

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03854

研究課題名（和文）非比例多軸変動負荷における疲労強度特性の実験的検証および疲労強度評価手法の高度化

研究課題名（英文）Experimental Verification of Fatigue Strength Properties under Non-proportional Multiaxial Variable Loading and Improvement of Fatigue Strength Evaluation Method

研究代表者

伊藤 隆基 (Itoh, Takamoto)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：40242581

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：非比例多軸変動負荷における疲労寿命評価プログラムを開発した。本プログラムでは、応力・ひずみの評価法については研究代表者が提案しているIS法を用いて、多軸負荷を単軸負荷に変換したうえで、レインフロー法により波形を分割している。レインフロー法に基づき波形を分割する際に、ノイズが含まれているとそのノイズを極大値・極小値として処理を行ってしまい適切に波形を分割することができない。そこで、ノイズを取り除くため、本プログラムに7点近似法を行う計算アルゴリズムを追加するとともに、ニュートン法を用いて応力あるいはひずみに関する非線形方程式を解くことで、疲労寿命評価を行うプログラムを高度化させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非比例多軸変動負荷における疲労寿命の評価については実質に即し、実用的かつ高度な知識を有しない技術者でも運用できるソフトウェアは開発されていない。本研究では多軸疲労の解析において実績のあるIS法にレインフロー法による波形分割、ノイズ除去の概念を組み込んだ方法を提案した。非比例ひずみ範囲あるいは応力範囲をCoffin-Manson則と比較して、非線形方程式を解くことで疲労寿命を求めるとともに、変動負荷の影響を解析できる。現時点では、概念と基礎的なプログラムを開発した段階であるが、このような簡便で取り扱いが容易な非比例多軸変動負荷の解析手法は他では提案されておらず、工学的に重要であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：A fatigue life evaluation program for non-proportional multiaxial variable loading has been developed. The IS method proposed by the principal investigators is used to evaluate the stress or strain, and the waveform is divided by the Rain-flow method after converting the multiaxial load to uniaxial load. The IS method is used to convert a multiaxial load into a uniaxial load, and then the waveform is divided by the Rain-flow method. When dividing the waveform based on the Rainflow method, if data noise is included, the noise is treated as a maximum and/or a minimum value, and the waveform cannot be divided properly. Therefore, in order to remove the noise, a numerical algorithm that performs the 7-point approximation method was added to the program. An improved program for fatigue life evaluation was developed by solving nonlinear equations related to stress or strain using the Newton method.

研究分野：材料力学

キーワード：金属疲労 材料強度 寿命評価 多軸負荷

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

航空機や高速鉄道車両、高温構造機器などの実機を構成する部材では、繰返し荷重の応力・ひずみの主軸が多方向に複雑に変動する繰返し多軸負荷（非比例多軸変動負荷）を受けることが多い。実機における構造物の安全性を十分に保証するためには、非比例多軸変動負荷の寿命を正確に評価する必要がある。しかしながら、非比例多軸変動負荷については簡便かつ正確な寿命評価法が存在しておらず、かつ高度な専門知識を有しない現場の技術者がパーソナルコンピュータ（PC）等を用いて解析を行うことが出来る実用的なソフトウェアも存在していない。

2. 研究の目的

研究代表者らは非比例多軸変動負荷におけるこれまでの一連の疲労強度研究成果を基に、多軸応力・ひずみの評価手法および多軸負荷損傷を考慮した損傷評価手法を構築してきた。また、両評価手法を機械構造機器・部材の疲労に関する実設計・開発および維持管理に応用するため、現場で利用できる多軸疲労強度設計解析ツールを開発してきた。その上で非比例多軸変動負荷における特有な未解決問題が派生したことから、検証実験を行い評価手法の強化を図ることにより、複雑な非比例多軸変動負荷での繰返し数の計数法および非比例損傷累積の定量化、さらにそれらの材料依存性等に係る諸課題を解決し、多軸疲労強度評価手法の高度化に取り組んだ。また、強度評価手法の基礎情報となる研究調査および系統的な材料試験を実施して疲労強度データを取得した。

本研究では、これまで取得したデータおよび以前から蓄積された多軸疲労強度データを基に、研究代表者らが提示している応力・ひずみの評価手法（IS法）および解析ツールを最大限活用し、複雑な非比例の繰返し変動負荷にも対応できる多軸疲労損傷評価モデルを構築するための改良多軸疲労損傷評価モデルに準じた解析ツールのプログラムを開発する。

3. 研究の方法

以下に、研究代表者らが提案している応力・ひずみの評価手法（S法）について記述する。非比例多軸負荷では、主軸方向が時間的に変化するため、主応力・主ひずみおよびその主軸方向を時間の関数として表す必要がある。時刻 t における主応力・主ひずみベクトルを $S_i(t)$ とする。ここで、添え字 i は 1、2 および 3 であり、それぞれ、最大、中間および最小主応力・主ひずみベクトルを表す。また、 $S_i(t)$ は応力基準では σ 、ひずみ基準では ε である。

時刻 t における応力・ひずみ $SI(t)$ を次式の最大主応力・主ひずみベクトル $S_1(t)$ または最小主応力・主ひずみベクトル $S_3(t)$ の絶対値の最大値で定義する。

$$SI(t) = \text{Max}[|S_1(t)|, |S_3(t)|] \quad (1)$$

また、 $|S_1(t)|$ または $|S_3(t)|$ のいずれかが 1 サイクル中で最大となる時刻を t_0 、負荷経路を一巡する間での $SI(t)$ の最大値を SI_{max} として次式で表す。

$$SI_{\text{max}} = SI(t_0) = \text{Max}[SI(t)] \quad (2)$$

主応力・主ひずみの主軸方向の変化を表すために、損傷面の基準となる新たな直交座標系 XYZ を定義する。最大主応力・主ひずみ方向は SI_{max} の方向を X 軸と定義し、Z 軸は、YZ 平面に投影された主応力・主ひずみベクトルの絶対値が最大となる方向とする。

主応力・主ひずみの主軸方向の変化角は、任意の時刻の主応力・主ひずみベクトル $S_i(t)$ と

X 軸との角度 $\xi(t)/2$ および $\mathbf{S}_i(t)$ を YZ 面に投影した方向と Y 軸との角度 $\zeta(t)$ で定義され、次式で与えられる。

$$\frac{\xi(t)}{2} = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{S}_i(t_0) \cdot \mathbf{S}_i(t)}{|\mathbf{S}_i(t_0)| |\mathbf{S}_i(t)|} \right) \quad \left(0 \leq \frac{\xi(t)}{2} \leq \frac{\pi}{2} \right) \quad (3)$$

$$\zeta(t) = \tan^{-1} \left(\frac{\mathbf{S}_i(t_0) \cdot \mathbf{e}_Z}{\mathbf{S}_i(t_0) \cdot \mathbf{e}_Y} \right) \quad (0 \leq \zeta(t) \leq 2\pi) \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{e}_Y および \mathbf{e}_Z はそれぞれ Y 軸および Z 軸方向の単位ベクトルである。また、添字 i は、 $\mathbf{S}_{i\max}$ が与えられる主応力・主ひずみの方向によって決まる。

式(1)の応力・ひずみ $\mathbf{SI}(t)$ 、式(3)の角度 $\xi(t)$ および式(4)の $\zeta(t)$ を同時に表す方法として、Fig. 1 に示すような $\mathbf{SI}(t)$ と $\xi(t)$ および $\zeta(t)$ を用いた極座標表示を用いる。極座標表示では、直交する 3 つの方向 \mathbf{S}_{I1} 、 \mathbf{S}_{I2} および \mathbf{S}_{I3} をそれぞれ $\xi=0$ 、 $\xi=\pi/2$ で $\zeta=0$ および $\zeta=\pi/2$ の方向にとる。極座標表示することで、3 軸負荷状態での主応力・主ひずみの大きさと主軸方向の変化の軌跡を 3 次元的に表すことができる。

応力・ひずみ範囲 $\Delta\mathbf{SI}$ は、極座標表示した主応力・主ひずみの経路の \mathbf{S}_{I1} 方向の最大値と最小値の差で与えられる。また、その主応力・主ひずみ範囲の中央値が平均応力および平均ひずみ $\mathbf{SI}_{\text{mean}}$ であり、次式で与えられる。

$$\Delta\mathbf{SI} = \text{Max}[\mathbf{S}_{I\max} - \cos \xi(t) \mathbf{SI}(t)] = \mathbf{S}_{I\max} + \mathbf{S}_{I\min} \quad (5)$$

$$\mathbf{SI}_{\text{mean}} = \frac{1}{2} (\mathbf{S}_{I\max} - \mathbf{S}_{I\min}) \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{S}_{I\min}$ は $[\mathbf{S}_{I\max} - \mathbf{SI}(t) \cos \xi(t)]$ が最大となる時の $[-\mathbf{SI} \cos \xi(t)]$ の値である。 $\Delta\mathbf{SI}$ は Fig. 1 で示した $\mathbf{S}_{I\max}$ 面に作用する主応力・主ひずみの垂直成分の範囲であり、 $\mathbf{SI}_{\text{mean}}$ はその中間値である。この 3 次元波形から負荷波形、非比例度を可視化でき、次式に示す非比例度の計算も可能となる。

$$f_{\text{NP}} = \frac{\pi}{2\mathbf{S}_{I\max} \cdot L_{\text{path}}} \int_C \mathbf{SI}(t) |\sin \xi(t)| ds \quad (7)$$

f_{NP} は比例負荷では 0 であり、非比例負荷では $0 < f_{\text{NP}} \leq 1$ である。 L_{path} は全負荷経路の長さの和、 C は負荷経路の積分路、 ds は負荷経路における微小経路を表している。また $\mathbf{SI}(t)$ は、応力の場合は σ 、ひずみの場合は ε と置換すれば良いが、 \mathbf{SI} - ξ - ζ 極座標系での経路で積分するので、応力およびひずみ基準の違いによる f_{NP} の差はない。また、 f_{NP} は極座標において円形の場合 1 をとる。

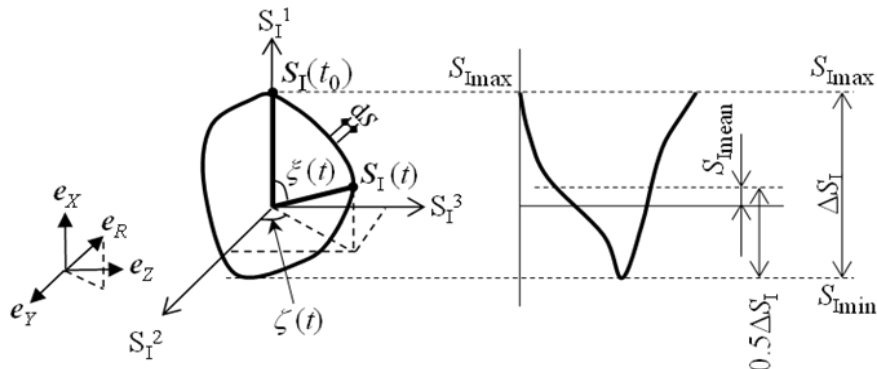


Fig. 1 Definitions of principal stress/strain range and mean principal value

4. 研究成果

本研究において、変動繰返し負荷における負荷波形の分離および繰返し係数法はレインフロー法を用いて行う。レインフロー法を用いることにより応力・ひずみの主軸方向が時間的に変化する非比例多軸負荷においても IS 法に基づいて非比例多軸負荷波形を単軸負荷相当波形に変換し、単軸負荷相当波形を分割することで単軸負荷と同様の疲労寿命評価が可能となる。

レインフロー法とは、応力・ひずみ-時間波形の時間軸を鉛直方向にとり、Fig.2 に示すように応力・ひずみの大きさを多重の屋根からの雨だれにたとえ、すべての極値を起点に上から順に流れ出させ、雨だれの流れを継続・停止させ、流れたレンジに対応させて応力・ひずみの振幅およびサイクルを計数するものである。雨だれの流れを継続・停止させる条件は以下のとおりである。

条件 1

- ・次の極小(大)点の値が正(負)であり、流れ出した点の極小(大)値が負(正)である場合は流れ続ける。
- ・次の極小(大)点の値が正(負)であり、流れ出した点の極小(大)値が正(負)である場合は停止する。

条件 2

- ・すでに他の雨だれが流れた経路に達した場合は、その点で停止する。

また、本ソフトウェアでは実験で得られたデータを使用するため、データにノイズが含まれる場合がある。レインフロー法に基づき波形を分割する際に、ノイズが含まれているとノイズを極大値・極小値として処理を行ってしまい適切に波形を分割することができない。そこで、ノイズを取り除くため、本ソフトウェアに 7 点近似法を行うプログラムを追加した。7 点近似法は、波形のある 1 点と連続する前後 3 点（計 7 点）の平均を計算し、その 1 点の値が平均の値からユーザーによって決定された割合以上異なっている場合は、その 1 点をノイズと判断し取除く方法である。

単軸負荷相当波形をレインフロー法で分割したのち、Fig.2 に表すように次式に示す寿命評価式（ひずみの場合は(8)、応力の場合は(9)）、Coffin-Manson 則（ひずみの場合は(10)、応力の場合は(11)）およびニュートン法による近似を用いて破断繰返し数を求める。

$$\Delta \varepsilon_{NP} = (1 + \alpha f_{NP}) \Delta SI \quad (8)$$

$$\Delta \sigma_{NP} = \Delta SI \quad (9)$$

$$\Delta \varepsilon_{NP} = AN_f^{-n_1} + BN_f^{-n_2} \quad (10)$$

$$\Delta \sigma_{NP} = A \log N_f + B \quad (11)$$

$$A = \frac{3.5\sigma_B}{E}, \quad B = \varepsilon_f^{0.6} \quad (12)$$

求めた破断繰返し数を用いて、次式に示す線形累積損傷則による寿命評価を行う。

$$D = \sum \frac{1}{N_i} \quad (D=1 \text{ で破損}) \quad (13)$$

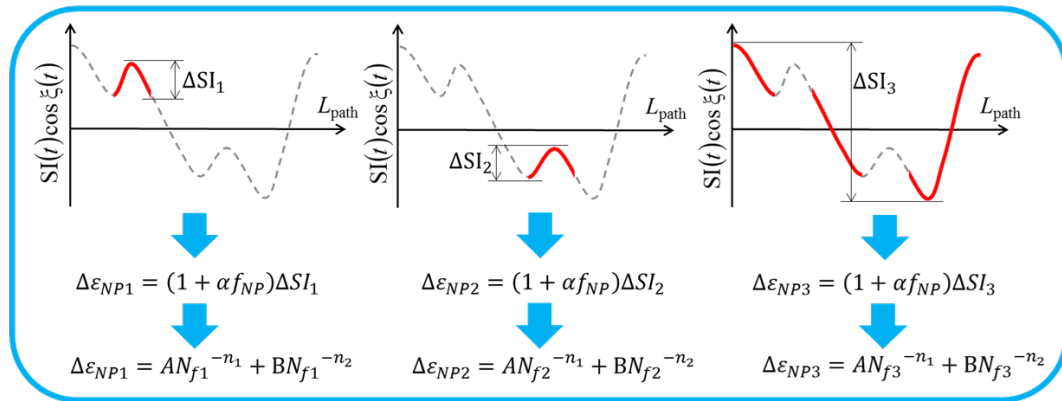


Fig. 2 Flow of fatigue life evaluation

IS法を用いてバタフライ型の負荷波形を解析した例を Fig. 3 に示す。現在は、上記で提案した手法を解析プログラムに反映している段階である。

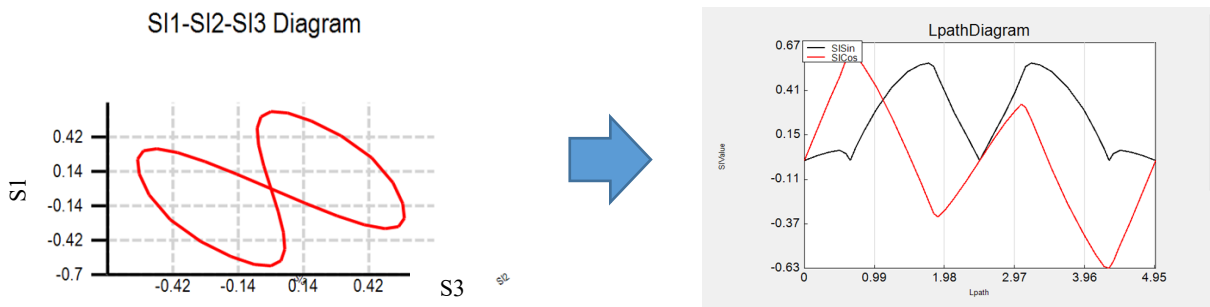


Fig. 3 Result of analyzing butterfly waveform

5. 今後の予定

今後の予定として、より正確な基準軸の導入・基準軸のユーザー側での設定など、更に正確な解析ができるようにする。また、解析結果表示の簡略化や実際の実験データによる検証など、使い勝手や信頼性の向上も今後の展望とする。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 22件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Vantadori Sabrina, Carpinteri Andrea, Luciano Raimondo, Ronchei Camilla, Scorza Daniela, Zanichelli Andrea, Okamoto Yuki, Saito Shunsuke, Itoh Takamoto	4. 巻 138
2. 論文標題 Crack initiation and life estimation for 316 and 430 stainless steel specimens by means of a critical plane approach	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Fatigue	6. 最初と最後の頁 105677 ~ 105677
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijfatigue.2020.105677	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 MORISHITA Takahiro, ITOH Takamoto, KASAHARA Naoto	4. 巻 86
2. 論文標題 Evaluation of multiaxial low cycle fatigue life under non-proportional loading considering effect of mean strain (Loading simulated thermal fatigue due to temperature fluctuation in junction piping)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 20-00224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00224	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 MORISHITA Takahiro, ITOH Takamoto, KASAHARA Naoto	4. 巻 86
2. 論文標題 Effect of inelastic multiaxial preloading on high cycle fatigue strength	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 20-00225
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00225	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 MORISHITA Takahiro, ITOH Takamoto	4. 巻 70
2. 論文標題 Strength Characteristic of SUS316 and STPT410 Steels under Cyclic Overloading with Pre-Cracked in Non-Proportional Multiaxial Fatigue	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Society of Materials Science, Japan	6. 最初と最後の頁 99 ~ 104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.70.99	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Saito Shunsuke, Ogawa Fumio, Itoh Takamoto	4. 巻 136
2. 論文標題 Investigation of fatigue strength under wide-ranged biaxial stress for two types of stainless steel using a thin-walled hollow cylinder specimen	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Fatigue	6. 最初と最後の頁 105611 ~ 105611
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijfatigue.2020.105611	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Vantadori Sabrina, Carpinteri Andrea, Luciano Raimondo, Ronchei Camilla, Scorza Daniela, Zanichelli Andrea, Okamoto Yuki, Saito Shunsuke, Itoh Takamoto	4. 巻 138
2. 論文標題 Crack initiation and life estimation for 316 and 430 stainless steel specimens by means of a critical plane approach	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Fatigue	6. 最初と最後の頁 105677 ~ 105677
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijfatigue.2020.105677	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 MORISHITA Takahiro, ITOH Takamoto, KASAHARA Naoto	4. 巻 86
2. 論文標題 Evaluation of multiaxial low cycle fatigue life under non-proportional loading considering effect of mean strain (Loading simulated thermal fatigue due to temperature fluctuation in junction piping)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 20-00224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00224	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 MORISHITA Takahiro, ITOH Takamoto, KASAHARA Naoto	4. 巻 86
2. 論文標題 Effect of inelastic multiaxial preloading on high cycle fatigue strength	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 20-00225
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00225	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 MORISHITA Takahiro, ITOH Takamoto	4. 巻 70
2. 論文標題 Strength Characteristic of SUS316 and STPT410 Steels under Cyclic Overloading with Pre-Cracked in Non-Proportional Multiaxial Fatigue	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Society of Materials Science, Japan	6. 最初と最後の頁 99 ~ 104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.70.99	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Viespoli Luigi Mario, Bressan Stefano, Itoh Takamoto, Hiyoshi Noritake, Prashanth Konda Gokuldoss, Berto Filippo	4. 巻 111
2. 論文標題 Creep and high temperature fatigue performance of as build selective laser melted Ti-based 6Al-4V titanium alloy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Engineering Failure Analysis	6. 最初と最後の頁 104477 ~ 104477
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.engfailanal.2020.104477	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Bressan Stefano, Ogawa Fumio, Itoh Takamoto, Berto Filippo	4. 巻 126
2. 論文標題 Cyclic plastic behavior of additively manufactured Ti-6Al-4V under uniaxial and multiaxial non-proportional loading	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Fatigue	6. 最初と最後の頁 155 ~ 164
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijfatigue.2019.05.003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Saito Shunsuke, Ogawa Fumio, Itoh Takamoto	4. 巻 136
2. 論文標題 Investigation of fatigue strength under wide-ranged biaxial stress for two types of stainless steel using a thin-walled hollow cylinder specimen	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Fatigue	6. 最初と最後の頁 105611 ~ 105611
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijfatigue.2020.105611	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sakane Masao, Hirano Akihiko, Hamada Naomi, Hoya Yukari, Oka Takahiro, Furukawa Masataka, Itoh Takamoto	4. 巻 107
2. 論文標題 A new extraction method of creep exponents and coefficients from an indentation creep test by multiaxial stress analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Theoretical and Applied Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 102522 ~ 102522
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tafmec.2020.102522	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Bressan Stefano, Ogawa Fumio, Itoh Takamoto, Berto Filippo	4. 巻 13
2. 論文標題 Low cycle fatigue behavior of additively manufactured Ti-6Al-4V under non-proportional and proportional loading	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Frattura ed Integrita' Strutturale	6. 最初と最後の頁 18 ~ 25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3221/IGF-ESIS.48.03	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ogawa Fumio, Hiyoshi Noritake, Itoh Takamoto	4. 巻 61
2. 論文標題 Evaluation of the low-cycle fatigue strength of Sn3.0Ag0.5Cu solder at 313 and 353 K using a small specimen	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Materials Testing	6. 最初と最後の頁 719 ~ 723
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3139/120.111376	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Cruces Alejandro S., Lopez-Crespo Pablo, Bressan Stefano, Itoh Takamoto, Moreno Belen	4. 巻 9
2. 論文標題 On the Behaviour of 316 and 304 Stainless Steel under Multiaxial Fatigue Loading: Application of the Critical Plane Approach	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Metals	6. 最初と最後の頁 978 ~ 978
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/met9090978	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ogawa Fumio, Shimizu Yusuke, Bressan Stefano, Morishita Takahiro, Itoh Takamoto	4. 巻 9
2. 論文標題 Bending and Torsion Fatigue-Testing Machine Developed for Multiaxial Non-Proportional Loading	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Metals	6. 最初と最後の頁 1115 ~ 1115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/met9101115	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Ogawa Fumio, Hiyoshi Noritake, Konishi Yutaka, Itoh Takamoto	4. 巻 48
2. 論文標題 Low-Cycle Fatigue Testing Using a Small Specimen of Sn-58Bi Solder at 313K and 353K	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Electronic Materials	6. 最初と最後の頁 1777 ~ 1784
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11664-018-06871-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sakane Masao, Itoh Takamoto	4. 巻 98
2. 論文標題 A synthesis of cracking directions in tension-torsion multiaxial low cycle fatigue at high and room temperatures	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Theoretical and Applied Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 13 ~ 22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tafmec.2018.09.003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Morishita Takahiro, Takada Yuta, Ogawa Fumio, Hiyoshi Noritake, Itoh Takamoto	4. 巻 96
2. 論文標題 Multiaxial fatigue properties of stainless steel under seven loading paths consisting of cyclic inner pressure and push-pull loading	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Theoretical and Applied Fracture Mechanics	6. 最初と最後の頁 387 ~ 397
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tafmec.2018.05.015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kanayama Hideyuki, Konishi Yutaka, Ogawa Fumio, Itoh Takamoto, Sakane Masao, Yamashita Mitsuo, Hokazono Hiroaki	4. 巻 116
2. 論文標題 Effect of additional elements on the low-cycle-fatigue characteristics of Sn-1.0Ag-0.7Cu solder obtained using a miniature-sized specimen	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Fatigue	6. 最初と最後の頁 180 ~ 191
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijfatigue.2018.06.023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ogawa Fumio, Itoh Takamoto, Yamamoto Takaei	4. 巻 110
2. 論文標題 Evaluation of multiaxial low cycle fatigue cracks in Sn-8Zn-3Bi solder under non-proportional loading	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Fatigue	6. 最初と最後の頁 215 ~ 224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijfatigue.2018.01.021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	小川 文男 (Ogawa Fumio) (00424812)	東北大学・工学研究科・助教 (11301)	
研究分担者	坂根 政男 (Sakane Masao) (20111130)	立命館大学・総合科学技術研究機構・上席研究員 (34315)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------