

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 14 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360057

研究課題名(和文) 応力場変動および散逸エネルギーの遠隔赤外線計測に基づく構造健全性評価法の開発

研究課題名(英文) test

研究代表者

阪上 隆英 (Sakagami, Takahide)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50192589

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円、(間接経費) 4,170,000円

研究成果の概要(和文)：疲労き裂を有する経年劣化鋼構造物の安全性および構造健全性を評価し、的確かつ効率的に構造物を維持管理する手法が重要視されている。本研究では、疲労き裂の発生・進展に関わる構造健全性評価を、実働負荷下での応力変動分布および散逸エネルギー分布の計測結果に基づき行い、これにより構造物の全寿命域における維持管理を可能とする「構造健全性トリアージ」構築について検討した。散逸エネルギーに基づくき裂発生予測、疲労限度予測根拠を解明するため、疲労損傷過程における散逸エネルギー放出メカニズムを解明した。また、熱弾性法による実働応力分布に基づく疲労き裂検出および破壊力学パラメータ評価による構造健全性評価手法の検討を行った。

研究成果の概要(英文)：Recently, fatigue crack propagation in aged structures has become a serious problem. Development of effective and reliable evaluation methods of safety and structural integrity of aging steel structures are indispensable in maintenance program. In this project, a new method of structural integrity evaluation was developed based on thermoelastic stress distribution measurement and dissipated energy distribution measurement by high-performance infrared camera and their data processing for the development of structural integrity triage. As for fatigue crack initiation, energy dissipation mechanism in fatigue crack initiation process was investigated for fatigue limit estimation and crack initiation point estimation. For structural integrity evaluation after fatigue crack initiation, thermoelastic stress analysis was applied for detection of fatigue crack and evaluation of crack propagation based on fracture mechanics parameter determination under on site loading conditions.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 機械材料・材料力学

キーワード：非破壊評価 熱弾性応力計測 散逸エネルギー 疲労き裂

1. 研究開始当初の背景

橋梁や工場設備等、高度成長期に建設されたインフラ鋼構造物の疲労による経年劣化が大きな問題となっている。多くの鋼構造物が設計寿命を超えて使用されており、構造物の構造健全性保障による維持管理が重要な課題となっている。今後の経年構造物の維持管理においては、既存の非破壊検査による体制では不十分であり、新たな学術的視野に立った維持管理体制の革新が求められる。研究代表者らはこれまでに、「構造健全性トリアージ」を提唱してきた。「トリアージ(triage)」とは、「優先順位付け」を意味しており、構造物にどれほど深刻な構造健全性の低下が起こっているかを、学術的根拠に基づき的確に判断し、構造物の構造健全性に応じた処置の優先順位付けにより、機動性に富んだ維持管理政策を実現する。定量非破壊検査技術と破壊力学による構造物の維持管理手法は、国内・外で積極的に研究開発が行われ発展を遂げてきた。しかしながら、これまでの学術研究は、欠陥の定量計測に重点が置かれ、実働力学状態の評価が欠落しているため、「構造健全性トリアージ」の実現には不十分であった。「構造健全性トリアージ」は、実働荷重下での欠陥周辺の力学状態のその場計測・評価と、実測物理量による力学的根拠に基づく疲労き裂発生・進展の的確な評価が可能となって、はじめて実現できる。このための学術的基盤を構築するため、本研究課題の立案に至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、鋼構造物の疲労き裂の発生・進展に関わる構造健全性評価を、実働荷重下での応力変動および散逸エネルギー計測結果に基づき行い、これにより的確かつ機動性に富む構造物の維持管理を可能とする「構造健全性トリアージ」を構築することである。本研究課題では特に、鋼構造物の疲労き裂発生・進展という観点での全ライフサイクルにおいて適用可能な赤外線による非破壊評価構築のための以下の学術的課題の検討を行う。赤外線による熱弾性応力ならびに散逸エネルギー計測法の高度化により、実働荷重下での鋼構造における欠陥発生箇所周辺での力学状態をその場計測できる手法を開発する。散逸エネルギーの定量化に基づく疲労き裂発生評価、き裂開口挙動を包含した実働応力場変動に基づく破壊力学パラメータ評価ならびにき裂進展評価等、学術的未解明事項を究明する。計測結果に基づき、疲労き裂発生・進展評価、残存寿命推定を的確に行うスキームを構築する。

3. 研究の方法

本研究課題では、研究代表者らのこれまでの研究で得られた、遠隔赤外線計測に基づく応力場変動評価に関する知見を基礎に、赤外線計測法をさらに高度化させ、熱弾性温度変

動計測ならびに散逸エネルギー計測を基礎に、実働荷重下での鋼構造の欠陥発生箇所周辺での力学状態、すなわち実働応力分布、応力変動履歴、散逸エネルギー強度分布、塑性域等を正確にその場計測できる計測手法を確立させる。また、これら実測を可能とした力学諸量をもとに、実働応力場変動に基づく破壊力学パラメータ評価を行う。さらに、力学諸量および破壊力学パラメータと疲労き裂発生・進展との関係を実験的に究明し、その成果を実構造に適用することにより、実働荷重下での実測物理量による力学的根拠に基づく構造健全性評価を行う「構造健全性トリアージ」を構築する。

4. 研究成果

鋼構造物のき裂発生・進展過程と、その各段階における赤外線非破壊評価法の維持管理への適用を示す概念図を図1に示す。本研究課題では、き裂発生からき裂進展さらには補修後に至る各段階での赤外線非破壊評価法の検討を行った。その中から、以下では(1)散逸エネルギー計測に基づく疲労限度評価および疲労き裂発生予測、(2)赤外線応力計測に基づく疲労き裂の遠隔検出、(3)赤外線応力計測に基づく破壊力学パラメータ評価法、(4)赤外線応力計測に基づく補修・延命効果評価に関する研究成果を示す。

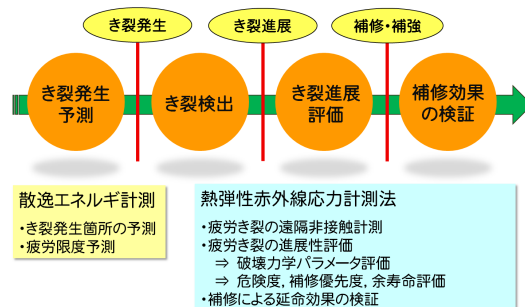


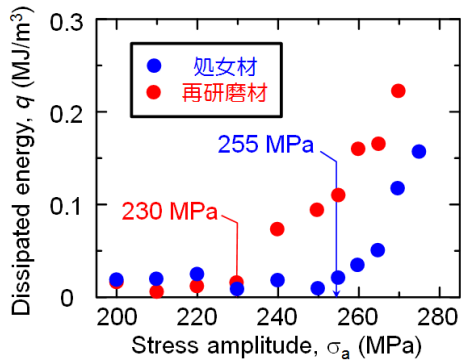
図1 鋼構造物のき裂発生・進展過程と赤外線非破壊評価の維持管理への適用

(1) 散逸エネルギー計測に基づく疲労限度評価および疲労き裂発生予測の検討

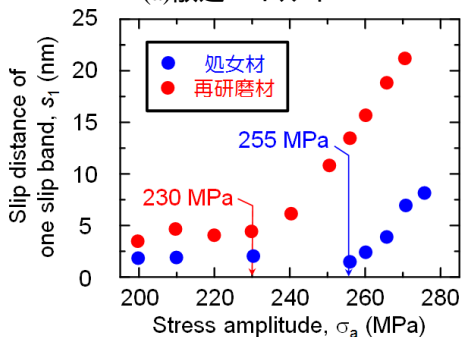
近年、散逸エネルギーに基づく疲労限度の迅速推定法が注目されている。既往の研究は、応力振幅を階段状に増加させる試験において、応力振幅 - 散逸エネルギー関係の折れ曲がり点をもとに、供試材の疲労限度を推定できるという、経験的かつ定性的検討に止まり、散逸エネルギーと疲労き裂発生挙動の関係、疲労限度推定の根拠は明らかになっていない。

本研究課題では、まず疲労損傷過程における散逸エネルギー放出メカニズムの解明を行った。階段状応力振幅増加試験の各応力振幅において散逸エネルギーとすべり帯発生数およびすべり量を AFM 計測した。結果を図2に示す。散逸エネルギーが急増する応力振幅はすべり帯の数および1サイクル当たりのすべり量が急増する応力振幅と一致した。散逸エネルギーが急増する応力振幅は、疲労き裂が発

生する可能性の高い負荷レベルを示していることが明らかとなった。さらに、ショットピーニングによる表面改質材に対する疲労限度推定試験では、散逸エネルギーに基づく疲労限度は、S-N 曲線による疲労限度よりも小さくなった。S-N 曲線による疲労限度が表面改質によるき裂進展抑制効果を含めた評価であるのに対して、散逸エネルギーに基づく疲労限度は、疲労き裂の発生に関わる限界応力を推定していることがわかった。



(a)散逸エネルギー



(b)すべり帯 1 つあたりのすべり量

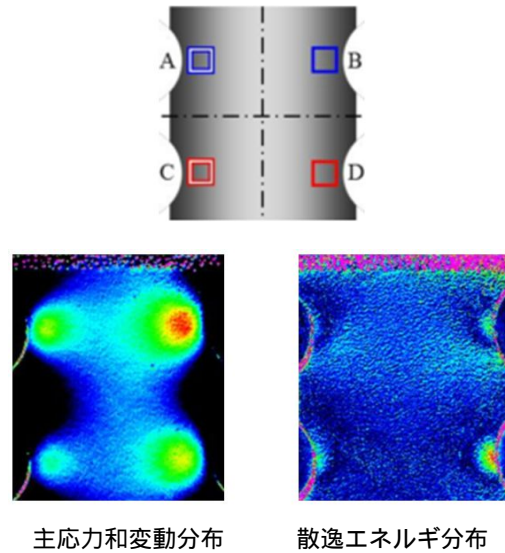
図 2 応力振幅増加試験において計測された散逸エネルギーとすべり量

さらに SUS304 鋼を対象に疲労限度予測を行い、従来の破断試験による結果との比較を行った。疲労損傷過程での転位や相変態などの微視組織変化と散逸エネルギーとの関係を調べた結果、以下のことが明らかになった。

- ・散逸エネルギーは、繰返し加工軟化・硬化挙動と傾向が一致する。
- ・散逸エネルギーは、マルテンサイト変態の影響を受けて減少する。
- ・散逸エネルギーは、転位や相変態などの微視組織構造の変化を反映している。
- ・マルテンサイト相は、硬質相として微小き裂の成長・進展を抑制するが、散逸エネルギーに基づく疲労限度予測法では、相変態の影響を考慮しないため、疲労限度は小さく予測される。

本研究課題では、さらに散逸エネルギー計測に基づく疲労き裂発生箇所の予測に関する検討を行った。図 3 は、4 つの同じ形状の切欠きを有する試験片に繰返し負荷を与えたときの主応力和変動および散逸エネルギーの分布の計測結果である。散逸エネルギーが最大となる位置は主応力和変動が最大となる

位置と異なり、疲労き裂は散逸エネルギーが最大となる位置（切欠き D）から発生し破断に至った。散逸エネルギーが疲労き裂発生と深く関わっており、き裂発生位置を推定できることが明らかになった。



主応力和変動分布

散逸エネルギー分布

図 3 複数切欠き材に対する主応力和変動および散逸エネルギーの分布の計測結果

【関連する成果発表：雑誌論文
研究発表】

(2) 赤外線応力計測に基づく疲労き裂の遠隔検出に関する検討

研究代表者らのこれまでの研究において、図 4 に示すように、車両による輪荷重載荷によって発生する疲労き裂先端近傍の応力変動計測に基づき、疲労き裂の遠隔検出が可能であることを示した。本研究課題では、本手法の高精度化について検討するとともに、経年劣化が問題となっている種々の鋼構造への適用範囲拡大について検討した。

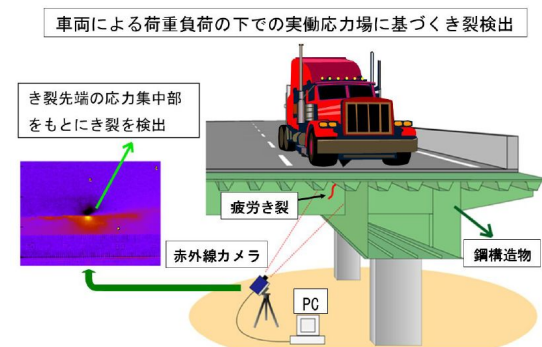


図 4 赤外線応力計測に基づく疲労き裂検出

まずこれまでの非破壊検査法では検出が困難な鋼床版のデッキ進展疲労き裂を、赤外線応力計測により遠隔から検出可能であることを、現場計測により示した。図 5 はき裂前縁の応力集中をもとに裏面のデッキ進展き裂を検出した事例である。

鋼橋梁部材の疲労き裂の遠隔検出につい

ても検討を行った。図6は、長大橋の部材の疲労き裂を5.4mの距離から、大型トラック通過時の応力変動分布の赤外線計測結果である。

さらに、合成床版において鋼板とコンクリートの一体化に用いられるスタッドの疲労き裂検出についても検討を行い、疲労き裂発生・進展時の特徴的な応力分布を高精度に赤外線計測することで、き裂検出が可能であることを示した。

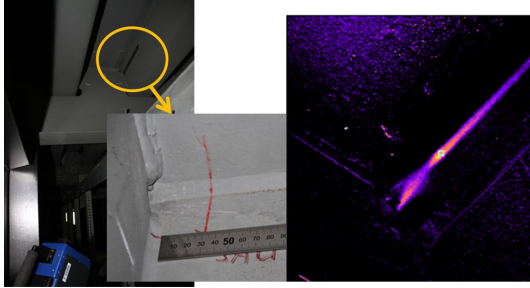


図5 鋼床版のデッキ進展き裂検出結果

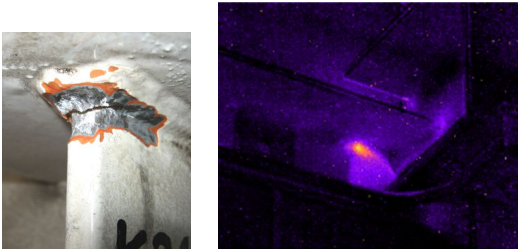


図6 鋼橋部材の疲労き裂遠隔検出結果

【関連する成果発表：雑誌論文，研究発表】

(3) 赤外線応力計測に基づく破壊力学パラメータ評価法に関する検討

疲労き裂を有する橋梁等の鋼構造物の健全性評価あるいは余寿命評価を的確に実施するためには、図7に示すように、き裂進展駆動力を表す破壊力学パラメータを実働応力に基づき正確に求めておくことが重要となる。

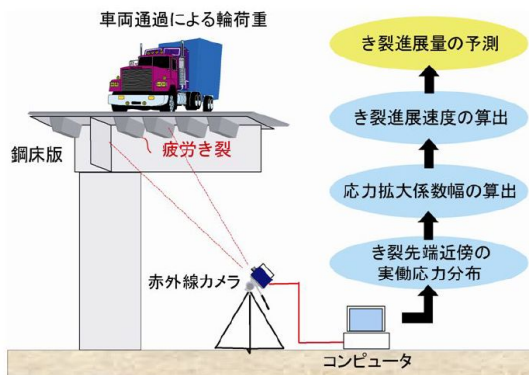


図7 実働応力に基づく構造健全性評価

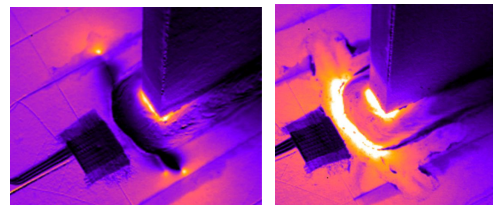
本研究課題では、赤外線計測による構造物の実働応力場から、破壊力学パラメータを精度良く評価する手法として、き裂先端周辺の

応力分布に関する級数解を高次項まで用いて応力拡大係数を外挿する新しい手法を提案した。提案した手法の有用性については、モードI引張負荷および曲げ負荷を受ける2次元き裂、モードIおよびモードIIの混合モード負荷を受ける2次元き裂に対する実験室レベルでの実験的検討を行い、精度よく応力拡大係数を算出できることを実証した。

【関連する成果発表：雑誌論文，研究発表】

(4) 赤外線応力計測に基づく補修・延命効果評価に関する検討

鋼構造物の疲労き裂がある程度以上進展すると、構造物の補修・補強が必要となる。鋼橋梁の場合、強化舗装や当て板補強により構造物に作用する応力を低減させる方法、ストップホールの施工によりき裂先端の特異応力場を消失させる方法、ピーニングツールによりき裂を閉口させ残留応力を導入する方法等が用いられている。いずれの場合においても、補修・補強の効果を確認することが重要となる。そこで、鋼構造物の疲労き裂対策として補修・補強が行われた場合に、赤外線法による応力分布をその場計測することにより、補修・補強の効果を検証することを提案・検討した。実験室レベルでの検討として、衝撃き裂閉口処理の前後で応力分布の計測を行った結果を図8に示す。処理前には疲労き裂の先端で高い応力集中が検出されているのに対し、処理後にはき裂閉口によりき裂先端の応力集中が消失している。このように赤外線応力その場計測により、補修効果を確認できることがわかった。さらに、セラミックスペーストをき裂先端に浸入させることによりき裂先端を閉口させる方法の効果についても、き裂先端付近の応力分布を実測することで確認できることがわかった。



処理前

処理後

図8 衝撃き裂閉口処理の前後で応力分布

【関連する成果発表：研究発表】

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計25件)

Daiki Shiozawa, Ken Inaba, Atsushi Akai, Takahide Sakagami, Experimental study of relationship between energy dissipation and fatigue damage from observation of slip band by atomic force microscope, Proc. of Fatigue 2014 11th International Congress, 査読有, (In press)

赤井淳嗣, 塩澤大輝, 阪上隆英, SUS304 鋼に対する散逸エネルギー評価による疲労限度予測法の測定条件に関する検討, 非破壊検査, 査読有, Vol.63, No.3, 2014, pp. 153-160

赤井淳嗣, 塩澤大輝, 阪上隆英, 散逸エネルギー評価による SUS304 鋼試験片の疲労限度予測法に及ぼす結晶粒径の影響, 日本機械学会論文集 (A 編), 査読有, Vol.79, No.807, 2013, pp.1581-1592

Shiro Kubo, Takahide Sakagami, Seiji Ioka, Passive electric potential CT method using piezoelectric film for identification of defects, Inverse Problems in Science and Engineering, 査読有, Vol. 21, No. 6, 2013, pp. 917-928

赤井淳嗣, 塩澤大輝, 阪上隆英, オーステナイト系ステンレス鋼の散逸エネルギー評価, 材料, 査読有, Vol.62, No.9, 2013, pp.554-561

Takahide Sakagami, Yui Izumi, Takuyo Konishi, Yohei Matsuo, Detection of through-deck-type fatigue cracks in highway steel bridges by self-reference lock-in thermography, Proc. of ASCE 2013 International Orthotropic Bridge Conference, 査読無, 2013, pp.279-286

水野浩, 和泉遊以, 阪上隆英, 松井繁之, 杉山俊幸, 赤外線サーモグラフィを用いた鋼・コンクリート合成床版の非破壊検査手法に関する研究, 土木学会構造工学論文集, 査読有, Vol.59A, 2013, pp.1161-1169

赤井淳嗣, 塩澤大輝, 阪上隆英, オーステナイト系ステンレス鋼の疲労限度評価, 材料, 査読有, Vol.61, No.12, 2012, pp.953-959

Shiro Kubo, Kokoro Nakamura, Takahide Sakagami, The passive electric potential computed tomography method for identification of a part-through three-dimensional crack, B.H.V. Topping (Ed.) Proc. of the Eleventh International Conference on Computational Structures Technology, 査読有, Paper88, 2012, Civil-Comp Press, Stirlingshire, Scotland

Atsushi Akai, Daiki Shiozawa, Takahide Sakagami, Shogo Ootobe, Ken Inaba, Relationship between dissipated energy and fatigue limit for austenitic stainless steel, proc. of 15th Int. Conf. on Experimental Mechanics, 査読無, CD-ROM, 2012, Paper Ref 2600

鄭子揚, 阪上隆英, 久保司郎, 佐藤大輔, 赤外線サーモグラフィ法による建築物外壁タイルはく離検出における反射ノイズ低減, 非破壊検査, 査読有, Vol.61, No.5, 2012, pp.235-238

Shiro Kubo, Takahide Sakagami, Toshio Suzuki, Multiple electrodes active pulse echo method using a piezoelectric film for crack identification, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 査読有, Vol.6, No.6, 2012, pp.519-529

鄭子揚, 阪上隆英, 久保司郎, 佐藤大輔, 中村士郎, フーリエ級数係数を用いたパッシブ赤外線サーモグラフィによるコンクリー

トのはく離深さ評価, 非破壊検査, 査読有, Vol.61, No.2, 2012, pp.78-83

Takahide Sakagami, Yui Izumi, Shiro Kubo, Successful application of thermoelasticity to remote inspection of fatigue cracks, Tom Proulx (Ed.), Thermomechanics and Infra-Red Imaging, Volume 7, Proceedings of the 2011 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics, 査読無, 2011, Springer, pp.99-106

〔学会発表〕(計 54 件)

阪上隆英, 石川敏之, 神田拓郎, 大谷直矢, 赤外線応力分布計測に基づく ICR 処理による疲労き裂補修効果の検証, 土木学会第 69 回 年次学術講演会, 2014.9, 豊中市・大阪大学(発表予定)

稲川毅, 塩澤大輝, 山田大貴, 阪上隆英, 散逸エネルギーの位相情報を用いた疲労損傷評価, 日本材料学会第 63 期学術講演会, 2014.5.17, 福岡市・福岡大学

安村昂樹, 和泉遊以, 塩澤大輝, 阪上隆英, 熱弾性応力分布測定に基づく混合モード応力拡大係数評価, 日本機械学会関西支部 第 89 期定時総会講演会, 2014.3.19, 堺市・大阪府立大学

阪上隆英, 赤外線温度計測に基づく鋼橋梁の疲労き裂検出ならびに構造健全性評価手法の開発, 日本学術会議先端計測 2014, 2014.3.11, 東京都・日本学術会議

阪上隆英, 和泉遊以, 久保司郎, 赤外線サーモグラフィによる橋梁の非破壊評価, 日本非破壊検査協会赤外線サーモグラフィシンポジウム, 2014.1.17, 東京都・日本非破壊検査協会

稲川毅, 赤井淳嗣, 稲葉健, 塩澤大輝, 阪上隆英, 散逸エネルギー評価に基づく SUS316L 鋼表面改質材の疲労限度評価, 日本材料学会第 16 回破壊力学シンポジウム, 2013.11.22, 南阿蘇村・阿蘇ファームランド

和泉遊以, 田邊裕貴, 高松徹, 阪上隆英, Sonic-IR 法に基づく疲労き裂の検出・評価, 日本材料学会第 16 回破壊力学シンポジウム, 2013.11.22, 南阿蘇村・阿蘇ファームランド

稲川毅, 赤井淳嗣, 稲葉健, 塩澤大輝, 阪上隆英, SUS316L 鋼表面改質材の散逸エネルギー計測による疲労限度評価, 日本機械学会 M&M2013 材料力学カンファレンス, 2013.10.13, 岐阜市・岐阜大学

阪上隆英, 構造物トリアージを可能にする赤外線非破壊評価法, 社会インフラのメンテナンスを支える非破壊検査技術シンポジウム, 2013.9.30, 東京都・きゅりあん

Ken Inaba, Atsushi Akai, Daiki Shiozawa, Takahide Sakagami, Experimental study of relationship between energy dissipation and fatigue damage initiation based on observation of slip band by atomic force microscope, International Conference on Advanced Infrared Technology and Applications, 2013.9.12, Turin, Italy

和泉遊以, 阪上隆英, 河本恭平, 遠藤英樹, 松井繁之, 赤外線応力測定に基づく微細粒ペーストによる疲労亀裂進展抑制効果の検証, 土木学会第 68 回年次学術講演会, 2013.9.4, 習志野市・日本大学生産工学部

Ken Inaba, Atsushi Akai, Daiki Shiozawa, Takahide Sakagami, Fatigue limit estimation based on dissipated energy measurement for steel specimen with multiple notches, 13th International Symposium on Nondestructive Characterization of Materials, 2013.5.23, Le Mans, France

稲葉健, 赤井淳嗣, 塩澤大輝, 阪上隆英, AFM によるすべり帯観察に基づく散逸エネルギーの発生および疲労限度予測メカニズムに関する検討, 日本材料学会第 62 期学術講演会, 2013.5.18, 東京都・東京工業大学

阪上隆英, 特別講演 赤外線サーモグラフィ試験の土木構造物への適用に関する最近の話題, 土木学会第 2 回コンクリートの非破壊評価技術の信頼性向上に関するシンポジウム, 2012.11.15, 東京・土木学会

稲葉健, 赤井淳嗣, 塩澤大輝, 阪上隆英, 散逸エネルギー計測に基づく複数切欠き試験片に対する疲労限度予測, 日本機械学会 M&M2011 材料力学カンファレンス, 2012.9.24, 松山市・愛媛大学

和泉遊以, 武田南実, 高松徹, 田邊裕貴, 阪上隆英, 赤外線応力測定に基づく曲げ荷重を受けるき裂部材の応力拡大係数評価, 日本機械学会 M&M2011 材料力学カンファレンス, 2012.9.24, 松山市・愛媛大学

阪上隆英, 松岡洋平, 伊藤進一郎, 和泉遊以, 川端 淳, 自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィによる鋼橋梁の疲労き裂検出, 土木学会第 67 回年次学術講演会, 2012.9.5, 名古屋市・名古屋大学

阪上隆英, 松岡洋平, 和泉遊以, 伊藤進一郎, 川端淳, 赤外線熱弾性温度変動計測による鋼橋の疲労き裂近傍作用応力分布のその場評価, 日本材料学会第 61 期学術講演会, 2012.5.26, 岡山市・岡山大学

佐藤基洋, 和泉遊以, 阪上隆英, 久保司郎, 赤外線応力分布計測データに基づく応力拡大係数評価の高精度化, 日本機械学会関西支部 第 87 期定時総会講演会, 2012.3.17, 吹田市・関西大学

和泉遊以, 阪上隆英, 久保司郎, 赤外線応力測定に基づく鋼構造物の疲労き裂遠隔検出・定量評価法の開発, 日本材料学会第 15 回破壊力学シンポジウム, 2011.11.26, 石垣市・石垣市商工会館

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

阪上 隆英 (SAKAGAMI Takahide)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 50192589

(2) 研究分担者

久保 司郎 (KUBO Shiro)
摂南大学・理工学部・教授
研究者番号: 20107139

中井 善一 (NAKAI Yoshikazu)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 90155656

田川 哲哉 (TAGAWA Tetsuya)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 00216805

鎌田 敏郎 (KAMADA Toshirou)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 10224651

塩澤 大輝 (SHIOZAWA Daiki)
神戸大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 60379336

和泉 遊以 (IZUMI Yui)
滋賀県立大学・工学部・助教
研究者番号: 60610954

(3) 連携研究者

玉越 隆史 (TAMAKOSHI Takashi)
国土技術政策総合研究所道路研究部・室長
研究者番号: 90355983