

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 4 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289009

研究課題名(和文) 散逸エネルギー計測に基づく疲労き裂発生予知保全スキームの構築

研究課題名(英文) Development of predictive maintenance scheme for fatigue cracks based on dissipated energy measurement

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) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：構造部材を対象に実働力学状態の実測結果をもとに、疲労き裂の発生・進展を評価する予知保全スキームの開発について検討した。散逸エネルギーに基づく疲労き裂発生予知の学術的基盤となる疲労損傷過程での散逸エネルギー放出メカニズムの解明を行った。また、き裂発生後重要となる、き裂先端近傍の熱弾性応力分布計測に基づくき裂進展評価、き裂進展抑制対策後の応力軽減、き裂進展抑制効果の実証を行った。

研究成果の概要(英文)：Development of the predictive maintenance scheme was investigated for structural integrity assessment, in which fatigue crack initiation and propagation in the structural members were evaluated from in-situ measurement results of the actually applied stress distribution and the dissipated energy emission. Scientific interpretation of the prediction of fatigue crack initiation and the estimation of fatigue limit was studied by investigating the mechanism of energy dissipation during fatigue damage evolution process. Further the thermoelastic stress analyses was applied for on-site measurement of stress distributions around fatigue cracks, and the future crack propagation behavior was estimated by the fracture mechanics approach. The technique was applied to estimate fatigue crack propagation rate and to evaluate the effectiveness of repair or reinforcement for defective portions in steel structures.

研究分野：実験力学

キーワード：機械材料・材料力学 熱弾性応力計測 散逸エネルギー 疲労き裂 非破壊評価 破壊力学 赤外線計測

1. 研究開始当初の背景

材料・構造の疲労破壊に対する安全性確保は、二つの重要な局面に立たされている。すなわち、新しく開発される製品においては、国際競争力を堅持すべくより高いレベルでの安全性が要求され、一方では老朽化した構造物が急増する中、これらを適切に維持保全することが急務となっている。疲労や破壊力学に関する学術研究、定量的非破壊試験法の開発については、これまでに国内・外で積極的に研究が推進され一定の成果を収めてきた。しかしながら、実機を対象に実働力学状態を評価し、実測物理量による力学的根拠に基づき疲労き裂の発生・進展を的確に評価するスキームについては未だ有効なものがない。このような背景の下で、研究代表者らは、赤外線カメラによる熱弾性応力計測、および変動負荷下で材料の局所的すべり等に起因して放出される熱エネルギーである散逸エネルギーの計測に基づく、新たな非破壊評価法の開発を行うとともに、実働荷重負荷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・進展評価を通じた、構造物の健全性評価スキームの開発に取り組んできた。

2. 研究の目的

本研究では、実機の実働状態における散逸エネルギーの計測結果に基づき、疲労き裂の発生を予知評価できる非破壊評価手法を構築し、これまでから検討を行ってきた疲労き裂発生後の実働応力場に基づく疲労き裂進展評価とシームレスに連携させることにより、疲労損傷の起点となる材料欠陥評価、疲労き裂発生評価から疲労き裂進展評価、さらには疲労き裂進展抑制補修とその効果検証に至る、構造物のライフサイクルを通して、より高度な次元での実機の構造健全性トリアージを可能にする戦略的予防保全スキームを完成させることを目標とした。

3. 研究の方法

鋼構造物のライフサイクルにおける疲労損傷過程と、各段階における赤外線非破壊評価法の適用を図1に示す。本研究課題では、散逸エネルギーに基づく疲労き裂発生予知保全、ならびに疲労き裂発生後の疲労き裂進展性評価およびき裂進展抑制対策効果の検証を以下の方法により取り組んだ。

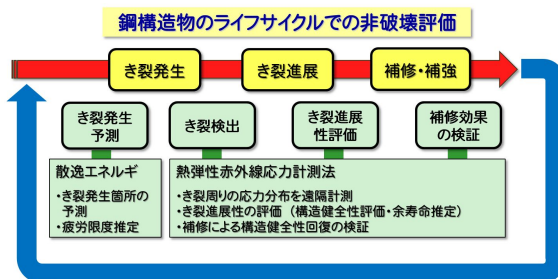


図1 鋼構造物のライフサイクル非破壊評価

まず、散逸エネルギーに基づく疲労き裂発生予知保全については、の基盤となる散逸エネルギー放出メカニズムに関する学術的検討を重点課題とし、実験室レベルでの実験的検討を行った。種々の表面処理を施した材料に対して散逸エネルギー測定を行い、散逸エネルギー放出メカニズムの検討を行うとともに、表面処理や溶接など実用部材に適用される加工を施した場合に対する本手法の有効性について検討を行った。

次に、疲労き裂発生後の疲労き裂進展性評価においては、溶接構造試験体を用いた疲労き裂進展試験を行い、き裂先端近傍で計測された応力分布およびこれをもとに算出される応力拡大係数と、き裂進展速度との関係について、詳細な実験的検討を行った。さらに、き裂進展抑制対策効果の検証においては、き裂進展抑制対策補修の前後におけるき裂周りの応力分布の熱弾性計測結果から応力拡大係数を求め、これをもとにき裂進展対策補修による応力低減、応力拡大係数範囲の低減が確実に行われたかについて検証した。

4. 研究成果

4.1 散逸エネルギー計測に基づく表面処理材および溶接部の疲労限度評価

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。本手法は、応力振幅を階段状に増加させる試験（階段状応力増加試験）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するという手法である。本研究組織では、散逸エネルギー発生メカニズムおよび疲労限度推定の科学的根拠の究明を行ってきた。本研究課題では、種々の表面処理を施した材料に対して散逸エネルギー測定を行い、散逸エネルギー放出メカニズムの検討を行うとともに、表面処理や溶接など実用部材に適用される加工を施した場合に対する本手法の有効性について検討を行った。

まず、キャピテーションピーニング (CSP) を施した材料について実験を行った。CSP処理は、同じ表面処理手法である shot peening 処理と比較して処理により形成される表面の粗さの大きさが小さく、加工前後で形状や寸法の変化が少ないことが特徴である。CSP処理材のSN曲線およびCSP処理材に対して散逸エネルギー測定を行った結果を図2および3にそれぞれ示す。CSP1 およびCSP8の数字部分はCSP処理の回数を表している。

図2より、CSP処理を多く行うほど疲労限度が上昇していることが分かる。さらに、図3より、ある応力振幅を境に、応力が大きくなるほど散逸エネルギーが大きくなっており、CSP処理の回数が大きくなるほど、散逸エネルギーが急増する応力振幅は大きくなっていることがわかる。散逸エネルギーが上昇を開始する応力振幅はSN曲線から得られる疲労限度に近い値を示したことから、CSP処理の疲労強度に対する効果を散逸エネルギーに基づ

き評価できることが分かった。

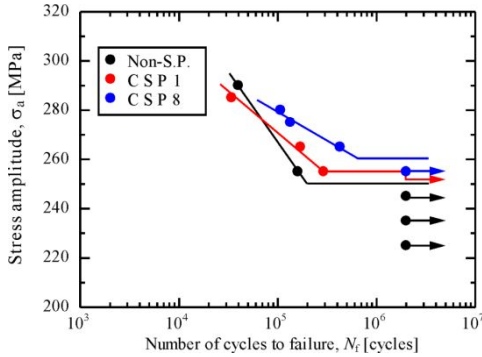


図2 S-N 曲線 (CSP 処理)

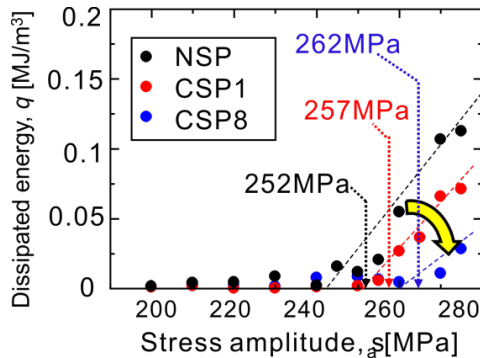
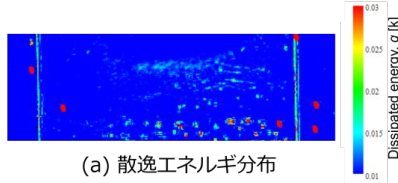
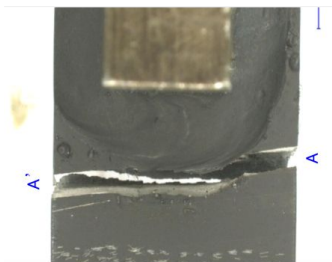


図3 散逸エネルギーと応力振幅の関係 (CSP 処理: CSP, 受入材: NSP)



(a) 散逸エネルギー分布



(b) ガゼット溶接試験片 (破断後止端部周囲の写真)

図4 ガゼット溶接部における散逸エネルギー分布および破断試験片写真

さらにガゼット溶接を施した部材に対して本手法を適用した。ガゼット溶接部の散逸エネルギー分布を図4に示す。図4よりガゼット溶接止端部において高い散逸エネルギーが現れていることが分かる。その後一定応力振幅で疲労試験を行った結果、この散逸エネルギーが高い箇所からき裂が発生し破断した。また階段状応力増加試験において、高い応力振幅を負荷したときに散逸エネルギーが高い箇所について、全ての応力振幅で散逸エネルギー変化を整理し直すと、散逸エネルギー変化の急増点が明瞭に現れており、疲労限度と良い一致を示した。ビードオンプレート溶接部に対

しても同様に散逸エネルギーに基づき疲労限度が推定できることが明らかとなった。

さらに散逸エネルギーに起因した位相情報を調べた。評価領域内の各観測点における温度変動から算出した散逸エネルギー成分と熱弾性温度変動と散逸エネルギーに起因した温度変動の位相差の関係を図5に示す。図には階段状応力増加試験における各応力振幅での散逸エネルギーとその位相の計測結果を示している。応力振幅が大きく、大きな散逸エネルギーが計測される場合には位相差はある特定の値を示していることが分かる。これはすべりなどの不可逆的な微視構造変化に起因して散逸エネルギーが発生しており、正弦波状に変動する変動荷重に対して特定のタイミングで構造変化が生じていることを示しているものと考えられる。この散逸エネルギーの位相差を利用して、特定の位相の温度変動のみを取り出すフィルタリングが可能であることを明らかにした。

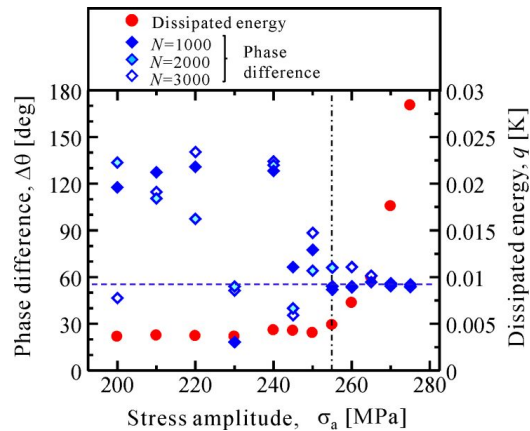


図5 応力振幅に対する散逸エネルギーおよび散逸エネルギーの位相の変化

【関連する成果発表：雑誌論文
研究発表】

4.2 熱弾性応力変動計測による疲労き裂の進展性評価

図6に示すような、橋梁の垂直補剛材をモデル化した試験体に対し板曲げ振動疲労試験を行い、発生した疲労き裂を対象として、実働応力計測結果に基づき算出した応力拡大係数と疲労き裂の進展性との関係を求めることで、疲労き裂の進展予測の可能性について検討した。

初期応力範囲 60, 80, 100, 120MPa の各条件で行った試験結果として、応力拡大係数範囲とき裂進展速度の関係を図7に示す。図中には Paris 則を示す直線を併記している。図から分かるように、熱弾性応力計測結果から算出した応力拡大係数範囲とき裂進展速度の間には、Paris 則と一致する良好な関係が得られ、本試験体が有する3次元き裂に対するき裂進展性評価が可能であることが分かった。実橋梁に対して本手法を適用した場合、今後予測されるき裂進展量を推測することができるものと考えられる。

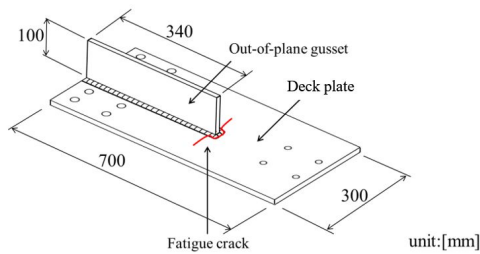


図 6 溶接構造試験体

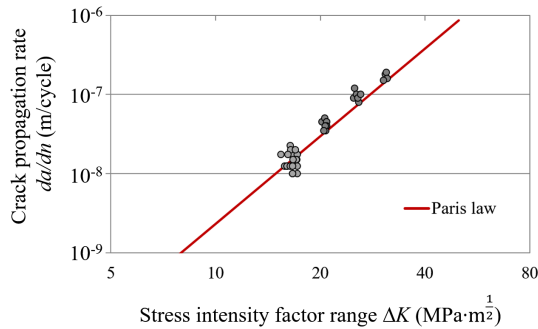


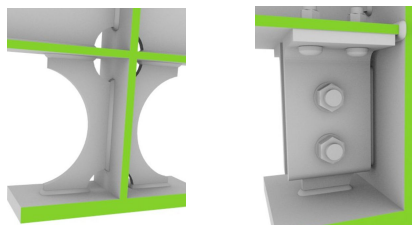
図 7 実働応力分布から算出した応力拡大係数範囲とき裂進展速度の関係

【関連する成果発表：雑誌論文
，研究発表⑨⑭⑰⑳㉑】

4.3 き裂進展抑制対策とその効果の検証

構造物の安全性維持のためには、構造健全性評価と適切な補修が必要である。補修後には補修による応力低減効果、き裂再発生の可能性を検証することが重要となるが、ひずみゲージ等による従来の計測法では十分な検証ができない。そこで、本研究課題では熱弾性応力分布計測により、補修による応力低減効果を検証した。

鋼橋梁の縦桁-横桁交差部の補剛材に発生した疲労き裂を対象として、疲労き裂の補修を行った前後に熱弾性応力測定を行った。検証対象は、図 8 に示すような、半円切欠き補修と当て板補修とした。

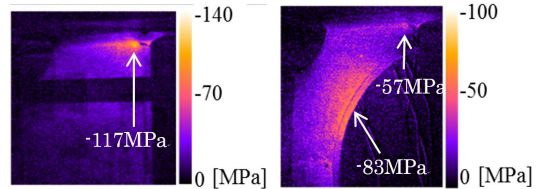


(a)半円切欠き (b)当て板
図 8 補修方法

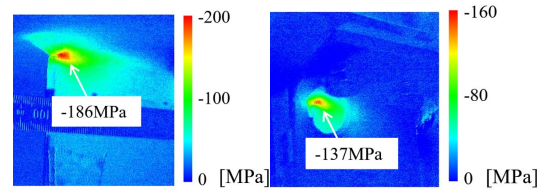
半円切欠き補修前後の応力分布画像を図 9 に示す。図 9(a)では、溶接部の疲労き裂先端に応力集中が見られるが、図 9(b)では切欠き R 部に応力が集中している。また、き裂先端近傍の応力変動値は、切欠き補修後に約 50% 程度に低減した。疲労強度等級が低い溶接部から、等級の高い鋼材母材部に応力集中部を移すことにより、溶接部での疲労き裂の再発

生を防ぐ補修が的確に施されたことが検証できた。

次に、当て板補修前後の応力分布画像を図 10 に示す。図より、き裂先端での応力集中は補修後にも見られるものの、作用応力は減少していることがわかる。応力の減少率は 25~30% 程度であり、当て板補修の効果が確認できた。



(a)補修前 (b)補修後
図 9 半円切欠き補修前後の応力分布



(a)補修前 (b)補修後
図 10 当て板補修前後の応力分布

【関連する成果発表：雑誌論文
，研究発表
】

4.4 熱弾性温度変動の位相解析に基づく短繊維 CFRP の損傷評価

短繊維 CFRP に対して熱弾性応力計測を行い、熱弾性温度変動および負荷応力と熱弾性温度変動の位相差について調査し、これらのパラメータに基づいた疲労損傷評価の可能性について検討した。特に、CFRP では、負荷を炭素繊維が主に負担する場合に荷重信号と同位相の熱弾性温度変動が現れ、負荷をマトリックスが主に負担する場合に逆位相の熱弾性温度変動が現れることを利用し、位相差の変化を用いた CFRP 内部の疲労損傷評価法として、熱弾性位相差損傷解析 (TPDA) を提案した。

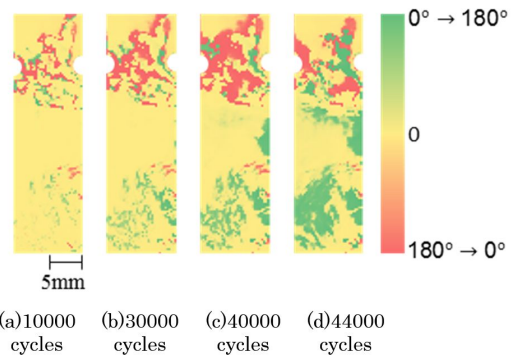


図 11 熱弾性位相差損傷解析結果

母材にビニルエステル樹脂、強化材に長さ 25.4mm の炭素繊維を用いた短繊維 CFRP に対して疲労試験を行った。ある繰返し数における位相分布を基準に、評価する繰返し数に

おける位相分布との差分を画像化することで、損傷の発生および進展を評価した。200 サイクル時点の位相分布を基準とした熱弾性位相差損傷解析結果を図 11 に示す。破断が生じた箇所において、位相が 0° から 180° に変化した領域が繰返し数とともに広がっていく様子が現れ、位相差を用いることにより、内部での損傷発生を検出できる可能性が示された。

【関連する成果発表：雑誌論文，研究発表】

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 24 件)

Takahide Sakagami, Yoshiaki Mizokami, Daiki Shiozawa, Yui Izumi, Akira Moriyama, TSA based evaluation of fatigue crack propagation in steel bridge members, ICSI 2017, Structural Integrity Procedia(査読有), 2017 (掲載可)

Yui Izumi, Koki Uenishi, Yoshiaki Mizokami Akira Moriyama, Takahide Sakagami, Detection of back-surface crack based on temperature gap measurement, ICSI 2017, Structural Integrity Procedia(査読有), 2017 (掲載可)

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), 2017, (Web 掲載済)
<https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.05.024>

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, Proc. of SPIE(査読有), Vol. 10214, 2017, 102140M-1 – M-6,
<http://dx.doi.org/10.1117/12.2262972>

Atsushi Akai, Daiki Shiozawa, Takahide Sakagami, Fatigue limit estimation of titanium alloy Ti-6Al-4V with infrared thermography, Proc. of SPIE(査読有), Vol. 10214, 2017, 102140 J-1 – J-11, <http://dx.doi.org/10.1117/12.2263843>

Daiki Shiozawa, Takeshi Inagawa, Takaya Washio, Takahide Sakagami, Accuracy improvement in dissipated energy measurement by using phase information, Measurement Science and Technology(査読有), 28, 2017, 044004 (6pp),
doi:10.1088/1361-6501/28/4/044004

水野浩,和泉遊以,中野好祐,阪上隆英,松井繁之, 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疲労損傷の検出および評価に関する研究,土木学会論文集A1(構造地震工学)(査読有), Vol.72, pp.338-349, 2016 ,
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscejsee/72/2/72_338/_article/-char/ja/

Daiki Shiozawa, Tsuyoshi Inagawa, Takaya

Washio, Takahide Sakagami, Fatigue limit estimation of stainless steels with new dissipated energy data analysis, Procedia Structural Integrity (査読有), Vol.2, pp.2091-2096, 2016,
<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.262>

Takahide Sakagami, Yui Izumi, Daiki Shiozawa, Taisei Fujimoto, Yoshiaki Mizokami, Taku Hanai, Nondestructive evaluation of fatigue cracks in steel bridges based on thermoelastic stress measurement, Procedia Structural Integrity (査読有), Vol.2, pp.2132- 2139, 2016,
<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.267>

溝上善昭,小林義弘,和泉遊以,阪上隆英,赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ検知による鋼床版デッキプレートリブ間の溶接部に生じる疲労亀裂の遠隔検出, JSSC 鋼構造論文集(査読有),Vol.22, pp.47-56, 2015 ,
http://doi.org/10.11273/jssc.22.87_47

Daiki Shiozawa, Tsuyoshi Inagawa, Takaya Washio, Takahide Sakagami, Hitoshi Soyama, Fatigue strength evaluation based on dissipated energy measurement for cavitation peening material, Proceedings of ICFD2015(査読有), pp.644-645, 2015

赤井淳嗣,稲葉健,塩澤大輝,阪上隆英,散逸エネルギー計測に基づく疲労き裂発生位置の推定,材料(査読有),Vol.64, No.8, pp.668-674, 2015, <http://doi.org/10.2472/jsms.64.668>

Takahide Sakagami, Remote nondestructive evaluation technique using infrared thermography for fatigue cracks in steel bridges, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures (査読有), Volume 38, Issue 7, pp.755-779, 2015, DOI: 10.1111/ffe.12302

稲川毅,塩澤大輝,赤井淳嗣,稲葉健,阪上隆英,散逸エネルギー評価に基づく SUS316L 鋼ショットピーニング処理材の疲労限度推定,材料(査読有), Vol.63, No.12, pp.850-856, 2014,
<http://doi.org/10.2472/jsms.63.850>

〔学会発表〕(計 87 件)

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, 2017.5.28,名城大学(名古屋市)

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,2017.5.28,名城大学(名古屋市)

溝上善昭,花井拓,阪上隆英,竹内優人,和泉遊以,走査加熱を用いたコンクリート構造物のアクティブサーモグラフィ非破壊試験,日本材料学会第 16 回コンクリート構造物の補修,補強,アップグレードシンポジウム,2016.10.13,京都テルサ(京都市)

東智之,藤本泰成,阪上隆英,塩澤大輝,溝上善昭,花井拓,森山 彰,熱弾性応力測定法による鋼構造溶接部の疲労き裂補修効果の検証,日本機械学会 M&M2016 材料力学カンフ

アレンス,2016.10.9,神戸大学(神戸市)

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 材料力学カンファレンス, 2016.10.9,神戸大学(神戸市)

中村優,玉城宇達,塩澤大輝,阪上隆英,澤田栄嗣,野中眞一,濱田健一,短繊維 CFRP における熱弾性温度変動の位相情報を用いた損傷評価,日本機械学会 M&M2016 材料力学カンファレンス,2016.10.9,神戸大学(神戸市)

Taku Hanai, Yoshiaki Mizokami, Takahide Sakagami, Daiki Shiozawa, Tomoyuki Higashi, Yui Izumi, Verification of repair method for fatigue cracks in vertical stiffener at support of steel deck, Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength 2016, 2016.9.21, Toyama, Japan

中山和真,越野勝,花井拓,阪上隆英,塩澤大輝,和泉遊以,鋼床版支点部補剛材に生じた亀裂の補修,土木学会第 71 回年次学術講演会,2016.9.9,東北大学(仙台市)

藤本泰成,溝上善昭,花井拓,阪上隆英,塩澤大輝,東智之,和泉遊以,熱弾性応力測定による鋼構造の疲労き裂補修対策実施効果の検証,土木学会第 71 回年次学術講演会,2016.9.9,東北大学(仙台市)

中村優,玉城宇達,塩澤大輝,阪上隆英,澤田栄嗣,野中眞一,濱田健一,熱弾性温度変動の位相解析に基づく短繊維 CFRP における繊維配向性の評価,日本材料学会第 65 期学術講演会,2016.5.28,富山大学(富山市)

玉城宇達,中村優,塩澤大輝,阪上隆英,澤田栄嗣,野中眞一,濱田健一,高分子系複合材料の赤外線計測に基づく疲労損傷評価,日本機械学会 関西支部第 91 期定時総会講演会,2016.3.12,大阪電気通信大学(寝屋川市)

Daiki Shiozawa, Tsuyoshi Inagawa, Takaya Washio, Takahide Sakagami, Fatigue limit estimation based on dissipated energy for pre-stained materials, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics, 2015.10.5, Toyohashi, Japan

Daiki Shiozawa, Tsuyoshi Inagawa, Atsushi Akai, Takahide Sakagami, Accuracy improvement of dissipated energy measurement and fatigue limit estimation by using phase information, Advanced Infrared Technology and Applications, 2015.9.30, Area della Ricerca CNR, Pisa, Italy

藤本泰成,藤城忠朗,和泉遊以,大谷直矢,小林義弘,阪上隆英,熱弾性応力計測に基づく鋼構造のき裂進展性評価,土木学会第 70 回年次学術講演会,2015.9.18,岡山大学(岡山市)

塩澤大輝,稲川毅,阪上隆英,位相ロックイン法を用いた散逸エネルギー測定の改善,日本材料学会第 64 期学術講演会,2015.5.24,山形大学(米沢市)

鷲尾貴哉,塩澤大輝,稲川毅,阪上隆英,散逸エネルギー測定による SUS316L 鋼予ひずみ材の疲労強度評価,日本材料学会第 64 期学術

講演会,2015.5.24,山形大学(米沢市)

Daiki Shiozawa, Tsuyoshi Inagawa, Atsushi Akai, Takahide Sakagami, Accuracy improvement of fatigue damage evaluation based on phase analysis of dissipated energy, 12th International Conference on the Mechanical Behavior of Materials, 2015.5.13, Conference Center, Karlsruhe, Germany

稲川毅,鷲尾貴哉,塩澤大輝,阪上隆英,祖山均,散逸エネルギー計測に基づくキャピテーション材の疲労限度予測,日本機械学会関西支部第 90 期定時総会講演会,2015.3.16,京都大学(京都市)

Takahide Sakagami, Nondestructive evaluation techniques based on inverse analyses of temperature distribution data measured by infrared thermography, International Conference on Inverse Problems and Related Topics, 2014.12.18, National Taiwan University, Taipei, Taiwan ROC

Yui Izumi, Takahide Sakagami, Koki Yasumura, Daiki Shiozawa, A new approach for evaluating stress intensity factor based on thermoelastic stress analysis, Asian-Pacific Conference on Fracture & Strength, International Conference on Structural Integrity and Failure, 2014.12.10, University of Sydney, Sydney, Australia

②飯野恵斗,阪上隆英,塩澤大輝,逆問題解析を援用したコーティング下の応力測定,日本機械学会第 27 回計算力学講演会,2014.11.22,岩手大学(盛岡市)

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：5 0 1 9 2 5 8 9

(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：2 0 1 0 7 1 3 9
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：6 0 3 7 9 3 3 6
和泉 遊以 (IZUMI Yui)
滋賀県立大学・工学部・助教
研究者番号：6 0 6 1 0 9 5 4
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：9 0 1 5 5 6 5 6
祖山 均 (SOYAMA Hitoshi)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：9 0 2 1 1 9 9 5

(3)連携研究者 なし

(4)研究協力者

弓立恭彦 (YUDATE Yukihiko)
DIC 株式会社