

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 19 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14562

研究課題名(和文)非鉛はんだの非比例クリープ疲労に及ぼす元素添加の影響解明と寿命予測モデルの構築

研究課題名(英文)Elucidation of the effect of added elements on non-proportional fatigue properties of lead-free solders and development of models for lifetime evaluation

研究代表者

小川 文男(Ogawa, Fumio)

立命館大学・理工学部・助教

研究者番号：00424812

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：Sn1.0Ag0.7Cuをベースとして元素を添加した非鉛はんだの多軸クリープ疲労特性を明らかにすべく、実験とともに理論的なアプローチを行った。以下、実験の内容について述べる。標点間直径4 mmのミニチュア試験片について軸・ねじりの非比例疲労試験、クリープ疲労試験を行うため、微小荷重を高精度で測定可能な中空円筒形のロードセルを製作した。円形負荷における試験が実施可能であることを確認した。さらに、標点間直径2 mm以下の試験片について軸・ねじりの疲労試験、クリープ疲労試験を行うための試験機の開発を行った。試験片に擦り角を与えて、一定に保持しながら、引張圧縮負荷を付与することが出来る試験機である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

はんだ材料について小型のミニチュア試験片を用いた多軸の疲労試験、クリープ疲労試験はこれまでにほとんど実施されておらず、はんだ接合部の長期寿命については明らかとされていない。クリープ疲労を考慮すると、元素添加が有効であるかどうかも確認されていない。本研究では実験、理論の両面から多軸クリープ疲労寿命を明らかにするためのアプローチを行うとともに、クリープと疲労に関する実験データ蓄積と寿命解析を行った。

研究成果の概要(英文)：In this study, experimental and theoretical approach was taken to elucidate the effect of addition of elements to Sn1.0Ag0.7Cu solder on their creep-fatigue lives. In the following, experimental aspect is mentioned. Load cell with cylindrical shape, to detect load with high precision at low value was developed to achieve multiaxial fatigue and creep-fatigue tests under tension and torsion using miniature test specimen with gage diameter of 4 mm. As a result, its applicability to multiaxial tests in circle path was confirmed. Testing machine to perform fatigue and creep-fatigue test for specimen with gage diameter of 2 mm was newly developed. This test machine gives constant torsion torque to specimen and then push-pull load to specimen. It achieves fatigue testing by applying displacement from both sides of cylinder.

研究分野：材料力学

キーワード：多軸疲労 クリープ はんだ材料 材料試験

1. 研究開始当初の背景

現在、錫を基材とし、銀、銅をそれぞれ 3.0%、0.5% 含有するはんだが非鉛はんだとして最も広く用いられているが、銀を多く含有することから高コストであることが課題となっている。銀を 1.0% に低減することにより低コスト化が可能となるが、使用中のはんだ割れが懸念されている。そこで、ニッケル、ゲルマニウム、ビスマスなどの元素を添加したはんだが開発されているが、これらのはんだの非比例負荷におけるクリープ疲労特性は十分に明らかにされていない。特に、実機に近い小型寸法の試験片についての多軸疲労試験についてはデータがほぼ存在しないと言っても過言ではない。これについては、小型試験片(ミニチュア試験片)を用いた疲労試験自体、方法が確立されているとは言い難い状況であり、まず、常温、昇温環境下における標点間直径 3 mm の試験片の単軸疲労試験を精度よく実施できるように試験機の開発、整備を行う必要がある。続いて、多軸試験用のロードセルの開発を行い、多軸クリープ疲労試験のための試験機の開発、整備、制御プログラムの開発を行うことが必要となってくる。さらに、小型試験片に特化した多軸疲労試験のための試験機の開発に強い需要があるが、はんだ試験片について高速で疲労試験を行うことが出来る専用の試験機はいまだ開発されていない。

2. 研究の目的

- (1) 小型試験片について非比例負荷における疲労試験、クリープ疲労試験を行うための試験法を確立する。このために、従来用いていた試験装置の改良、新たな試験装置の開発を行う。
- (2) 疲労試験、クリープ疲労試験結果に元素添加が及ぼす影響、破壊メカニズムを明らかにする。
- (3) 比例負荷の試験結果から非比例負荷におけるクリープ疲労寿命を予測するためのモデルの構築、任意のひずみ負荷(例えばランダム負荷)における寿命を予測するための手法を確立する。

3. 研究の方法

- (1) ミニチュア試験片を用いたクリープ特性の評価

標点部の直径 2mm の小型試験片を用いてクリープ特性の評価を行う。クリープ変形を記録するとともに、破断時間の計測を行う。大型試験片の結果と比較して、試験片寸法の影響を検討する。元素添加がクリープ特性に及ぼす影響を検討するとともに、クリープ寿命予測法を確立する。

- (2) ミニチュア試験片を用いた単軸疲労試験

標点部の直径 3 mm の小型試験片を用いて、三角波における疲労試験を行う。試験温度は 40°C および 80°C とし、金属間化合物などの微視構造と疲労破損の関係を明らかにする。

- (3) ミニチュア試験片を用いた多軸クリープ疲労試験のための試験機整備

標点部の直径 4 mm の小型試験片を用いて、軸、ねじりの多軸疲労試験、クリープ疲労試験を行うための試験機整備を行う。多軸疲労試験としてはひずみの主軸方向が時間とともに変化する非比例負荷、特に引張圧縮とねじりの位相が 90° ずれている円形負荷の疲労試験を実現するために、軸荷重およびトルクが検出できるロードセル(荷重計)を開発する。ここで、低荷重において、荷重、トルクが精度よく検出できるものとする。さらに、試験片を昇温するためのヒーターを新しく開発し、目標温度から $\pm 1^{\circ}\text{C}$ の範囲に制御できることを目標とする。円形負荷及び、円形負荷においてひずみ速度を変化させた試験、ひずみ保持を有する試験を実現するための試験プログラムの開発も行う。

- (4) 小型試験片のための多軸疲労試験機の開発

標点間直径 2 mm 以下のミニチュア試験片について、軸、ねじりの多軸疲労試験を行うための独自の疲労試験機を開発する。試験プログラムを開発することにより、多軸の疲労試験、クリープ疲労試験を実現する。

- (5) 多軸ランダム負荷における疲労寿命の評価のための可視化プログラム

多軸ランダム負荷における寿命評価を行うためのプログラムの開発を行う。伊藤らにより提案された IS 法に基づいており、多軸負荷をこれに相当する単軸負荷に直して、寿命評価を行う。

4. 研究成果

- (1) ミニチュア試験片を用いたクリープ特性の評価

元素を添加したはんだのクリープ試験を行い、大型試験片の結果と比較した。ミニチュアクリープ試験の結果は直径 5 mm の大型試験片の結果と概ね一致し、ミニチュア試験片の使用が実験コストの低減に有効であることが確認された。ニッケル、ゲルマニウム、ビスマスの添加により、クリープひずみは減少し、クリープ破断寿命も長くなることが明らかとなった。元素の添加がクリープ特性の向上に有効であることが確認された。破断試験片の破面を観察した結果、ニッケル、ゲルマニウムを添加したはんだでは金属間化合物の周辺にポイドが生成することで破断に至ること、ビスマスの添加では固溶強化によりクリープ寿命は長くなるが、破面は脆性的となることが明らかとなった。クリープ寿命を Monkman-Grant 式で評価した結果、長期の寿命を予測できることを明らかにした。

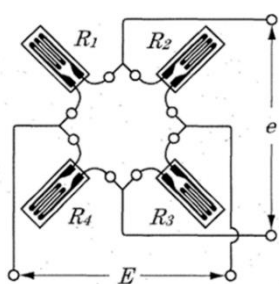
- (2) ミニチュア試験片を用いた単軸疲労試験

まず、Sn3.0Ag0.5Cu の単軸疲労試験を 40°C と 80°C で行い、疲労寿命を比較した。両温度で疲労寿命はほぼ等しくなり、この材料は 80°C においても使用可能であることを明らかにした。

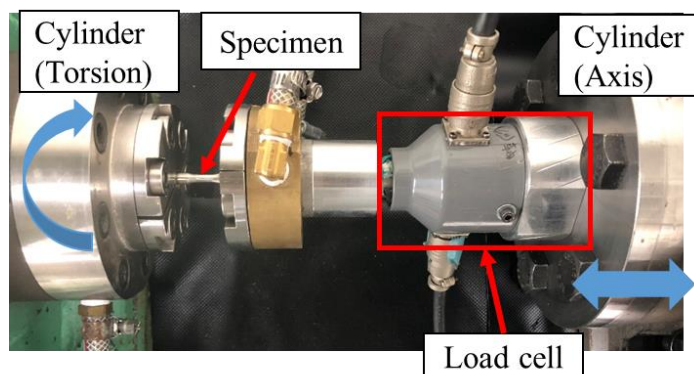
疲労破損のメカニズムについて検討したところ、疲労負荷により金属間化合物の割れが生じ、錫基材を微視き裂が繋ぐことで破損に至ることが明らかとなった。また、Sn1.0Ag0.7Cu をベースとしてニッケル、ゲルマニウム、ビスマスを追加したはんだの 40°C における単軸疲労試験を行い、元素添加の影響を検討した。元素添加とともに、疲労寿命は短くなることが分かった。疲労試験を途中で中断して、損傷を観察したところ、ニッケル、ゲルマニウムを追加したはんだでは金属間化合物に割れが生じること、ビスマス追加のはんだでは表面から割れが生じることを明らかにした。このほかに Sn-58Bi の系のはんだの 40°C と 80°C の疲労試験を行った結果、80°C において疲労寿命が長くなり、破面も延性的なものとなった。これは高温において、微視的なじん性が増加するためであると考えられる。

(3) ミニチュア試験を用いた多軸クリープ疲労試験のための試験機整備

軸、ねじりのアクチュエータを有する多軸の疲労試験機を用いた疲労試験、クリープ疲労試験を実現するための試験機整備を行った。アルミニウム合金 A6061 を材料として、微小ひずみを測定可能な中空円筒形のロードセルを設計製作した。ただし、最大荷重 1500 N、最大トルク 4.0N・m として、強度設計を行った。中空円筒の平行部にひずみゲージを貼りつけ、4 ゲージ法によるロードセルとした。その上に、塩ビパイプをかぶせることで、ロードセルのコードを保護した。開発したロードセルの外観を図 1 (b) に示す。



(a) 4 ゲージ法による
ロードセルの開発



(b) 開発したロードセルの外観

図 1 軸・ねじり試験用ロードセル

さらに、荷重、トルク検定を行い、荷重、トルクと電圧値の関係を調べて、検定値を得た。軸・ねじり試験のための伸び計の製作も行い、伸び計検定を行って、検定値を得た。

従来用いていた試験片加熱用ヒーターでは試験片の温度が十分に上がりづらいという、均一になりづらいという課題が存在した。そこで、図 2 のように鉄パイプの外部にバンドヒーターを貼り付け、パイプ内部にアルミニウム板を設置して試験片を直接昇温する機構とした。この結果、70°C まで昇温でき、±1°C の精度で温度を保持できることを明らかとした(今後、80°C までの昇温を検討する)。

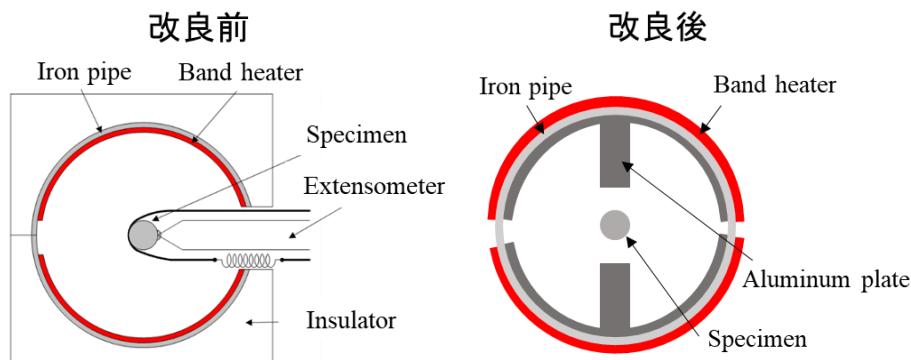


図 2 試験片加熱ヒーターの改良

(4) 小型試験片のための多軸疲労試験機の開発

小型試験片のための軸・ねじり疲労試験機を開発した。ねじり角を与え、一定とした状態で、

軸荷重を負荷することが出来る試験機である。ただし、試験を一旦停止して、ねじり角を変化させることが出来る機構を設けている。図3に示すような標点間直径1.8mmの試験片を設計して、この試験片の試験に適した試験機の設計を行った。試験片の設計にあたっては、有限要素法を用いて、標点間の応力が一樣になること、標点間外で破断が生じないことを確認している。

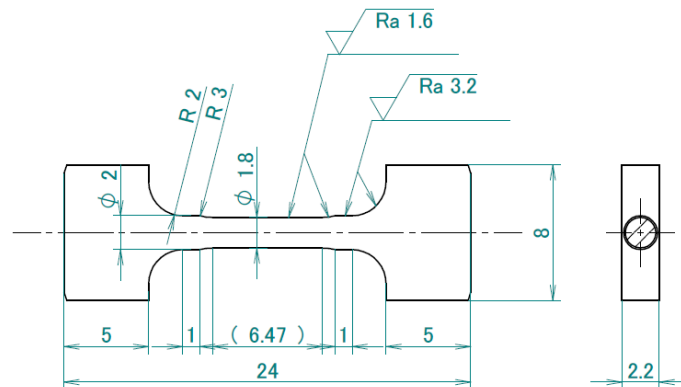


図3 ミニチュア疲労試験片 (mm)

アクチュエータ2台で試験片を両側から引張ることで、疲労試験を実現する。試験片中心が移動しないことで、試験中の標点間の様子をデジタル顕微鏡等を用いて観察することが出来る。試験片掴み部と繋がる試験機ロッドは中空構造となっており、試験機重量を低減し、高速での疲労試験を実現する構造となっている。この試験機はロードセルの分解能を小さくすることで、微小な荷重での制御を可能としている。制御プログラムに対する試験機ロッドの追従性を確認することが今後の課題である。

(5) 多軸ランダム負荷における疲労寿命の評価のための可視化プログラム

IS法をベースとして、多軸ランダム負荷における疲労寿命を評価できるプログラムを開発した。図4にランダム負荷における負荷経路を示す。多軸のランダムのひずみ波形(図4(a))を極座標平面に描画すると図4(b)のようになる。これをIS法により単軸相当に変換し、レインフロー法を適用する。一つ一つの波形の疲労寿命に対する重みを計算して、寿命を評価するプログラムを開発した。ただし、単軸の実験データにより得られたCoffin-Manson式を用いて、各波形による損傷を評価し、線形累積損傷則を用いて、破損判定を行った。開発したプログラムにより、精度よく寿命が整理できることが明らかとなった。

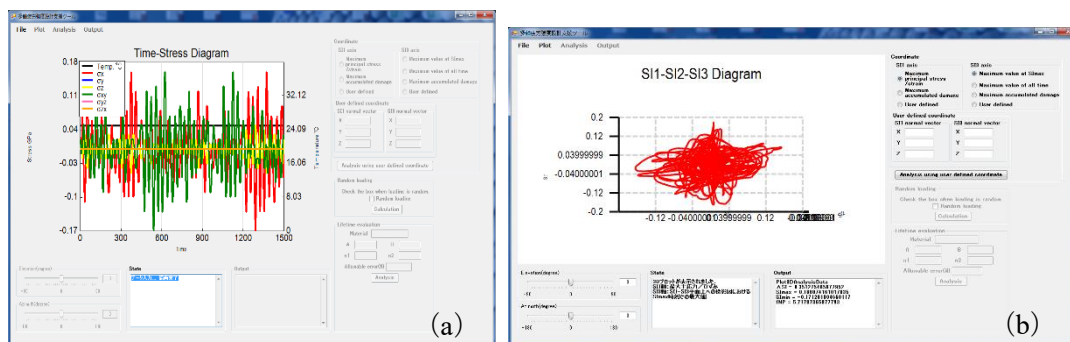


図4 可視化プログラム (a) 多軸ひずみ波形 (b) 波形の極座標表示結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計24件（うち査読付論文 23件 / うち国際共著 5件 / うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Shunsuke Saito, Fumio Ogawa, Takamoto Itoh	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) https://doi.org/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 Fumio, Ogawa, Yusuke Shimizu, Stefano Bressan, Takahiro Morishita, Takamoto Itoh	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) https://doi.org/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 -
1. 著者名 Stefano Bressan, Javad Razavi, Fumio Ogawa, Takamoto Itoh, Filippo Berto	4. 巻 300
2. 論文標題 Multiaxial fatigue strength under non-proportional loading of additively manufactured notched components of Ti-6Al-4V	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MATEC Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 03005 ~ 03005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1051/mateconf/201930003005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Yuuki Kasamuta, Fumio Ogawa, Takamoto Itoh, Hiroyasu Tanigawa	4. 巻 300
2. 論文標題 Evaluation of multiaxial creep-fatigue strength for high chromium steel under non-proportional loading	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MATEC Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 07002 ~ 07002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1051/mateconf/201930007002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Rui Kosaka, Fumio Ogawa, Takamoto Itoh, Masao Sakane	4. 巻 300
2. 論文標題 Creep damage evaluation using uniaxial miniature specimens for multiaxially damaged components	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MATEC Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 07003 ~ 07003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1051/matecconf/201930007003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Shunsuke Saito, Fumio Ogawa, Takamoto Itoh	4. 巻 300
2. 論文標題 Fatigue life properties of stainless steels in wide ranged biaxial stress states using a hollow cylinder specimen	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MATEC Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 09004 ~ 09004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1051/matecconf/201930009004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Keiwa Makino, Fumio Ogawa, Takamoto Itoh	4. 巻 300
2. 論文標題 Evaluation of non-proportional multiaxial fatigue strength of lead-free solder with elements addition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 MATEC Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 12004 ~ 12004
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1051/matecconf/201930012004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Fumio Ogawa, Noritake Hiyoshi, Takamoto Itoh	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) https://doi.org/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 Stefano Bressan, Fumio Ogawa, Takamoto Itoh, Filippo Berto	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) https://doi.org/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 Kunal D Bhagat, Truong V Vu, John C Wells, Hideyuki Takakura, Yu Kawano, Fumio Ogawa	4. 巻 58
2. 論文標題 Production of hollow germanium alloy quasi-spheres through a coaxial nozzle	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 068001 ~ 068001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab1b59	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 Hideyuki Kanayama, Noritake Hiyoshi, Fumio Ogawa, Mie Kawabata, Takamoto Itoh, Takashi Wakai	4. 巻 68
2. 論文標題 Study on creep damage assessment method for Mod. 9Cr-1Mo steel by sampling creep testing with thin plate specimen	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Society of Materials Science, Japan	6. 最初と最後の頁 421 ~ 428
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.2472/jsms.68.421	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 Takahiro Morishita, Yuta Takada, Fumio Ogawa, Noritake Hiyoshi, Takamoto Itoh	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) https://doi.org/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 Hideyuki Kanayama, Yutaka Konishi, Fumio Ogawa, Takamoto Itoh, Masao Sakane, Mitsuo Yamashita, Hiroaki Hokazono	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) https://doi.org/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 Fumio Ogawa, Noritake Hiyoshi, Yutaka Konishi, Takamoto Itoh	4. 巻 48
2. 論文標題 Low-cycle fatigue testing using a small specimen of Sn-58Bi solder at 313 K and 353 K	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) https://doi.org/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 Stefano Bressan, Fumio Ogawa, Takamoto Itoh, Filippo Berto	4. 巻 47
2. 論文標題 Influence of notch sensitivity and crack initiation site on low cycle fatigue life of notched components under multiaxial non-proportional loading	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fracture and Structural Integrity	6. 最初と最後の頁 126 ~ 140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.47.10	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Stefano Bressan, Fumio Ogawa, Takamoto Itoh, Filippo Berto	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 Fracture and Structural Integrity	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) https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.48.03	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Shunsuke Saito, Fumio Ogawa, Takamoto Itoh	4. 巻 795
2. 論文標題 Fatigue life properties of stainless steels in wide ranged biaxial stress state	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Key Engineering Materials	6. 最初と最後の頁 60 ~ 65
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.795.60	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 Fumio Ogawa, Shuji Yamamoto, Chitoshi Masuda	4. 巻 32
2. 論文標題 Thermal conductivity and tensile properties of carbon nanofiber-reinforced aluminum-matrix composites fabricated via powder metallurgy: Effects of ball-milling and extrusion conditions on microstructures and resultant composite properties	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Acta Metallurgica Sinica (English Journal)	6. 最初と最後の頁 573 ~ 584
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/s40195-018-0811-8	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 Takamoto Itoh, Fumio Ogawa, Takahiro Morishita	4. 巻 159
2. 論文標題 Fatigue testing and evaluation of fatigue strength under multiaxial stress state; Why do we need fatigue testing?	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 MATEC Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1051/matecconf/201815901050	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Fumio Ogawa, Takamoto Itoh, Takaei Yamamoto	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) https://doi.org/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 -

1. 著者名 Fumio Ogawa, Shuji Yamamoto, Chitoshi Masuda	4. 巻 711
2. 論文標題 Strong, ductile, and thermally conductive carbon nanotube-reinforced aluminum matrix composites fabricated by ball-milling and hot extrusion of powders encapsulated in aluminum containers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Materials Science and Engineering: A	6. 最初と最後の頁 460 ~ 469
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.077	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 Fumio Ogawa, Chitoshi Masuda, Hidetoshi Fujii	4. 巻 53
2. 論文標題 In situ chemical vapor deposition of metals on vapor-grown carbon fibers and fabrication of aluminum-matrix composites reinforced by coated fibers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Materials Science	6. 最初と最後の頁 5036 ~ 5050
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/s10853-017-1921-9	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 小川文男	4. 巻 66
2. 論文標題 Eighth International Conference on Low Cycle Fatigueに参加して	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 868 ~ 868
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
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 Takahiro Morishita, Fumio Ogawa, Takamoto Itoh	4. 巻 41
2. 論文標題 Evaluation and visualization of multiaxial fatigue behavior under random non-proportional loading condition	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Fracture and structural integrity	6. 最初と最後の頁 45 ~ 53
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.41.07	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Kotaro Fukuike, Fumio Ogawa, Noritake Hiyoshi, Takamoto Itoh
2. 発表標題 Evaluation of creep-fatigue properties for Mod.9Cr-1Mo steel under proportional and non-proportional loading
3. 学会等名 10th Japan-China Bilateral Symposium on High Temperature Strength of Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Kasamuta, Fumio Ogawa, Takamoto Itoh, Hiroyasu Tanigawa, Takashi Nozawa
2. 発表標題 Multiaxial creep-fatigue failure mode for high chromium steel considering interaction of creep damage and loading non-proportionality
3. 学会等名 10th Japan-China Bilateral Symposium on High Temperature Strength of Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小川文男, 福池晃太郎, 旭吉雅健, 伊藤隆基
2. 発表標題 改良9Cr-1Mo鋼の高温クリープ疲労特性（クリープ破損機構の検討）
3. 学会等名 日本機械学会材料力学部門若手シンポジウム, 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuuki Kasamuta, Fumio Ogawa, Yuuya Murakami, Takamoto Itoh, Hiroyasu Tanigawa
2. 発表標題 Evaluation of creep-fatigue properties of F82H steel by considering interaction of non-proportional loading and relaxation
3. 学会等名 6th International Conference on Advanced Steels (ICAS 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shunsuke Saito, Fumio Ogawa, Takamoto Itoh
2. 発表標題 Fatigue life properties of stainless steels
3. 学会等名 2018 International Symposium on Structural Integrity (ISSI 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Stefano Bressan, Fumio Ogawa, Takamoto Itoh, Filippo Berto
2. 発表標題 Strength of additively manufactured Ti-6Al-4V under non-proportional multiaxial low cycle fatigue
3. 学会等名 The 6th International Conference on Crack Paths (CP 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Fumio Ogawa
2. 発表標題 Low cycle fatigue properties of lead-free solders acquired small sized specimen
3. 学会等名 8th International Conference on Low Cycle Fatigue (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Fumio Ogawa
2. 発表標題 Carbon nanotube-reinforced aluminum matrix composites fabricated by hot extrusion of ball-milled powders encapsulated in aluminum containers
3. 学会等名 5th Intl. Symp. on Composite, Ceramic and Nano Materials Processing, Characterization and Applications, SIPS 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Fumio Ogawa
2. 発表標題 Deposition of metals on vapor grown carbon fibers via in-situ chemical vapor deposition and fabrication of metal matrix composites utilizing coated fibers
3. 学会等名 5th Intl. Symp. on Composite, Ceramic and Nano Materials Processing, Characterization and Applications, SIPS 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Fumio Ogawa
2. 発表標題 Nanocarbon-reinforced metal matrix composites toward low carbon society
3. 学会等名 Nanotechnology Workshop, Taiwan Nanotechnology Industry Development Association (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 ポンチング装置およびポンチング方法	発明者 吉田公亮, 坂根政男, 伊藤隆基, 小川文男	権利者 株式会社 IHI, 学校法人立命館
産業財産権の種類、番号 特許、特願2017-229937	取得年 2017年	国内・外国の別 国内

〔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
研究協力者	伊藤 隆基 (Itoh Takamoto)	立命館大学・理工学部機械工学科・教授 (34315)	
研究協力者	坂根 政男 (Sakane Masao)	立命館大学・総合科学技術研究機構・上席研究員 (34315)	