

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360391

研究課題名(和文) 力学的環境に結晶組織の影響を考慮した構造物の疲労寿命の革新的向上に関する研究

研究課題名(英文) Evaluation of crack propagation characteristics in consideration of the mechanical environment and the crystal structure of the fatigue crack tip

研究代表者

勝田 順一 (KATSUTA, Junichi)

長崎大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20161078

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円、(間接経費) 4,350,000円

研究成果の概要(和文)：現在、力学環境のみで評価されている疲労亀裂伝播の領域を、結晶組織の影響も考慮した評価方法を検討して、構造物の疲労寿命推定の高精度化や、耐疲労亀裂伝播鋼の開発するための基礎的研究である。なお、研究の特徴は、一般的疲労試験条件で撮影した画像を処理して、伝播挙動への影響を直接分析することである。得られた成果は、疲労亀裂伝播中の動画を高速、高倍率で撮影し、この動画をPIV法を用いて亀裂先端近傍の変形のみを抽出して、亀裂先端の変形動画を作成すること、この画像を処理して、再引張り塑性域や再圧縮塑性域を算出することに、ほぼ成功し、疲労亀裂伝播経路と結晶組織の関係を3次元的に明らかにできたことである。

研究成果の概要(英文)：This research has examined the evaluation method that considered the influence of the crystalline structures to the fatigue crack propagation evaluated only in mechanical environment. A purpose of the studies is to get the basics that a highly precise estimate method of fatigue life of the steel structures and the steel which the fatigue crack propagation improved develops. The obtained results are clarification of the deformation at the fatigue crack tip using a high speed and large magnification video during the fatigue crack propagation test by the PIV method, calculation of the re-compressive plastic zone at the fatigue crack tip using the obtained deformation of the crack tip, and elucidation of the three-dimensional relation of the crystalline structures and the fatigue crack route.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・船舶海洋工学

キーワード：亀裂伝播 疲労亀裂 結晶組織 力学的環境 画像処理

### 1. 研究開始当初の背景

最近、船舶をはじめ、橋梁、建築鉄骨、自動車などに高強度鋼材を用いようとする傾向がある。これは、時間や費用が必要な塑性数値計算を避けて、手軽な弾性設計をしたいとの思惑があるものと考えられる。また、製鉄所側にも材料の高強度化を目指す傾向があり、大規模な研究プロジェクトも立ち上げられているようである。

構造物に高強度鋼を適用して弾性設計を行った場合、設計応力範囲内で生じる可能性のある破壊は、疲労破壊と脆性破壊である。近年の高度に品質管理されている材料や溶接部で、いきなり脆性破壊が発生する可能性は極めて低い。したがって、残された初期の損傷・破壊が発生する可能性は、疲労破壊のみである。

従来、疲労強度を結晶制御で向上させることは困難であるとされてきたが、近年、結晶組織を制御して疲労強度を向上させた鋼材が開発され、船舶や橋梁のいくつかの構造物に使用されるようになった。

現在、疲労強度に対する教科書的基本認識は、表面からの疲労亀裂発生には、結晶組織の影響が大きく、疲労亀裂が安定的に進展する段階では、力学的環境が主体であるとされている。しかし、近年、開発された耐疲労鋼で評価された疲労亀裂伝播は、力学的環境が主体とされている安定的疲労亀裂伝播領域で効果があり、今までの一般的な認識とは異なっている。

さらに、申請者が H20 年度～H22 年度まで受けた科学研究費補助金による研究成果においても、圧縮塑性変形を受けた後に引張り塑性変形能が減少し、これが繰返されるとさらに引張り塑性変形能が減少することが明らかとなった。この引張り変形能の変化を限界値にすると、疲労亀裂伝播の加速・減速・停留現象をシミュレート可能であることも明らかとなった。また、現在の設計規則で使用することが推奨されている線形累積被害則では、荷重振幅の変動や付加順序が異なるだけの場合に複雑に疲労寿命が変化するような、自然界における鋼構造物の疲労寿命を精度よく推定することは困難である。

疲労強度の正確な把握は益々重要になっており、しかも、現在の力学的環境を考慮する評価方法だけでは不十分であり、材料の結晶学的特性と力学的特性を同時に評価して、疲労破壊を防ぐ必要がある。

### 2. 研究の目的

現在、力学的環境のみで評価されている疲労強度や疲労亀裂伝播速度を、金属結晶学的な視点からの影響も加味した評価方法を確立して、構造物の疲労寿命推定の高精度化や、高疲労強度・耐疲労亀裂伝播鋼の開発に貢献するための基礎的研究である。なお、本研究の特徴は、従来の疲労試験環境（大気中、載荷速度 10Hz）で、高倍率、高速撮影した画

像を画像処理して、伝播挙動の影響要因を直接分析するところにある。

### 3. 研究の方法

まず、結晶寸法を変えた 3 種類の鋼板と、結晶集合組織の割合を変えた 3 種類の鋼板を用いて、板厚方向や板幅方向への疲労亀裂伝播試験を行い、疲労亀裂の伝播経路と結晶組織の関係を明らかにした。この伝播試験は、力学的環境が支配的であるといわれている、安定的疲労亀裂伝播領域で行った。

つぎに、この疲労亀裂伝播試験において、疲労亀裂先端近傍のヒステリシスループの計測、高速カメラによる撮影と、PIV による画像処理によって、疲労亀裂先端近傍の圧縮塑性変形域と引張り塑性変形域の変化から、伝播が減速する場合を含めた疲労亀裂伝播の評価方法を構築する。

今回の研究に使用した鋼材は、昨年度工学部萌芽研究経費でも購入した、同じ化学成分で、結晶粒径が異なる鋼材 3 種類、集合組織の割合が異なる鋼材 3 種類の合計 5 種類の鋼材（1 種類の鋼材は結晶粒径変化、集合組織変化共通）を使用した。

研究代表者は、疲労亀裂先端のヒステリシスループを計測するためのシステムを構築し、いくつかの金属材料や試験片タイプが異なる試験を実施してきた。しかし、試験機が 200kN と中規模の疲労試験機であること、学科共有の設備であることから、鋼材の結晶の影響を調査するための十分な精度を確保・維持できないという問題が生じていた。

そこで、本研究の初年度においては、50kN と小型の疲労試験機を購入して、まず、既存の疲労試験機で計測可能な疲労亀裂先端のヒステリシスループを計測するためのデジタル型動ひずみ測定器を用いた計測システムや、試験用の治具を作成して、疲労亀裂先端のヒステリシスループ計測の確認を行った。

現有のマイクロSCOPEは、100 倍～1000 倍のズームレンズを装着してあるが、レンズ本体の移動によってピントを合わせる必要があり、しかも倍率を高くすると亀裂先端が視野からはみ出してしまっていた。また、試験片面外の“ゆれ”が生じて、高倍率での画像が取得できなかった。そこで、現有のズームレンズ先端に二重式の治具部品を装着し、この部分でピント調整を可能とし、二重式の治具を試験片表面に軽く押し当てることで、載荷による試験片の変動とレンズ先端の動きを可能な限り一致させることで、亀裂先端を視野の中に収めることとした。

このようにして取得した疲労亀裂伝播中の画像より、PIV 法によって求めた、疲労亀裂先端近傍の変位ベクトルを求めた。PIV 法によって疲労亀裂先端近傍の変位ベクトルを求めるまでは、旧疲労試験機と計測システムで撮影した画像でも処理可能であったが、新疲労試験機と計測システムで撮影した画

像でも処理が可能となり、さらに従来よりも高倍率でも撮影を可能とした。

2年度には、初年度に購入した小型疲労試験機に取り付け可能な油圧つかみ具と、大量になる計測結果の高速通信が可能なひずみ計測器を購入して、結晶粒寸法の異なる鋼材試験片について、3年度には、集合組織の割合を変えた鋼材試験片について、疲労亀裂伝播試験を実施した。しかし、油圧チャックで挟んだ試験片が精度よく軸引張り荷重を載荷しているにもかかわらず、面外の揺れが画像処理に影響がないほど減少させることができず、既存の動き解析マイクロ스코プの照度や解像度の問題もあって、300倍での疲労亀裂先端の撮影を実施した。

2年度には、力学的環境主体とされている疲労亀裂伝播経路を対象にして、疲労亀裂と寸法の異なる結晶組織の関係を明らかにした。結晶粒が粗大な鋼材の場合には疲労亀裂が大きく屈曲することを確認した。さらに、疲労亀裂を伝播させた試験片を0.01mmごとに研磨、エッチング、静止画像を撮影して、0.5mm分の3次元画像を作成した。なお、疲労亀裂は、鋼板板厚方向と圧延直角方向に伝播する場合について実施した。

3年度には、力学的環境主体とされている疲労亀裂伝播経路を対象にして、疲労亀裂と集合組織の割合が異なる結晶組織の関係を明らかにした。集合組織の割合が多い場合には疲労亀裂先端が屈曲したり分岐したりすることが確認した。さらに、疲労亀裂を伝播させた試験片を0.01mmごとに研磨、エッチング、静止画像を撮影して、0.5mm分の3次元画像を作成した。なお、疲労亀裂は、鋼板板厚方向と圧延直角方向に伝播する場合について実施した。

豊貞九州大学名誉教授が開発したFLARPシミュレーションでは、亀裂先端の繰返し塑性変形の大きさを考慮しており、疲労亀裂の遅延現象もシミュレート可能なことが報告されている。この場合、亀裂先端の塑性変形の考慮を亀裂先端に貼付したゲージ長2mmのひずみゲージによるヒステリシスループから求めたRPG荷重を使用するため、ひずみゲージで計測する領域が結晶組織に比べて広すぎるため、それぞれの組織の影響を分離して観察することは困難であった。このように、結晶粒や集合組織の疲労亀裂伝播への影響を考慮するためには、疲労亀裂先端近傍のより小さな領域の挙動を把握し、分析する必要があると考えられる。

そこで、本研究では、現有の高速動き解析マイクロ스코プで高倍率の画像を撮影し、この画像にPIV法を適用して、画像処理することにより、疲労亀裂先端近傍の変形挙動を直接把握した。今回、試験片全体の変形を亀裂近傍のみの変形を抽出して表示可能とした。さらに、疲労亀裂開口部の空間変形は無視して、亀裂周りの物体が存在する箇所のみの変形を表示するようにするなどの分析結

果の高精度化を行った。動画を処理するために、これらの変形を繰返し荷重のいずれの時点でも処理することが可能となった。

得られた亀裂近傍の変位ベクトルの動画から、載荷側、除荷側の変形量を積算することによって亀裂先端周りの変形をひずみに換算して、さらに、それぞれの弾性成分を減ずることによって、再引張り塑性域と再圧縮塑性域を表示可能とした。このことで、豊貞らが開発したFLARPシミュレーション解析法にて、疲労亀裂伝播の状況を合理的に表すパラメータである再圧縮塑性域寸法を、数値解析ではなく、また、RPG荷重のような置き換えたパラメータでなく、実際の疲労亀裂先端の挙動から求めることが可能となった。ただし、PIV法で動画を処理して亀裂先端近傍の変位ベクトルの変化を求めるまでは、自動処理することができるようになったが、その後の再圧縮塑性域寸法を求めることは、手作業で行っており、効率化する必要がある。さらに、全ての動画の処理で明確な結果が得られるだけでなく、撮影する動画の高精度化、高解像度化を図る必要がある。

#### 4. 研究成果

本研究で導入した50kN小型疲労試験機を図1に、この疲労試験機と計測システムで計測された、疲労亀裂先端近傍のヒステリシスループを図2に示す。



図1 50kN小型疲労試験機

なお、図2に示した疲労亀裂先端近傍のヒステリシスループは、試験片幅150mmの大型CT試験片を用い、このタイプの試験片に使用していた既存の治具にと新設した新小型疲労試験機を接続する治具を組み合わせで計測したものである。この図から、新疲労試験機でも、精度よく、疲労亀裂先端の変形状況を計測することができるシステムを構築できたことがわかる。

本研究も主目的である疲労亀裂伝播に及ぼす結晶組織の影響については、供試鋼板の寸法の問題から、開放型油圧チャックを用い

て、それぞれの鋼板板厚を試験片幅とする片側切欠き付小型試験片（疲労亀裂が鋼板板厚方向に伝播する場合）を用いることとした。また、疲労亀裂が圧延直角方向に伝播する場合にも、同じ試験片寸法とした。

疲労亀裂伝播試験中の疲労亀裂長さは、亀裂先端の変形挙動を撮影する動き解析マイクロ스코プの距離計測システムを用いて、計測した。

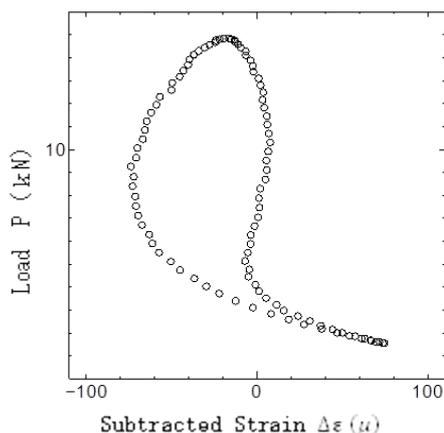


図2 疲労亀裂先端近傍のヒステリシスループの一例

供試鋼板のうち、結晶組織の寸法を変化させた3種類を用いて、疲労亀裂伝播試験を実施した。これらの試験片は、疲労亀裂がそれぞれの鋼板板厚方向に伝播するように切り出したものである。なお、载荷した荷重範囲は、供試鋼板の降伏応力が異なるため、载荷した荷重範囲と降伏応力の比が同じになるようにしてある。図3に、試験結果を疲労亀裂長さとし繰り返し回数の関係で示してある。この図から、結晶組織寸法が大きいほど、伝播寿命が長くなっていることがわかる。

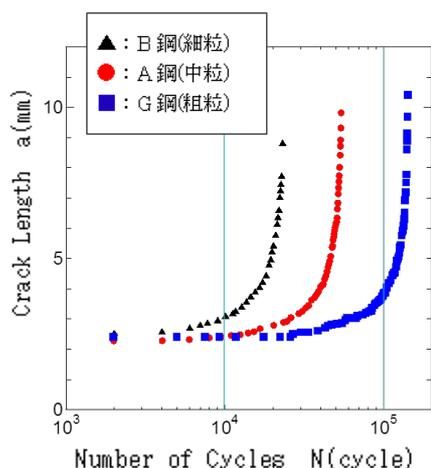


図3 疲労亀裂長さと繰り返し回数の関係（結晶組織寸法の影響、板厚方向）

以上の試験中に、動き解析マイクロ스코プを用いて、伝播中の疲労亀裂先端を撮影した。撮影条件は250fps、撮影倍率は、300倍

である。その一例を、図5に示す。なお、試験片表面は、疲労亀裂と組織の関係を明らかにするために、10%硝酸アルコールでエッチングしてある。

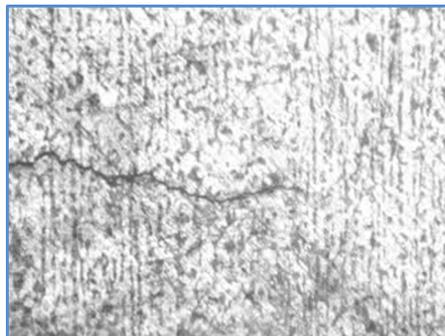


図5 伝播中の疲労亀裂先端の画像の一例

動画を自作したPIV法のプログラムによって、亀裂近傍の変形を逐次ベクトル表示可能とした。一例を、図6に示す。なお、この図は、最小荷重近傍の亀裂先端が閉口して圧縮変形が発生している状況である。

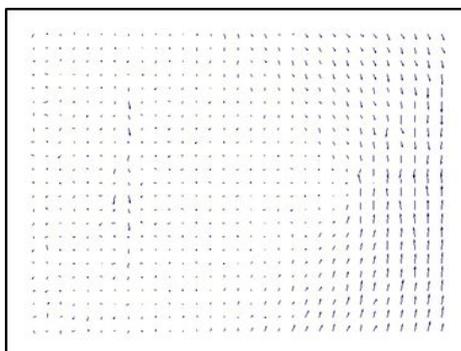


図6 PIV法によって求めた疲労亀裂先端近傍の変位ベクトルの一例

本PIV法による動画処理においては、試験片全体の変形を減じて、注目する亀裂近傍の変形のみを表示できること、亀裂の開口部は物体が存在しないため、処理の段階で変形を無視できること、という特徴がある。図7に、試験片全体の変形を減じない場合と、亀裂近傍の変形のみを算出した場合の相違の一例（最大荷重近傍）を示す。この図から、亀裂先端のみを表示した場合には、亀裂開口状態の様子が明確に確認され、亀裂開口部の変形も除くと亀裂位置も推定可能となっている。

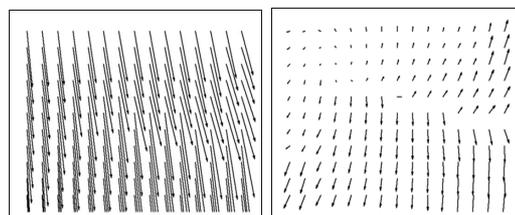


図7 試験片全体変形と亀裂近傍の変形例

しかし、動き解析マイクロ스코プで亀裂

長さを計測したが、倍率が高いため亀裂全長を計億できない。そのため、2 mmおきに罫書き線を入れてある。荷重方向の長い直線が存在すると類似点が多くなり、ノイズとなってしまう。このようなことへの対策としては、PIV法の相関法におけるサブエリアや探查範囲を適切に設定する必要がある。図8に、罫書き線がある場合の画像とその画像のPIV処理結果を示す。

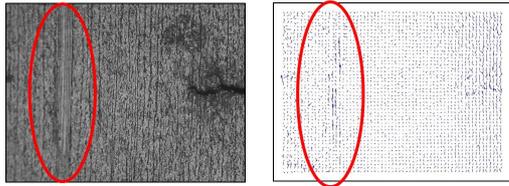


図8 サブエリアと探查範囲を不適切に設定した場合の一例

疲労亀裂伝播試験中に撮影した動画を対象にして、PIV法を用いて亀裂近傍の変形を評価することができることを明らかにした。これを用いて、豊貞らが明らかにしたFLARPシミュレーション解析において疲労亀裂伝播を左右するとされた再圧縮塑性域寸法( $\tilde{\omega}$ )を求めることを検討した。その結果の一例を、図9に示す。この図には、今回求めた亀裂先端の圧縮塑性ひずみの等高線(黄緑色の線が降伏ひずみ相当)、および豊貞らが示したRPG荷重を用いた $K_{RP}$ を用いて算出した $\tilde{\omega}$ の寸法も示してある。

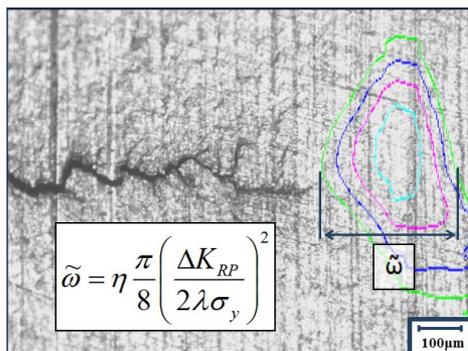


図9 亀裂先端の再圧縮塑性域寸法の一例

この図より、亀裂伝播中の動画にPIV法を適用して求められた再圧縮塑性域寸法と、豊貞らが示している再圧縮塑性域寸法がほぼ一致していることがわかる。今回の方法では、動画の質に大きく影響され、全ての動画でこのような結果が得られるわけではなかった。しかし、このような方法を用いれば、実構造物における疲労亀裂伝播の評価に、今回の方法が適用できる可能性を示すことができた。

本研究で得られた疲労亀裂伝播状況の評価方法(疲労亀裂の伝播状況の高速動画撮影PIV法による亀裂近傍の変形状況の把握、再圧縮塑性域寸法の把握)を用いて、疲労亀裂が屈曲しながら伝播する挙動を把握する

ことを試みた。

疲労亀裂が安定して伝播する第 領域においては、力学的環境によって伝播するとされているが、微細に屈曲しながら伝播することは知られていることである。この原因を探るために、本研究で開発したシステムを利用した。今回の研究において実施した鋼板板厚方向への疲労亀裂伝播試験(図3)において、結晶組織が大きい鋼板のほうが伝播寿命が長くなっていた。この亀裂を詳細に観察すると、結晶組織の大きい鋼板のほうが疲労亀裂は大きく屈曲しながら伝播していることが明らかになった。このことで、伝播寿命が長くなるのであれば、溶接部からの疲労き裂発生が避けられない場合、発生した亀裂の進展を遅延させることも有効であろうと考えられる。そこで、疲労亀裂伝播の長寿命化が得られる鋼材開発の基礎とするために亀裂屈曲と結晶組織の関係を調査した。

図10に、疲労亀裂伝播経路と結晶組織、及び亀裂先端の再圧縮塑性域の境界を示す。この図から、硬いパーライト組織(黒い部分)に出会った疲労亀裂は屈曲する可能性があること、その時の亀裂先端の再圧縮塑性域は縮小していることがわかる。

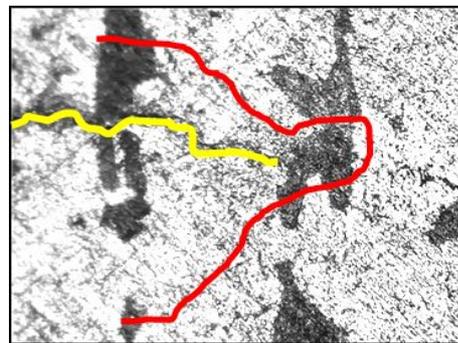


図10 疲労亀裂先端の再圧縮塑性域と結晶組織の一例

さらに、図11に、疲労亀裂の伝播経路と結晶組織の関係を示す。この図からも、硬いパーライト組織に出会った疲労亀裂は屈曲していることがわかる。しかし、パーライトを避けて伝播している個所と、パーライトを

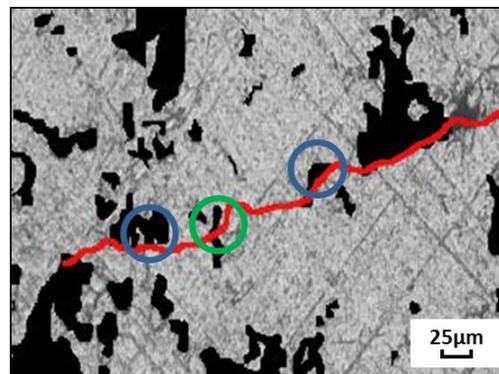


図11 疲労亀裂伝播経路と結晶組織の一例

断ち切って伝播している個所があることがわかる。この原因を解明するために、試料を研磨して撮影することを繰り返し、2次元画像を重ね合わせて3次元画像を作成し、図12に示した。緑色がパーライト組織、青色はパーライト組織表面、赤色は疲労亀裂、透明部分は柔らかいフェライト組織である。また、黒色は背景である。疲労亀裂に隙間があるのは、3次元加工するソフト上の問題である。この図から、疲労亀裂が屈曲伝播する場合には、3次的に大きなパーライトが存在し、断ち切って伝播する場合には、そのパーライトはくびれていたり、裏にはフェライトが存在することがわかる。

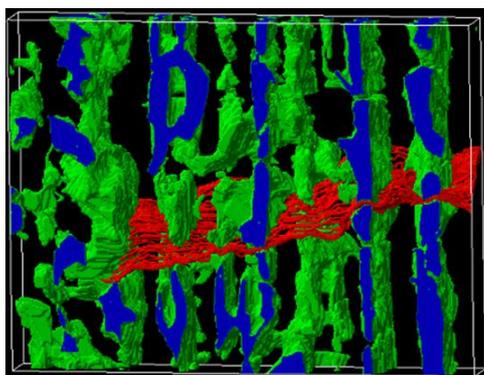


図12 3次元結晶組織と疲労亀裂伝播経路

FLAR シミュレーション法は、実験室で計測されたヒステリシスループから求めた再引張り塑性域形成荷重を用いており、数値解析による再引張り塑性域形成荷重や再圧縮塑性域寸法を含めて、実構造物に対応可能な評価方法とは、必ずしも言えるものではなかった。本研究の成果は、実構造物に存在する疲労亀裂に対して、稼働中の動画を撮影することで、疲労亀裂の伝播状況を直接評価することが可能となることを示したものであり、新たな知見を示すことができたものと考えている。さらに、疲労亀裂伝播を結晶組織を用いて長寿命化させるための基礎的な情報を得ることができた。

##### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

勝田順一, 楠葉貞治, 菅田登, 久保諭, 山口正弘, 和田真禎: 疲労き裂伝播の減速現象を評価するためのシミュレーション法, 日本船舶海洋工学会論文集, 査読有, 第15号, 2012年6月, pp.125-133

〔学会発表〕(計 10 件)

勝田順一: 疲労亀裂先端の挙動と材料特性を考慮した疲労亀裂伝播, 日本溶接協会鉄鋼部会 技術委員会 F T E 委員会, 2014年3月10日, 溶接会館  
井村友祐, 勝田順一: 第 領域における疲労亀裂伝播試験の計測条件に関する考察, 溶接学会九州支部, 2013年7月19

日, 長崎総合科学大学

勝田順一: 疲労き裂伝播の新しい評価方法の検討, 溶接学会第 238 回溶接疲労強度研究委員会, 2013年6月26日, 溶接会館

松口幹保, 勝田順一, 和田真禎: 屈曲伝播する疲労き裂の伝播経路に及ぼす結晶組織の三次元形状の影響, 日本船舶海洋工学会講演会, 2013年5月27,28日, 広島国際会議場

大石隆平, 勝田順一, 和田真禎: 塑性変形の繰返しを考慮した材料限界を用いた疲労き裂伝播シミュレーション, 日本船舶海洋工学会講演会, 2013年5月27,28日, 広島国際会議場

M. Moriyama, K. Fujita<sup>1</sup>, R. Nakashima and J. Katsuta: PIV Based Displacement Vector Estimation Around The Fatigue Crack Tip, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011, 2011.9.19 to 21, Kobe International Conference Center

勝田順一: 特性試験フリーを考慮した疲労き裂伝播シミュレーション, 溶接学会溶接構造研究委員会溶接構造シンポジウム 2011, 2011年11月15日, 大阪大学

和田真禎, 才木隼, 甲木里沙, 勝田順一: 鋼材の伸び性能が疲労き裂伝播に及ぼす影響, 日本船舶海洋工学会講演会, 2011年11月1,2日, 下関市シーモールパレス  
高塚恭兵, 勝田順一, 河野和芳: 鋼構造物溶接継手部からの疲労損傷の検知とその評価, 日本船舶海洋工学会講演会, 2011年11月1,2日, 下関市シーモールパレス  
牛島大介, 藤田晃司, 森山雅雄, 勝田順一: 疲労き裂先端における開閉口挙動の P I V 法を用いた分析, 日本船舶海洋工学会講演会, 2011年5月19,20日, 福岡県中小企業振興センター

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

##### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

勝田 順一 (KATSUTA, Junichi)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号: 20161078

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし