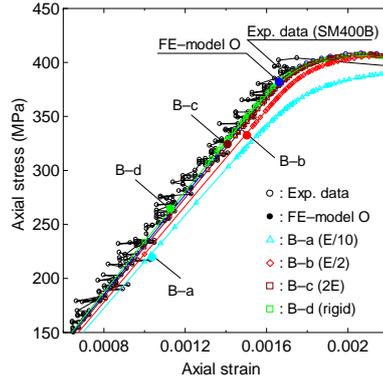
**Fig. 2** Stress-strain curves predicted by the model O together with the experimental results for SM400B material.



**Fig. 3** Evolution of accumulated plastic strain predicted by model O with increase of axial strain

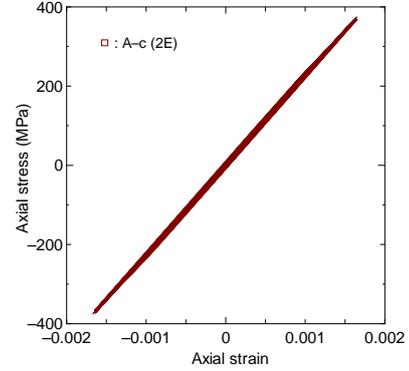


(a) models A(a)-(d)

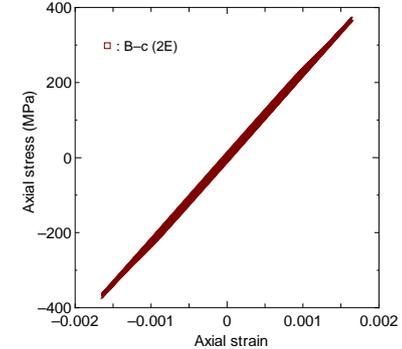


(b) models B(a)-(d)

**Fig. 4** Expanded stress-strain curves around first yielding points predicted by the models O, A(a)-(d) and B(a)-(d) together with the experimental results for SM400B material.

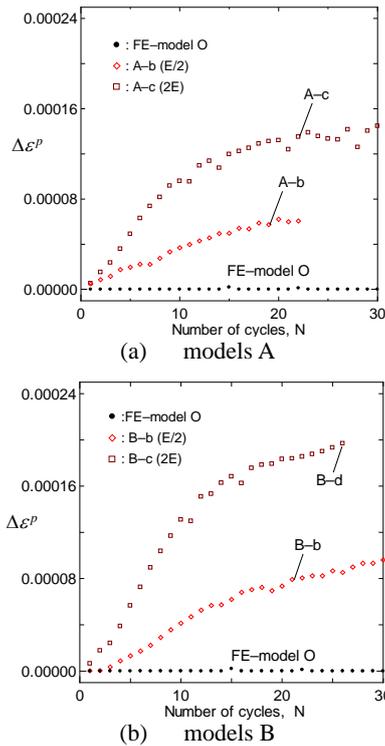


(a) model A(c)

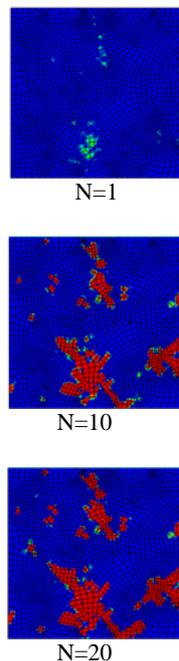


(b) model B(c)

**Fig. 5** Stress-strain curves predicted by the models A(c) and B(c) under cyclic forced-displacement condition.



**Fig. 6** Evolution of net-plastic strain ranges ( $\Delta\varepsilon^P$ ) at zero stress level with increase of number of cycles



**Fig. 7** Evolution of accumulated plastic strain under cyclic loading condition for model B(c)

## 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 5 件)

- ① 堤成一郎, 大和真征, 後藤浩二, 渡邊育夢, Fionn Dunne, 結晶塑性 FE 解析による巨視的弾性応力下の繰返し軟化挙動の考察, スマートプロセス学会誌, 2, 3(2013), 123-127
- ② 渡邊育夢, 細川明秀, 堤成一郎, 有限要素解析による複合組織鋼の力学挙動評価, スマートプロセス学会誌, 2, 3(2013), 119-122
- ③ Tsutsumi, S., Prediction of fatigue crack initiation life by an extended cyclic plasticity model with damage counting parameter, Asia Pacific IIW International Congress, (2013)
- ④ Tsuboi, K., Tsuchiyama, T., Takaki, S., Tsutsumi, S., Mechanical properties of strength-gradient steel sheets produced by solution nitriding, ISIJ International, 52, 10(2012), 1872-1878
- ⑤ Tsutsumi, S., Mechanical response of an extended cyclic plasticity model under multi-step variable amplitude loading condition, Transactions of JWRI, 41, 2, (2012), 69-74

[学会発表] (計 5 件)

- ① Tsutsumi, S., Riccardo Fincato, Kenjiro Terada, Tomohiro Ishida, Effect of mechanically induced phase transformation on local stress distribution predicted by a crystal FE analysis, International Symposium on EcoTopia Science 2013, Nagoya, Japan, P-10-24
- ② Tsutsumi, S., Fincato, R., Convergence of Cutting-Plane Algorithm in FEL Analyses Based on a Cyclic Plasticity Model, 日本船舶海洋工学会 平成 25 年秋季講演会, 大阪, (2013. 11. 21-2013. 11. 22), GS30
- ③ Tsutsumi, S., Plasticity FE Analysis in Multi-scale for Predicting Deformation and Fatigue Life of Steel, JWRI-INDO workshop 2013, Osaka, Japan, (2013. 11. 11)
- ④ Fincato, R., Tsutsumi, S., Terada, K., On Convergence Rate of Cutting-Plane Algorithm in Numerical Analyses of a Cyclic Plasticity Model, 日本機械学会 第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2912
- ⑤ 堤成一郎, 多段変動応力下の繰返し変形と疲労き裂発生寿命予測, 溶接学会 平成 25 年度秋季全国大会, 岡山

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等 特になし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

堤 成一郎 (TSUTSUMI, Seiichiro)

大阪大学・接合科学研究所・准教授

研究者番号：70344702