

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01722

研究課題名(和文) 光音響学的手法による異材接合部の非破壊評価技術の開発

研究課題名(英文) Development of non destructive technique using opto-acoustic method

研究代表者

佐々木 朋裕 (Sasaki, Tomohiro)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：40432067

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：マルチマテリアル化を背景に異種金属，および金属とプラスチックなどの異種材料接合体を対象とした非破壊検査技術の開発を試みた。光学計測においては，レーザー干渉計(ESPI)を応用し，熱膨張や音響振動などの可逆的な変形を接合体に与えた際の変位挙動を動的，かつ2次元的に可視化する装置を製作した。本装置を利用した変形解析により，接合プロセスで生じる欠陥，特に残留応力の状態を非破壊，かつ広視野で推定する新しい技術の可能性を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

機械的，化学的性質の異なる材料が接する異種材料接合体では，接合界面に生成する反応相や接合プロセス中に発生した残留応力が様々なスケールで，界面強度や疲労強度に重大な影響を及ぼす。接合評価で重要な残留応力の全視野可視化を試みた例はこれまでにほとんどない。また，従来の接合法の評価は，主に同種材の接合体を対象に考案されたものが多く，異材接合部の信頼性を評価するには十分とは言えない。本研究の実施により，光金属/プラスチック接合体などの接合材質の多様化に対応した信頼性評価の可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：Against the background of "Multimaterialization", development of a non-destructive technique for dissimilar bonded materials including metals, plastics are performed. The analysis focuses on residual stress in the vicinity of the bonded interface. An optical interferometer is devised to visualize the deformation behavior of material in two dimension and full field. The device is capable of visualizing dynamic deformation when the materials are subjected to a minimal and reversible deformation. This project demonstrates the feasibility of a new technique of residual stress estimation.

研究分野：材料加工 光計測

キーワード：光学計測 残留応力 非破壊検査 異種材料接合

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自動車を中心とする輸送機器分野では、軽量化や運動性能向上を目的として、鉄鋼材料とアルミニウム合金、あるいはプラスチック等を合わせて利用する「マルチマテリアル化」が急速に進んでおり、これを実現するための異種材料接合技術が多く開発されている。その一方で、接合する材料、接合法の多様化に対応した接合部の高信頼化への要求がさらに高まっている。特に、機械的、化学的性質の異なる材料が接する異種材料接合体では、接合界面に生成する反応相や接合プロセス中に発生した残留応力が様々なスケールで、界面強度や疲労強度に重大な影響を及ぼす。このため、これらの性状を正確に把握する検査技術が必要不可欠である。金属同士の接合においては、X線や中性子線回折により接合部周辺の残留応力やき裂、結晶方位を測定する方法が用いられるが、従来の測定手法においては、測定領域が最大でも数 mm 四方の局所領域に限られるため、広域の応力分布測定には膨大な時間が必要となる。また、プラスチックのような非晶質材の測定は不可能である。その他、材料の機械的応答を利用する手法として、超音波探触子により材料内の弾性波を測定する手法も利用されているが、X線回折法と同様に測定領域や測定速度に限界がある。すなわち、非破壊かつ広視野を両立した接合評価法は確立されていない。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、異種材接合体の微小変形挙動を光学的全視野計測で可視化し、ミクロレベルの残留応力および組織変化との相関を明らかにする。

(2) これにより得られた知見を基に、広視野、高速測定を実現した新しい異材接合体の非破壊検査技術の可能性を探ることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 実験対象となる異材接合体を作製し、接合により生じた残留応力および材料組織の変化を把握するため、X線、および EBSD 等の従来法による残留応力、界面組織評価を行った。

(2) 変形の可視化のための光学計測装置においては、研究代表者が所有するレーザー干渉装置に短波長レーザー光源を新たに導入し、変位分解能の向上を図った。同時に、変位分布を算出するための位相シフト法解析プログラムを共同研究機関である米国 Southeastern Louisiana University との連携により作成した。

(3) 音響測定においては、低周波振動から超音波における接合体の音響伝搬特性の解明に関する基礎実験を実施した。また、接合プロセス因子と音響伝搬特性、ならびに音響波によって生じる微小変形の関係を定量的に評価するとともに、変形モデルの構築を試みた。光学計測と音響計測の測定結果をフィードバックしながら FEM モデルを作成し接合部の変形機構を考察した。

(4) 2019年度以降では、光学計測と音響計測を併用した非破壊検査装置の開発に着手した。接合体には、変位分布を検出するため微小変形を与える方法として、パルスレーザー光源を用いた局所熱膨張、および音響振動励起を検討した。

4. 研究成果

(1) 2次元スペckルパターン干渉計 (2D-ESPI) の製作

図1に本研究で開発した、材料変形挙動を可視化するためのレーザー干渉計を示す。波長が 532nm、および 473nm の2波長の固体レーザーを光源として、2つの干渉計を測定表面に対して垂直、および水平方向に配置した計測装置を作製した。材料表面に生じたスペckルパターンを解析することにより、光学系の方向に応じた変位を検出できる。それぞれの光学系は1方向の変位検出が可能であり、3CMOS カラーカメラにより2波長の光源から得られたスペckルパターンを分光することによって、2次元変位分布を同時に可視化することが可能である。接合体の引張試験や、熱変形を与えた際に生じる膨張・収縮挙動を本装置により可視化した。

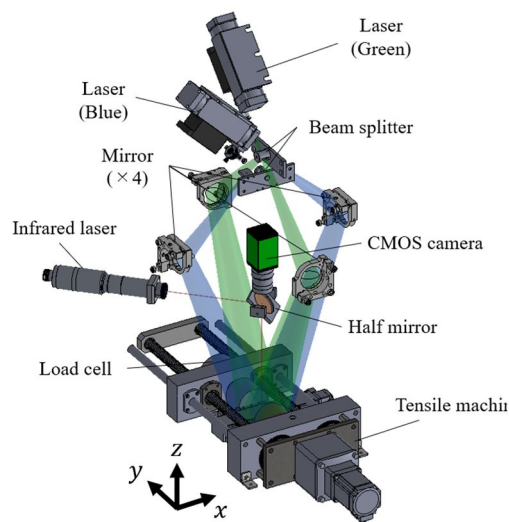


図1 微小変形可視化のための二次元スペckル干渉装置

(2) スペックルパターン干渉縞解析プロセス

本研究で想定する、微小、かつ動的な変形を可視化するためには、干渉計により得られる干渉縞模様を高速で解析する必要がある。この干渉縞の解析においては、通常の光計測に用いられる位相シフトによらない簡便な位相解析手法（微分法）を提案した。

開発した干渉縞解析プロセスの一例を図2に示す。解析は以下のアルゴリズムで実行した。手順(i)ガウスフィルタによるスペックルノイズの除去：スペックルパターン干渉法では、その原理に由来して、「スペックルノイズ」と呼ばれる斑点状のノイズが画像に含まれる。これを除去するための画像処理を行った。手順(ii)微分法による位相解析：画像輝度分布を微分し、図3のような微分値プロファイルを得ることで、干渉縞の位置を特定するプログラムを開発した。本手法は、簡易的な計算により縞の位置を特定することができるため、動的な変形挙動を短時間で解析を可能とする。さらに、二値化、形態処理等の一般的なデジタル画像処理を経て縞の位置を自動的に解析するアルゴリズムを作成した。

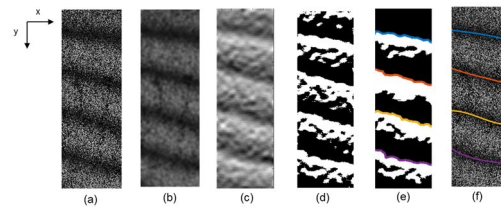


図2 干渉縞の解析の例

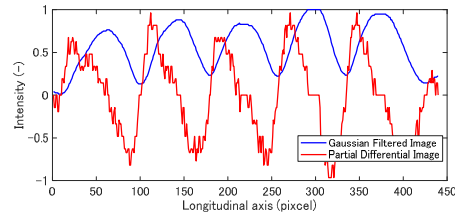


図3 干渉縞 解析プロセスの例：微分法

(3) キャリアフリンジと Fourier 解析を用いたひずみ評価

前節で述べた干渉縞の解析手法と同時に、測定面内の平均ひずみ分布を算出するアルゴリズムを作成した。本アルゴリズムでは、ひずみの面分解能は前述の方法に劣るが、数十平方 mm の領域の平均ひずみを高速で計算することが可能である。図4に実験で得られた干渉縞の例を示す。図1の測定系において測定中にミラーを加点させることにより、疑似的に発生する干渉縞を発生させた。図5干渉縞の輝度分布を示している。プロファイルを変形が生じる前のキャリア信号として Fourier 解析することにより、輝度分布の空間周波数の変化から平均ひずみを求める手法を開発した。以上の2つの手法を、接合部周辺の変形解析に用いた。

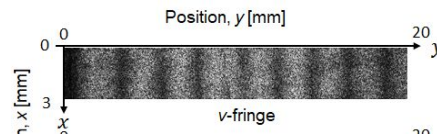


図4 キャリアフリンジの例

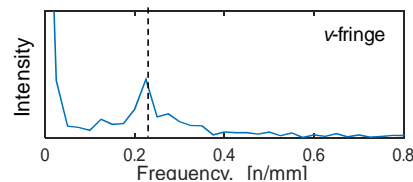
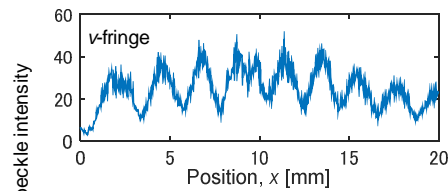


図5 Fourier 解析による空間周波数の特定

(4) 異材接合体の熱変形の可視化

鋼と超硬合金をろう付した異材接合体を作製した。この接合体にペルチェ素子を用いて室温から ± 10 の熱サイクルを与えた際の膨張・収縮変形をESPIにより可視化した。加熱の際の変形は可逆的であり、非破壊測定であるとみなせる。図6は、測定および干渉縞の解析を行った結果の一例である。接合部付近において、干渉縞の曲率が変化している様子が確認できる。このような干渉縞の変化および、それより求めた変位分布から接合部周辺の熱膨張係数を求めた。その結果、図7に示すように、接合により発生する残留応力の大きさに応じて、見かけ上の熱膨張係数が変化することを明らかにした。また、熱変形挙動と上述の基礎実験結果との比較から推定される残留応力は、定性的ではあるものの、X線回折法による残留応力の測定結果に類似した分布を示した。以上の実験により材料に与える熱変形は非常に小さく、可逆的であることから熱変形挙動から残留応力を推定できる可能性を示した。

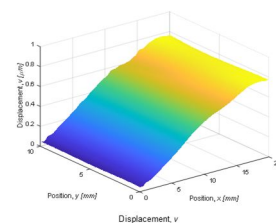
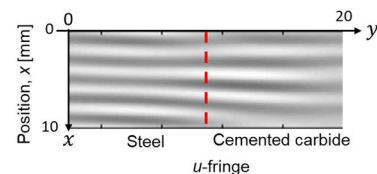


図6 超硬と鋼のろう付け部近傍の熱変形の例

(5) 赤外レーザーを用いた局所熱変形の可視化

本実験では、材料変形を可視化しながら、局所加熱を行うための赤外レーザーを新たに追加した(図1)。残留応力を模擬して、材料に対して引張試験機による外部変位、あるいは静荷重を与えた状態で、材料の一部を赤外レーザーにより局所加熱し、その熱変形挙動をESPI装置により可視化した(図8)。加熱は直径1mm以内であり、温度上昇は室温から10程度とした。図9は、ESPIにより加熱部周辺の熱膨張、収縮挙動を評価した結果、およびその際の温度上昇をサーモカメラで測定した結果の例である。加熱はおよそ1s以内で終了し、その後数秒後に外気により冷却される。このような、数秒間の間に生じる熱膨張、収縮挙動を可視化し、熱膨張係数を評価することで応力状態を算出することを試みた。図10(a)に加熱から室温に戻る過程で生じる冷却過程の熱収縮係数に注目し、引張により生じた応力が熱収縮係数に及ぼす影響を調べた結果を示す。加熱前の引張応力に応じて特に引張方向の熱収縮係数が減少していることが分かる。引張応力を与えた状態で熱膨張を行うと、加熱部においては熱膨張が生じるが、その周辺部で加熱部の膨張により応力が緩和される。すなわち、本実験は加熱により熱膨張、および周辺部の弾性回復挙動を同時に測定していることになる。図9(b)は冷却中の弾性/熱ひずみの関係を示している。

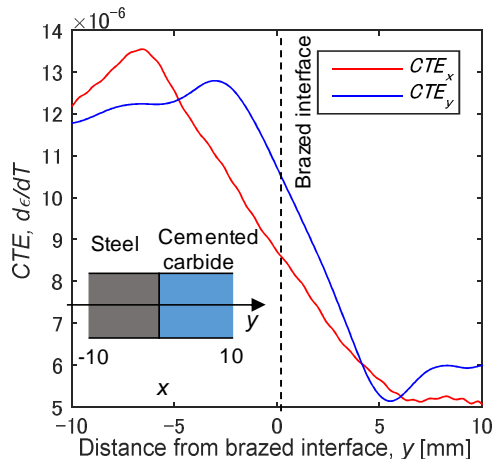
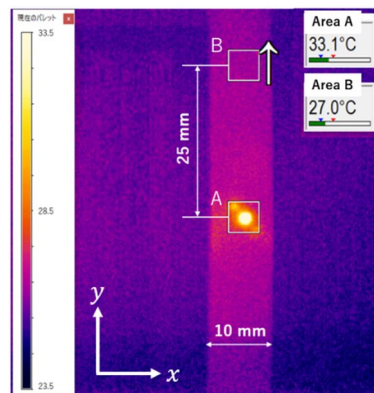
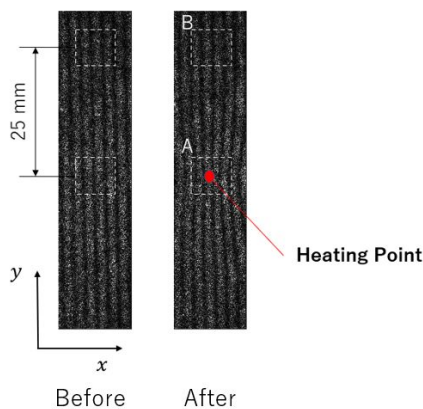
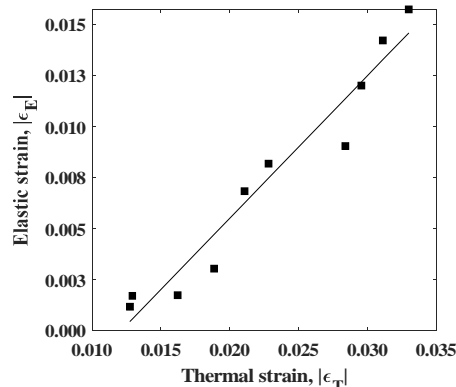
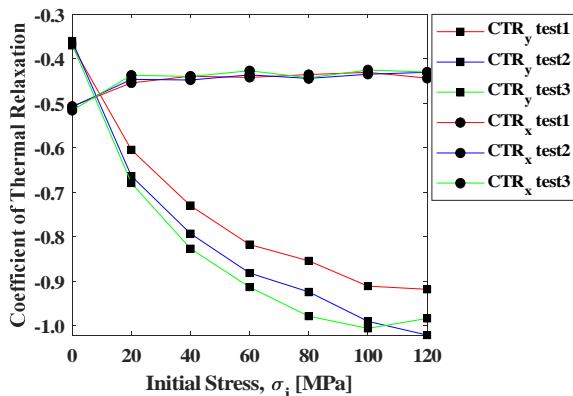


図7 2-D ESPIの測定により求めた見かけの熱膨張係数の変化。



(a) 可視化した熱変形 (b) サーモカメラで計測した加熱時の熱画像

図8 赤外レーザーによる局所熱膨張の可視化



(a) 熱収縮係数の変化

(b) 弾性ひずみと熱ひずみ

図9 熱収縮係数の応力依存性

この結果は、弾性率、および熱膨張係数の応力依存性に起因する。図 10 は、原子間ポテンシャルと原子間距離の関係である。一般に、原子間ポテンシャルは原子間距離、非線形となっている。原子間距離が大きくなるほど原子間ポテンシャルと原子間距離の傾きが小さくなる。すなわち、弾性率が低下することを示唆している。引張応力下においては、原子間距離が大きくなるため材料の弾性率は応力に依存する。一方、熱膨張はこのような原子間ポテンシャルの非線形に加えて、ポテンシャルカーブが安定位置に対して、非対称となっていることに起因する。この非対称性により、音頭上昇に伴う振動中心のずれが生じて熱膨張を引き起こすことが知られている。同時に、初期状態の原子間距離が大きくなるほど、熱膨張係数が大きくなると考えられる。すなわち、熱膨張係数も応力依存性を示す。本実験の結果はこのような応力依存性が現れたことによるものと言える。

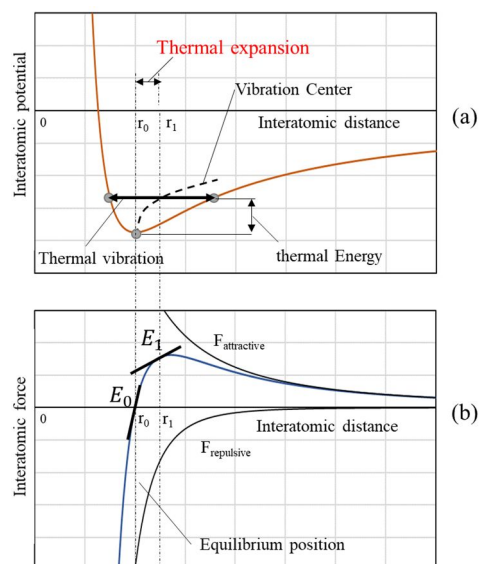


図 10 原子間ポテンシャルと熱膨張，および弾性率の関係

(6) X線回折法で測定した残留応力との比較

赤外レーザーによる局所加熱と ESPI による可視化を併用した非破壊・非接触残留応力推定手法の可能性を探るため、金属材料の測定に利用される X 線回折法による測定値と本研究の手法との比較を行った。図 11 は、アルミニウム合金を溶接した継手を対象とした実験の一例である。溶接部周辺では、溶接時の加熱収縮により、引張残留応力が生じることが知られている。いずれの測定手法においても溶接部周辺において引張残留応力が測定されており、その傾向はある程度類似している。一方で、溶接部より遠方になるほど測定値の違いが大きくなっている。この違いは特に材料の厚さ方向の測定領域の違いによるものと推定される。加熱時、および熱拡散時の変形挙動から推定される測定領域については検討の余地がある。しかしながら、その変化は、+10 程度の微小熱変形、かつ完全非接触、広視野測定においても十分に検出できることがわかる。その他、鉄鋼とアルミニウム合金、CFRP などの異種材接合体においても同様の熱緩和挙動から残留応力が推定可能であることを明らかにした。

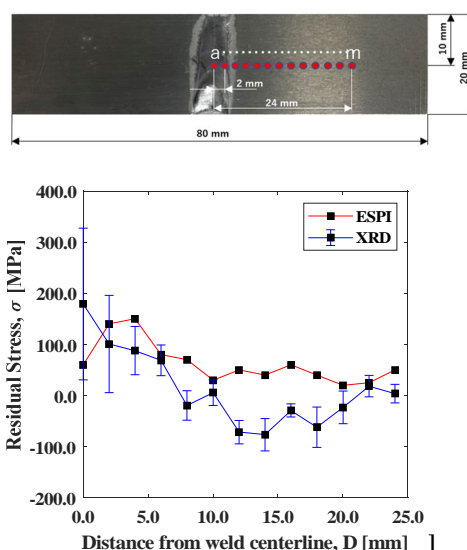


図 11 X 線回折法により測定した残留応力と熱膨張係数から推定した残留応力の比較。(Al 合金の溶接部)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Takahashi Shun, Yoshida Sanichiro, Sasaki Tomohiro, Hughes Tyler	4. 巻 14
2. 論文標題 Dynamic ESPI Evaluation of Deformation and Fracture Mechanism of 7075 Aluminum Alloy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 1530 ~ 1530
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ma14061530	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 Yoshida Sanichiro, Sasaki Tomohiro	4. 巻 13
2. 論文標題 Deformation Wave Theory and Application to Optical Interferometry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 1363 ~ 1363
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ma13061363	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 T.Sasaki, S.Yoshida, T.Ogawa, J.Shitaka, C.McGibboney	4. 巻 13
2. 論文標題 Effect of residual stress on thermal deformation behavior	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ma12244141	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

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 シリトンガケンジ, 佐々木朋裕, 金泰元, 土井悠平
2. 発表標題 多層箔の超音波接合における材料の変形制御
3. 学会等名 令和3年度日本金属学会北陸信越支部・日本鉄鋼協会北陸信越支部 支部総会・連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 海野凌弥 佐々木朋裕 伊藤太初
2. 発表標題 加熱圧接における接合界面ひずみの評価
3. 学会等名 2021年度日本機械学会機械材料・材料加工部門 第29回機械材料・材料加工 技術講演会(M&P2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村田祐真, 佐々木朋裕, 吉田賛一郎, 小川覚, 堀井和真
2. 発表標題 スペckルパターン干渉法による残留応力の非破壊・非接触評価の可能性
3. 学会等名 溶接学会 第119回界面接合研究委員会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村田 祐真 (新潟大), 佐々木 朋裕, 堀井 和 真, 小川 覚, 吉田 賛一郎
2. 発表標題 ESPI による局所熱変形挙動の可視化
3. 学会等名 日本機械学会 北陸信越支部 第58期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sanichiro Yoshida, David R. Didie, Tomohiro Sasaki, Shun Ashina, Shun Takahashi
2. 発表標題 Dynamics of Deformation-to-Fracture Transition Based on Wave Theory
3. 学会等名 Society for Experimental Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小川 寛, 佐々木朋裕, 吉田賛一郎
2. 発表標題 局所熱変形の可視化による残留応力評価
3. 学会等名 日本金属学会北陸信越支部, 令和元年度総会・連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K.Miyasaka, E.Lapprime, S.Yoshida, T.Sasaki
2. 発表標題 Application of Gaussian Beam to Ultrasonic Testing
3. 学会等名 ATEM ' 19 International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Ogawa, T.Sasaki, S.Yoshida
2. 発表標題 32.Residual stress estimation with visualization of thermal deformation using electronic spackle pattern interferometry
3. 学会等名 ATEM ' 19 International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jun Shitaka, Sanishiro Yoshida, Tomohiro Sasaki
2. 発表標題 Residual stress analysis with visualization of thermal deformation using electronic speckle pattern interferometry
3. 学会等名 The 88ths Annual Meeting of the APS Southeastern Section, USA.
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 Kyohei Miyasaka, Emily LaPrime, Sanichiro Yoshida, Tomohiro Sasaki
2. 発表標題 Acoustic probing based on Gaussian ray tracing
3. 学会等名 The 88ths Annual Meeting of the APS Southeastern Section, USA.
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 高澤啓太, 佐々木朋裕, 永井辰弥
2. 発表標題 電子スペックルパターン干渉法を用いた疲労変形挙動の可視化
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部, 第56期総会・講演会
4. 発表年 2018年～2019年

〔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	坂本 秀一 (Sakamoto Shuichi) (40211932)	新潟大学・自然科学系・准教授 (13101)	
研究 分担者	プラムディタ ジョナス (Pramudita Jonas) (50615458)	日本大学・工学部・准教授 (32665)	

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
---------	---------