

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月3日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14119

研究課題名（和文）不規則な実働荷重負荷下の散逸エネルギー計測法開発とこれによる疲労損傷発生予知

研究課題名（英文）Development of measurement system of energy dissipation under random loading and its application to fatigue damage evaluation

研究代表者

阪上 隆英（Sakagami, Takahide）

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：50192589

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、可視光学画像・赤外線画像の同視野・同時計測による、高精度な熱弾性応力計測および散逸エネルギー計測システムを構築することを目的とした。可視光学画像と赤外線画像を空間的・時間的に同期させることで、可視光学計測による対象物の変形情報を高精度に求め、これを時系列赤外線計測データにフィードバックさせることで、高精度な位置補正処理による熱弾性応力計測および散逸エネルギー計測の高精度化を実現させた。これにより、顕微計測視野での応力および散逸エネルギー計測精度の改善、熱弾性応力計測による有効応力拡大係数範囲のその場評価を可能とした。また、ランダム負荷下での散逸エネルギー計測の実現可能性を検証できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

構造物の経年劣化が大きな問題となっている。設計寿命を超えた構造物の延命化のためには、的確な構造健全性保障による維持管理手法の構築が急務である。橋梁やクレーンなどの鋼構造物の構造健全性保証においては、疲労き裂の非破壊評価が重要である。これまでの非破壊評価法は、疲労き裂の検出や進展評価に重点を置いていたが、構造健全性をライフサイクルで保障するためには、疲労き裂発生（あるいは補修後の再発生）予測が必要である。本研究は、き裂発生評価に有効な応力分布および散逸エネルギー分布計測を高精度化し、実構造物に対して評価の可能性を広げたことに学術的・社会的意義を有するものである。

研究成果の概要（英文）：In this research project, a highly accurate thermoelastic stress measurement and dissipation energy measurement system was developed based on the same field of view and simultaneous measurement of visible optical images and infrared images. The visible images and the infrared images were spatially and temporally synchronized. Accurately determined deformation information of the object by visible measurement was applied to time-series infrared measurement data to perform highly accurate motion compensation processing, and the accuracy of thermoelastic stress measurement and dissipative energy measurement was improved. As a result, it enables us to improve the measurement accuracy of stress and dissipated energy in the microscopic measurement field, and also to evaluate the effective stress intensity factor range by thermoelastic stress measurement. We also verified the feasibility of measuring the energy dissipation under random loading.

研究分野：材料力学

キーワード：熱弾性応力計測 散逸エネルギー計測 非破壊評価 可視・赤外同期 位置補正 破壊力学評価

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

構造物の経年劣化が大きな問題となっている。設計寿命を超えた構造物の延命化のためには、的確な構造健全性保障による維持管理手法の構築が急務である。橋梁やクレーンなどの鋼構造物の構造健全性保証においては、疲労き裂の非破壊評価が重要である。これまでの非破壊評価法は、疲労き裂の検出や進展評価に重点を置いて研究開発が行われてきたが、構造健全性をライフサイクルで保障するためには、Fig.1 のように、き裂検出・進展性評価に加え、補修後の構造健全性回復の検証、さらには疲労き裂の発生（あるいは補修後の再発生）予測が新たなキーテクノロジーとなり、このための学術研究が必要であった。著者らはこれまでに、Fig.1 に示したように、構造物の疲労損傷に関するライフサイクルの各ステージにおいて、遠隔から非破壊・非接触に疲労損傷を評価できる赤外線非破壊評価法の開発を行ってきており、一部の技術は長大橋の維持管理において社会実装レベルに至っている。一方で、実測物理量による力学的根拠に基づく疲労き裂発生予測に関しては、世界的に未踏の領域にあり、著者らによる散逸エネルギー計測に基づく疲労損傷発生評価が系統的学術研究の端緒であった。

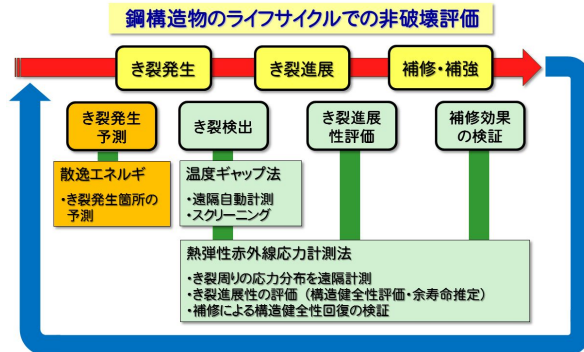


Fig. 1 Nondestructive evaluation in life-cycle of steel structure.

2. 研究の目的

本研究では、熱弾性応力計測および散逸エネルギー計測に基づく疲労き裂発生・進展評価を社会実装する上で必要不可欠な、不規則な実働荷重負荷下での応力分布および散逸エネルギー分布を高分解能かつ高精度に計測する手法を開発し、これに基づき高い信頼度で疲労き裂発生・進展を非破壊的に評価できる手法を構築することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、不規則な実働荷重負荷下での応力分布および散逸エネルギー分布の高精度な計測を実現するため、可視・赤外画像の同視野同期計測システムを開発した。これにより、デジタル画像相関 (DIC) による光学的全視野ひずみ分布計測、赤外線計測データのサブピクセルレベルでの高精度な全視野計測位置補正、赤外線計測による熱弾性応力変動分布と散逸エネルギー分布の分離計測および両者の位相計測を高精度に行うことが可能になった。また、開発した可視・赤外同期計測手法の応用として、き裂先端近傍の応力分布および散逸エネルギー分布を用いたき裂開口の影響を考慮した有効応力拡大係数範囲の評価、不規則荷重負荷時の散逸エネルギーによる温度変動成分の抽出に関する基礎的検討を実施した。

4. 研究成果

4.1 熱弾性応力計測および散逸エネルギー計測

断熱状態の材料に荷重が与えられる場合、主応力 $\Delta\sigma$ と温度変化 ΔT の関係は、次式のような熱弾性効果に関する基礎式で表される。

$$\Delta T = -\frac{\alpha}{\rho C_p} T \Delta\sigma = -k T \Delta\sigma \tag{1}$$

ここで、 α は線膨張係数、 ρ は密度、 C_p は定圧比熱、 T は材料の絶対温度、 k は熱弾性係数である。赤外線サーモグラフィを用いて計測された温度変動から、式(1)に基づいて主応力 $\Delta\sigma$ の変化量を求めることができる。

散逸エネルギーに関しては、物体に繰返し引張・圧縮負荷を与えたとき、最大引張応力作用時および最大圧縮応力作用時の付近で、物体の微小塑性変形に起因した発熱が生じ、物体にはこれに起因する負荷周波数の2倍の周波数成分を有する温度変動が現れる。したがって、赤外線サーモグラフィで得られる繰返し負荷時の温度変動にロックイン処理を施すことにより、負荷の2倍周波数成分として抽出される温度変動 ΔT_D を、散逸エネルギーとして評価する。

4.2 可視・赤外同期計測による高精度な全視野位置補正

計測対象物には、荷重応力による剛体移動および変形が生じているため、赤外線カメラの計測視野内においては、観測点の相対位置の変化が現れる。このため、時系列の赤外線データを処理するロックイン計測においては、この位置ずれが無視できない計測誤差となって応力および散逸エネルギー計測結果に悪影響を及ぼす。市販の応力計測システムには簡易的に位置ずれを補正する機能を有するものもあるが、本研究で目的とする高精度な応力分布および散逸エネルギー分布の計測には不十分であり、全視野でサブピクセルレベルでの高精度な位置補正を可能とする計測システムを開発した。

本研究で用いた可視・赤外線同期計測システムの概要を Fig.2 に示す。高速度光学カメラおよび赤外線サーモグラフィにより同時に測定対象を撮影した。赤外線カメラは測定対象と正対しており、光学カメラは赤外カメラに対して角度 θ の位置に設置した。同期信号発信装置からの矩形波状の同期信号をもとに、光学カメラおよび赤外線サーモグラフィで時間的に同期した

データを取得した。制御用 PC には、疲労試験機からの荷重信号、ストローク、ひずみなどの参照信号を取り込んだ。可視光学カメラで計測された時系列画像データ群に、DIC を適用することで、計測対象の光学画像内での変位分布情報を算出した。次に、可視データから DIC で求めた変位分布情報を、赤外線画像に反映させることで、赤外線計測データの位置補正を行った。このとき、光学カメラと赤外線サーモグラフィの視差を補正するため、光学画像をホモグラフィ変換することにより位置データを赤外線画像に反映させた。以上の手順により、空間的に視野が一致した計測を、時間的に同期させて行うことを可能にした。ホモグラフィ変換のため、測定対象に塗布した黒体塗料を一部剥ぐことにより、可視光および赤外線の両方で検出できるマーカーを撮影視野の四隅に設けた。また、光学画像での DIC による変位計測のため、光学カメラでは検出可能であるが、赤外線計測には影響を及ぼさないような分光放射特性を有する塗料を用いて、ランダムパターンを試験対象物の表面に導入した。

4.3 可視・赤外線同期計測結果

実験に用いた試験片(アルミニウム合金 A5052)の形状を Fig.3(a)に示す。負荷条件としては、応力比 $R=-1$ 、周波数 $f=5\text{Hz}$ の正弦波状応力波形として、公称応力振幅は $\sigma_a=50\text{MPa}$ とした。計測条件としては、赤外線サーモグラフィおよび光学カメラの撮影周波数を 100Hz 、撮影時間を 10s とした。計測された温度変動データに対して周波数解析を行い、負荷周波数の成分を熱弾性応力、負荷周波数の 2 倍の周波数成分を散逸エネルギーとして抽出した。光学計測における DIC 用のマーカーは、スパッタリングと呼ばれる斑点模様を描く技法によって試験片に塗布した。試験片表面の光学画像を Fig.3(b)に示す。

得られた熱弾性応力分布および散逸エネルギー分布を Fig.4 および Fig.5 にそれぞれ示す。光学画像による変位検出によって、円孔下部では光学画像で約 4 pixel の変位が確認された。図 4(a) に示した位置補正を適用していない場合の熱弾性応力分布では、円孔下部のエッジ部に大きな誤差が現れているのに対し、位置補正を適用した場合には誤差が完全に消えていることがわかる。図 5 に示した散逸エネルギー分布においても、同様の傾向が現れている。さらに、散逸エネルギー分布においては、位置補正を適用することにより、円孔付近で抽出された散逸エネルギーが小さくなっているが、これは試験片の変位による位置ずれに起因した見かけの温度変動によるノイズ成分が除去されたことによる効果であると考えられる。

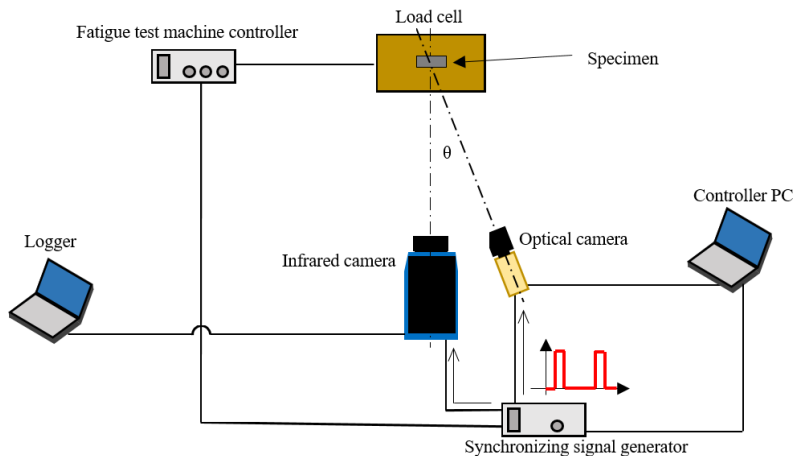
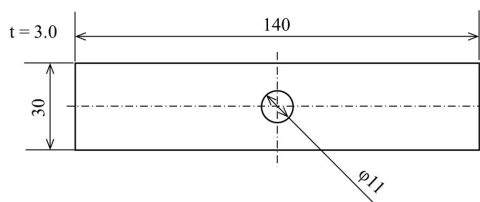
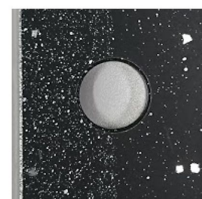


Fig. 2 Schematics of the developed visible and infrared measurement system.

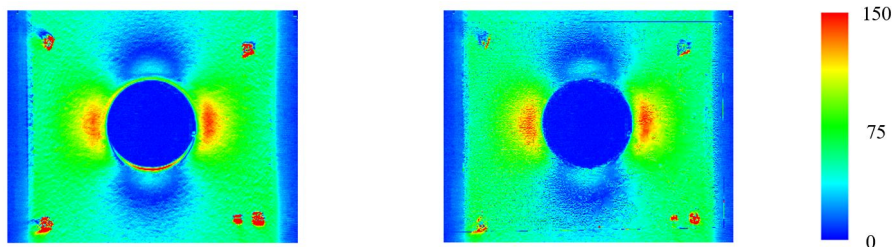


(a) Geometry of specimen



(b) Photograph of marking for DIC

Fig. 3 Specimen employed for visible and infrared measurement.



(a) without motion compensation

(b) with motion compensation

[MPa]

Fig. 4 Results of stress measurement ($\sigma = 50\text{MPa}$, $f = 100\text{Hz}$)

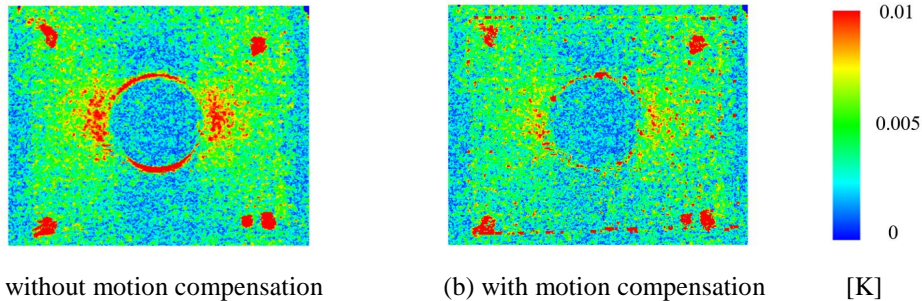


Fig. 5 Results of dissipated energy measurement ($\sigma = 50\text{MPa}$)

4.4 可視・赤外線同期計測の破壊力学評価への適用

熱弾性応力測定法の適用により、鋼構造物に対する広範囲の応力分布評価が可能となり、計測された応力分布をもとに、破壊力学パラメータである応力拡大係数を算出することができる。これまでの研究において、赤外線計測により得られた応力拡大係数範囲は、実際の応力拡大係数よりわずかに小さな値を示すという結果が報告されている。本研究では、開発した可視・赤外線同期計測システムによる位置補正を用いて、熱弾性応力計測による応力拡大係数の評価の高精度化を試みるとともに、応力拡大係数評価への散逸エネルギー計測適用の有用性について検討した。

(a) 熱弾性応力計測による応力拡大係数の算出 無限板中のき裂に対するモード I における主応力 $(\sigma_r + \sigma_\theta)$ の応力分布解の級数展開式は、次式のように表される。

$$\sigma_r + \sigma_\theta = \left(\sqrt{\frac{2}{\pi r}} \cos \frac{1}{2} \theta \right) K + C_2 + \left(r^{1/2} \cos \frac{1}{2} \theta \right) C_3 + \dots \quad (2)$$

式(2)の右辺の 1 項までを考慮し、き裂面に平行な線上 ($\theta = 0$) における応力分布を考えると次式が得られる。

$$\frac{1}{\Delta\sigma_r + \Delta\sigma_\theta} = \sqrt{\frac{\pi}{2\Delta K}} r \quad (3)$$

熱弾性応力計測で得られた主応力 $(\sigma_r + \sigma_\theta)$ の逆数 $1 / (\Delta\sigma_r + \Delta\sigma_\theta)$ をき裂先端からの位置 $r^{1/2}$ に対してプロットしたときの両者の関係から応力拡大係数を算出することができる。

(b) 試験片 実験で用いた C(T) 試験片の形状を Fig. 6 に示す。供試材は SUS316L である。DIC を用いた位置補正のため、試験片表面には黒体化塗料の上に、白色のランダムパターンを塗布した。また、ひずみ測定のため試験片背面にひずみゲージを貼付した。

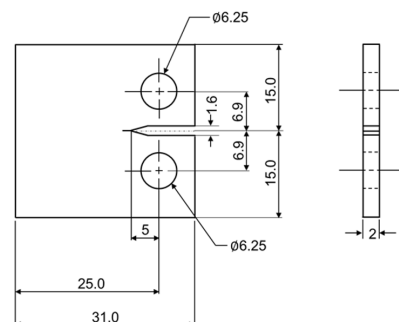


Fig. 6 Configuration of C(T) specimen

(c) 試験条件および試験方法 C(T) 試験片を用いた ΔK 一定き裂進展試験中に、熱弾性応力測定結果に基づいて応力拡大係数の評価を行った。負荷条件としては応力比 $R=0.1$ 、負荷周波数 $f=10\text{Hz}$ とした。き裂が 0.2mm 進展するごとに ΔK を増加させた。試験制御に用いるき裂長さの測定には、試験片背面に貼り付けたひずみゲージからのひずみおよびロードセルからの負荷力の測定値を用いた、除荷弾性コンプライアンス法を適用した。光学計測の DIC 評価により得られた変位分布情報を、赤外画像に反映させることで高精度な位置補正を行った。

(d) 実験結果 赤外線サーモグラフィにより得られたき裂近傍の主応力分布および散逸エネルギー分布を Fig. 7 (a) および (b) にそれぞれ示す。光学顕微鏡で実測したき裂先端位置を图中的白破線で示している。図より応力分布にはき裂による応力集中が、散逸エネルギー分布にはき裂先端に高散逸エネルギーの領域がそれぞれ現れていることがわかる。き裂先端の応力は弾性解析では無限大となるが、実際にはき裂先端に塑性域が形成される。散逸エネルギー

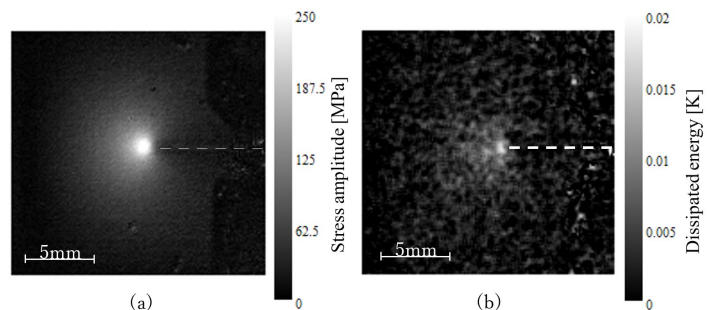


Fig. 4 Distributions of (a) measured sum of principal stress amplitude and (b) dissipated energy (crack length $a=12\text{mm}$, $\Delta K=12.6\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$).

は微小塑性変形に起因した発熱であることから、散逸エネルギー計測結果はき裂先端の塑性域を検出していることが考えられた。そこで散逸エネルギー分布と塑性域寸法の関係について調べた結果、散逸エネルギー分布における高散逸エネルギー領域の寸法 ω は、き裂先端に形成される最大

塑性域寸法の理論値によく一致した。これにより、散逸エネルギー計測で得られた高散逸エネルギー領域では、き裂先端に形成される塑性域に起因した発熱をとらえていることがわかった。また、高散逸エネルギー値を示した領域の端部の位置は、実際の疲労き裂先端の位置によく一致した。これに対して、主応力分布では、き裂先端では熱拡散などの影響によりき裂先端の応力値が低く評価されるため、応力分布からき裂先端の位置を特定することが困難であることがわかった。そこで、赤外線計測による応力拡大係数範囲の算出では、散逸エネルギー分布に基づいてき裂先端位置を決定するとともに、この情報を熱弾性応力分布計測結果に反映させて、応力拡大係数範囲を算出した。赤外線計測により得られた応力拡大係数範囲 ΔK_{thermo} 、除荷弾性コンプライアンス法により算出された ΔK および ΔK_{eff} の値を Fig. 5 に示す。Fig. 5 より、赤外線計測から得られた ΔK_{thermo} は ΔK よりも ΔK_{eff} に近い値を示していることがわかる。赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力計測では、き裂開口時における応力特異性の変動を主にとらえているため、赤外線サーモグラフィにより得られる ΔK_{thermo} は ΔK_{eff} に相当する値を示していることが明らかになった。

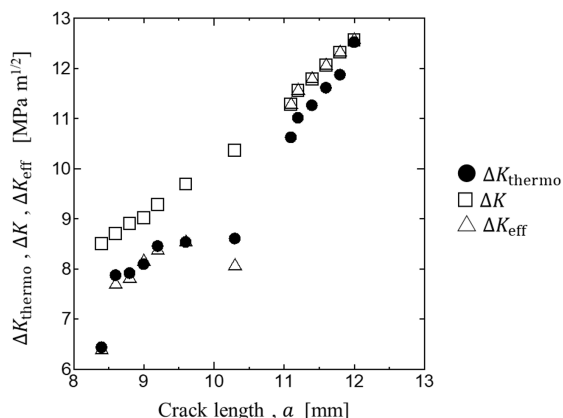


Fig. 5 Comparison between effective stress intensity factor range and stress intensity factor range measured by infrared measurement

5. 主な発表論文等
〔雑誌論文〕(計6件)

赤井淳嗣, 塩澤大輝, 船造俊介, 珍坂恵大, 阪上隆英: 散逸エネルギー計測に基づくアルミニウム合金 A6061-T6 の疲労強度評価, 材料, 査読有, Vol.67, No.12, 2018, pp.1036–1041, <https://doi.org/10.2472/jsms.67.1036>

Daiki Shiozawa, Yuto Ogino, Takaya Washio, Takahide Sakagami, Hideki Ueda, Taizo Makino: Fatigue Limit Estimation for Single Bead-on-plate weld Based on Dissipated Energy Measurement, Baldi, Simon Quinn, Xavier Balandraud, Janice M. Dulieu-Barton, Sven Bossuyt (Ed), Residual Stress, Thermomechanics & Infrared Imaging, Hybrid Techniques and Inverse Problems, 査読有, Volume 7, 2018, pp.119–123, https://doi.org/10.1007/978-3-319-95074-7_23

Takahide Sakagami, Daiki Shiozawa, Yu Nakamura, Shinichi Nonaka, Kenichi Hamada: Evaluation of Fatigue Damage in Short Carbon Fiber Reinforced Plastics Based on Thermoelastic Stress and Phase Analysis, Baldi, Simon Quinn, Xavier Balandraud, Janice M. Dulieu-Barton, Sven Bossuyt (Ed), Residual Stress, Thermomechanics & Infrared Imaging, Hybrid Techniques and Inverse Problems, 査読有, Volume 7, 2018, pp.109–113, https://doi.org/10.1007/978-3-319-95074-7_21

遠藤英樹, 和泉遊以, 阪上隆英, 河本恭平: 熱弾性応力測定に基づく微細粒ペーストの疲労き裂進展抑制効果の検証, 非破壊検査, 査読有, Vol.67, 2018, pp.89–94

Daiki Shiozawa, Takahide Sakagami, Yu Nakamura, Shinichi Nonaka, Kenichi Hamada: Fatigue Damage Evaluation of Short Carbon Fiber Reinforced Plastics Based on Phase Information of Thermoelastic Temperature Change, Sensors, 査読有, 2017, Vol.17, 2824, doi:10.3390/s17122824

Takahide Sakagami, Yoshiaki Mizokami, Daiki Shiozawa, Taisei Fujimoto, Yui Izumi, Taku Hanai, Akira Moriyama, Verification of the repair effect for fatigue cracks in members of steel bridges based on thermoelastic stress measurement, Engineering Fracture Mechanics, 査読有, Volume 183, 2017, pp.1–12, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.05.024>

〔学会発表〕(計26件)

Yuji Uchida, Daiki Shiozawa, Mitsuhiro Hori, Kazuki Kobayashi, Takahide Sakagami: Accuracy improvement of thermoelastic stress and dissipation energy measurement by motion compensation with optical-infrared synchronous measurement, 2019 SEM Annual Conference & Exposition, 2019 塩澤大輝, 珍坂恵大, 三島一郎, 阪上隆英: 散逸エネルギー計測に基づいたアルミニウム合金 A50 の疲労強度推定, 日本材料学会第 68 期学術講演会, 2019 山本大貴, 塩澤大輝, 阪上隆英: 赤外線サーモグラフィを用いた熱弾性応力および散逸エネルギー計測に基づく応力拡大係数評価, 日本材料学会第 68 期学術講演会, 2019 阪上隆英: 長大鋼橋梁の維持管理のための赤外線計測技術の開発, 土木学会 - 日本非破壊検査協会 合同シンポジウム「非破壊試験が拓くインフラメンテナンスの未来」, 2019 Takahide Sakagami: Development of NDE techniques for the maintenance of long-span steel bridges based on infrared measurement (Invited lecture), JSNDI 2018 Fall Annual Conference, KSNT JSNDI Joint International Session, 2018

小林和樹, 塩澤大輝, 阪上隆英, 堀充宏, 内田勇治: 光学-赤外線同期計測による位置補正画像処理を援用した熱弾性応力および散逸エネルギー計測の高精度化, 日本機械学会 M&M 2018, 2018

寺内勇希, 井原航生, 塩澤大輝, 阪上隆英, 溝上善昭, 有馬敬育, 林昌弘: 赤外線応力計測による鋼橋梁部材の疲労き裂進展性評価と補修効果検証, 日本機械学会 M&M2018, 2018

井原航生, 溝上善昭, 林昌弘, 阪上隆英, 塩澤大輝, 東智之, 寺内勇希: 熱弾性応力計測に基づく鋼構造溶接部の疲労き裂進展性評価, 日本材料学会第 67 期学術講演会, 2018

Takahide Sakagami, Daiki Shiozawa, Yu Nakamura, Shinichi Nonaka, Kenichi Hamada, Evaluation of Fatigue Damage in Short Carbon Fiber Reinforced Plastics Based on Thermoelastic Stress and Phase Analysis, 2018 SEM Annual Conference & Exposition, 2018

Daiki Shiozawa, Yuto Ogino, Takaya Washio, Takahide Sakagami, Hideki Ueda, Taizo Makino: Fatigue Limit Estimation for Single Bead-on-plate weld Based on Dissipated Energy Measurement, 2018 SEM Annual Conference & Exposition, 2018

Takahide Sakagami, Daiki Shiozawa, Yoshiaki Mizokami, Masahiro Hayashi, Yui Izumi: Fatigue crack evaluation for steel bridge maintenance by infrared thermography, The Sixth Japan-US NDT Symposium Emerging NDE Capabilities for a Safer World, 2018

寺内勇希, 溝上善昭, 奥村淳弘, 阪上隆英, 塩澤大輝, 東智之: 熱弾性応力計測による鋼構造部材の疲労き裂進展性評価, 土木学会第 73 回年次学術講演会, 2018

塩澤大輝, 荻野雄斗, 鷲尾貴哉, 上田秀樹, 牧野泰三, 阪上隆英: 散逸エネルギー計測に及ぼす塗膜の影響, 日本機械学会 M&M2017, 2017

Takahide Sakagami, Daiki Shiozawa, Yu Nakamura, Shinichi Nonaka, Kenichi Hamada: Detection of fatigue damage in short carbon fiber reinforced plastics using thermoelasticity, AITA2017, The 14th International Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications, 2017

Daiki Shiozawa, Tsuyoshi Inagawa, Takaya Washio, Takahide Sakagami: Effect of mean stress on phase difference of dissipated energy, AITA2017, The 14th International Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications, 2017

阪上隆英, 溝上善昭, 奥村淳弘, 塩澤大輝, 藤本泰成, 東智之, 和泉遊以: 熱弾性応力分布計測結果の破壊力学評価による鋼構造部材の疲労き裂進展性評価, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 2017

東智之, 溝上善昭, 中山和真, 阪上隆英, 塩澤大輝, 藤本泰成, 和泉遊以: 熱弾性応力分布計測結果の破壊力学評価による鋼橋の疲労き裂補修効果の検証, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 2017

Takahide Sakagami, Yoshiaki Mizokami, Daiki Shiozawa, Yui Izumi, Akira Moriyama: TSA based evaluation of fatigue crack propagation in steel bridge members, 2nd International Conference on Structural Integrity, ICSI 2017, 2017

赤井淳嗣, 船造俊介, 塩澤大輝, 阪上隆英: 散逸エネルギー測定に基づく疲労強度推定法のアルミニウム合金 A6061-T6 への適用, 日本材料学会第 66 期学術講演会, 2017

⑳ 珍坂恵大, 船造俊介, 塩澤大輝, 赤井淳嗣, 阪上隆英: 赤外線サーモグラフィを用いた黄銅に対する散逸エネルギー計測, 日本材料学会第 66 期学術講演会, 2017

㉑ 荻野雄斗, 鷲尾貴哉, 塩澤大輝, 上田秀樹, 牧野泰三, 阪上隆英: 散逸エネルギー計測に基づくビードオンプレート溶接部材に対する疲労限度推定, 日本材料学会第 66 期学術講演会, 2017

㉒ Takahide Sakagami, Daiki Shiozawa, Yu Nakamura, Shinichi Nonaka, Kenichi Hamada: Fatigue damage evaluation of short fiber CFRP based on phase information of thermoelastic temperature change, SPIE Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXIX, 2017

㉓ 奥野颯太, 阪上隆英, 塩澤大輝, 赤井淳嗣: 赤外線サーモグラフィを用いた高倍率温度計測の取り組み, 日本機械学会関西支部第 92 期定時総会講演会, 2017

㉔ 奥野颯太, 山田大貴, 赤井淳嗣, 塩澤大輝, 阪上隆英: 赤外線サーモグラフィを用いた散逸エネルギーの顕微計測, 日本機械学会 M&M2016, 2016

㉕ 鷲尾貴哉, 塩澤大輝, 上田秀樹, 牧野泰三, 阪上隆英: 散逸エネルギー測定に基づくガセット溶接継手に対するき裂発生位置予測, 日本機械学会 M&M2016, 2016

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 塩澤大輝

ローマ字氏名: SHIOZAWA Daiki

所属研究機関名: 神戸大学

部局名: 大学院工学研究科

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 60379336

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。