

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 21 日現在

機関番号： 17102
研究種目： 若手研究 (S)
研究期間： 2009 年度～2013 年度
課題番号： 21676007
研究課題名 (和文)： き裂成長履歴推定に基づく大型溶接構造物の疲労寿命推定の高精度化
研究課題名 (英文)： Improvement of the Fatigue Life Estimation for Large Welded Built-up Structures Based on the Estimation of Fatigue Crack Growth Histories
研究代表者： 後藤 浩二 (GOTOH, KOJI)
研究者番号： 60274487
交付決定額 (研究期間全体)： (直接経費) 80,600 千円, (間接経費) 24,180 千円

研究成果の概要 (和文)：

本研究は、社会インフラや大型の輸送機器に多用される大型溶接構造物において、その稼働中に発生・成長する疲労き裂の成長履歴を定量的に推定し、き裂成長履歴を指標とする疲労強度評価手法の確立が目標である。とりわけ、稼働中の構造物中において重要な問題である「位相差を有する二軸載荷問題」と「表面き裂の成長履歴推定」を研究課題として実施し、これに付随する疲労き裂成長シミュレーションの高精度化に関する諸検討も併せて実施した。

研究成果の概要 (英文)：

Main objectives of this research is the establishment of fatigue strength evaluation based on advanced fracture mechanics approach for the large welded built up structures, which enables to evaluate not only the fatigue performance but also the integrity of the structures from the crack length estimation and the loading conditions. Especially, “Fatigue crack growth estimation subjected biaxial loading with different phase of each loading direction” and “Fatigue crack evolution of a surface crack” were highlighted as the research topics in this study. In addition, improvement of fatigue crack growth considering the fatigue crack closure was conducted to support the main research topics.

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： 疲労, 材料・構造力学, 維持・管理, 鋼構造

1. 研究開始当初の背景

船舶・海洋構造物, 橋梁, 鉄道車両, 高層ビル, 海上空港等, 多くの大型溶接構造物が社会インフラとして活用されているが, これら構造物では現在も多くの疲労損傷が報告されている。疲労損傷事故発生の原因について研究代表者は, 設計・製造者の不注意だけではなく, 以下に記す問題が現在も未解決なことが原因であると問題提起した。

(1) S-N 曲線に基づく疲労強度評価の限界

一般に疲労強度評価は, 試験片に繰り返し一定応力範囲 (S) が作用する場合の破断寿命 (N) を整理した S-N 曲線と, 作用応力頻度分布及び線形累積損傷被害則を適用して行われるが, 実機で同手法を適用して安全と判断された条件でも疲労損傷を生じた事例

が多々存在する。この理由として, 実働環境とは異なる一定荷重振幅下の疲労試験結果を基に論理が組み立てられている現状がある。

(2) 疲労き裂成長挙動の定量的考慮

Paris 則に代表される従来型の破壊力学手法に基づく疲労寿命予測手法を適用しても, き裂成長履歴に及ぼす荷重履歴の定量的考慮は不十分である。従って, 疲労き裂成長を律するき裂開閉挙動を考慮できるき裂成長シミュレーションの実用展開が必要である。ただし, 設計適用等に配慮すれば, 計算力学分野で盛んに実施されている大規模数値シミュレーションは非実用的であると考えられる。

(3) 実機における応力状態の考慮 (位相差を有する多軸応力状態)

種々の大型溶接構造物の稼働環境は多岐に渡り、種々の座標成分を有する外力が位相差を有して作用する。しかし、現状の疲労き裂成長挙動評価では位相差を有する多軸応力状態は考慮されていない。大型溶接構造物に対する定量的な疲労強度評価には、き裂成長挙動に及ぼす（位相差影響を考慮した）多軸応力影響を評価することが必要である。なお、船舶・海洋構造物に代表される板材及び骨材から形成される大型溶接構造物の疲労損傷形態を考慮すると、多軸問題の中でも面内二軸載荷状態に対する評価が重要である。

(4) 実機におけるき裂成長形状・履歴の定量的考慮

大型溶接構造物の疲労損傷の大半は、溶接止端や溶接金属内の残存欠陥を起点とする表面・埋没き裂性状を呈するが、これらを構造物建造時に完全に除去することはほぼ不可能である。従って、実機の疲労寿命推定高精度化のためには、表面・埋没欠陥を起点とする疲労き裂成長挙動を定量的に推定する手法が必要である。

2. 研究の目的

上述の研究背景で提起した問題を解決するために、

- (1) 二軸応力状態における疲労き裂伝播寿命推定手法の確立。
- (2) き裂開閉挙動を考慮した疲労き裂成長シミュレーション手法の構築。

を目的として研究を進めた。また、上述の課題達成に必要不可欠である、

- (3) 疲労き裂成長シミュレーション手法の高精度化。

に関しても、平行して研究を実施した。

3. 研究の方法

- (1) 二軸応力状態における疲労き裂伝播寿命推定手法の確立

①板厚貫通き裂材に対する検討

載荷荷重の位相差を定量的に制御できる疲労試験環境を整備し、i) 位相差 0, ii) 位相差 π , iii) 位相差 $\pi/2$ 及び $3\pi/2$, の条件で疲労き裂伝播試験を実施した。試験状況を図 1 に、載荷条件を図 2 に示す。



図 1 二軸載荷疲労試験の様子

(板厚貫通き裂材)

位相差を有する二軸載荷状態の疲労き裂伝播挙動推定手法として、無き裂状態において位相差を有する二軸載荷により、想定き裂伝播線垂直方向（き裂開口を生じさせる方向に相当する）に作用する応力がどのように変動するかを FE 解析により導出し、この応力変動が作用する等価な単軸載荷問題に置き換え、疲労き裂開閉挙動を定量的に考慮できる疲労き裂伝播シミュレーションを適用した。

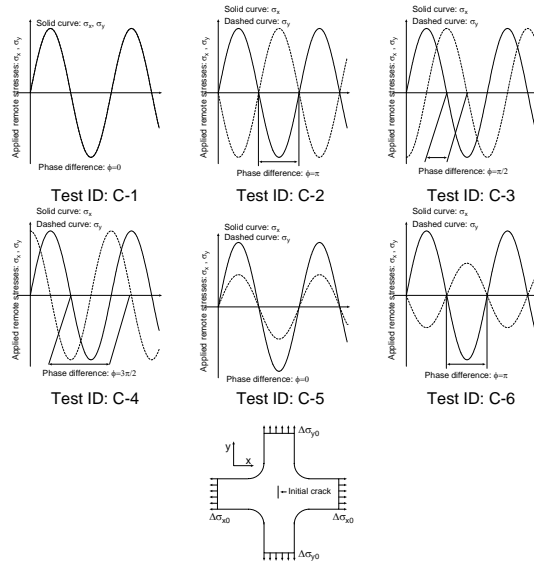


図 2 二軸載荷条件一覧（板厚貫通き裂材）

②面外ガセット溶接継手に対する検討

上記①で使用したものと同一疲労試験環境を利用し、i) 位相差 0 及び ii) 位相差 π の条件（図 2 の C-1, C-2 に相当）で疲労き裂伝播試験を実施した。各応力範囲成分は同じとした。試験状況を図 3 に示す。本項目は研究申請段階では予定していなかったが、①の研究の発展的内容として実施した。

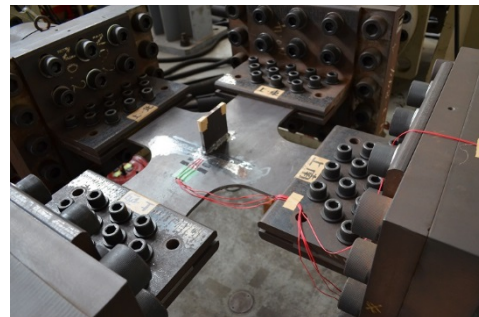


図 3 二軸載荷疲労試験の様子
（面外ガセット溶接継手試験体）

面外ガセット溶接継手では、一般に角回し

溶接止端から複数の微小な表面き裂が発生し、これが合体を繰り返しながら単一の表面き裂となり、さらに成長して板厚貫通き裂に変化するという成長履歴をたどる。この成長履歴を、単軸載荷問題に対して提案された等価分布法(Toyosada et. al, Int. J. Fatigue, Vol.26, 2004)と①で述べた二軸問題を等価な単軸問題に置き換える手法とを組み合わせることで推定した。

(2) き裂開閉口挙動を考慮した疲労き裂成長シミュレーション手法の構築

①等価分布応力法の適用

溶接継手内部に故意に埋没欠陥を残存させた試験片、および表面き裂を付与した試験片を用いた疲労試験を実施すると共に、等価分布法を用いて疲労き裂成長履歴を推定し、実測結果との比較を実施した。なお、従来の等価分布応力法では、き裂面領域がリガメント領域と比べて十分小さく無ければ推定精度が低下するため、評価対象と同じリガメント寸法を有する破壊力学試験片に置き換えるように改良すると共に、等価分布応力の値を算定するために事前に必要となる表面・埋没き裂の形状(アスペクト比)変化に関する推定式の導出も実施した。

②表面き裂に対する疲労き裂開閉口シミュレーションの構築

上述①の手法では、アスペクト比変化則が実験式であるため、き裂が存在する部材形状によっては形状成長履歴の推定精度が劣る可能性も懸念される。そこで、従来の板厚貫通き裂に対して構築された「き裂結合モデル(いわゆる Dugdale モデル)」を表面き裂問題に拡張し、表面き裂問題に対する疲労き裂開閉口シミュレーションを構築した。なお、き裂結合モデルによるき裂開口形状及びき裂前方に形成される塑性域寸法の計算には、表面き裂の応力拡大係数に関する重み関数を使用するため、広範なき裂形状、応力分布条件下で適用可能な重み関数の導出が必要である。そこで Wang らの手法に基づく重み関数の導出も実施した。

(3) 疲労き裂成長シミュレーション手法の高精度化

本研究において活用した、疲労き裂開閉口挙動を考慮した疲労き裂成長シミュレーションは、弾性問題の重ね合わせによりき裂材の弾塑性挙動を表現する「き裂結合モデル」に基づいて定式化されたものであるが、定式化に際して材料を「弾完全塑性体」と仮定し、降伏後の加工硬化現象を無視している。一方、特に変動荷重履歴に曝される溶接構造物中で成長する疲労亀裂の成長履歴には材料の加工硬化が影響を及ぼす場合があるので、こ

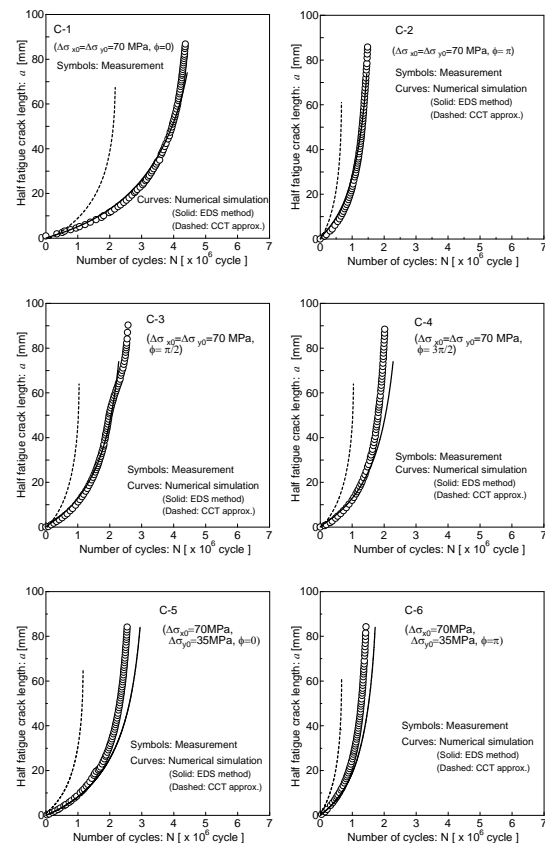
れを考慮できるき裂結合モデルの構築が必要である。研究代表者は従来のき裂結合モデルで生じる仮想き裂部(き裂先端に形成される塑性域に相当)で生じる仮想的な開口変位と同位置において弾塑性 FE 解析から得られる塑性ひずみの関係に着目し、加工硬化現象を考慮できるき裂結合モデルを提案した。

4. 研究成果

(1) 二軸応力状態における疲労き裂伝播寿命推定手法の確立

①板厚貫通き裂材に対する検討

図4に提案手法により推定された疲労き裂伝播履歴(実線: EDS method)と実測された結果(○印)の比較を示す。なお、同図中には二軸載荷試験片(十字型試験片)を同試験片の最小幅と等しい幅を有する中央貫通き裂入り帯板試験片(CCT試験片)に近似した場合の結果も破線で併せて示している。



[注]

- $\Delta\sigma_x$: き裂面垂直方向の作用応力範囲
- $\Delta\sigma_y$: き裂線方向の作用応力範囲
- ϕ : $\Delta\sigma_x$ と $\Delta\sigma_y$ の位相差

図4 提案手法による疲労き裂伝播履歴の推定と実測結果の比較

これらの結果から、提案手法により位相差を有する二軸載荷条件下における疲労き裂成

長履歴を精度良く推定できることが確認できる。一方、CCT試験片への近似手法は過度に安全側の推定結果を与えることも確認できる。この理由はき裂の進展に伴うリガメント寸法の大きさが実際の試験片と比べて小さいため、同一载荷段階でのき裂開口量が大きくなるためと考えられる。

②面外ガセット溶接継手に対する検討

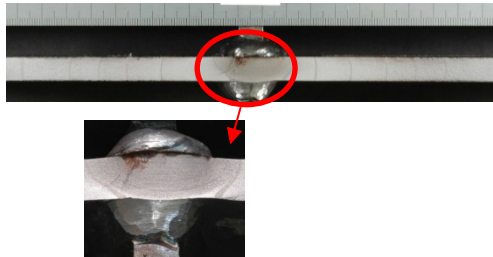
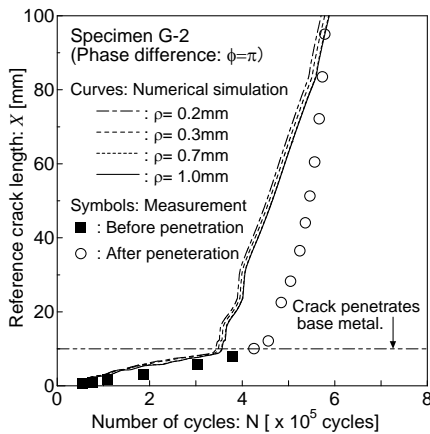
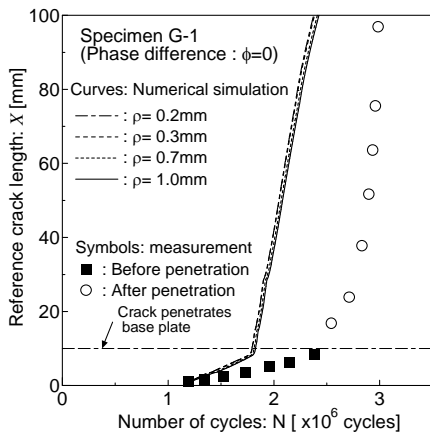


図5 破断面 (位相差:0, $\Delta\sigma_x = \Delta\sigma_y = 220\text{MPa}$)



[注]

- $\Delta\sigma_x$: き裂面垂直方向の作用応力範囲
- $\Delta\sigma_y$: き裂線方向の作用応力範囲
- ϕ : $\Delta\sigma_x$ と $\Delta\sigma_y$ の位相差
- ρ : 角回し部の溶接止端半径

図6 提案手法による疲労表面き裂成長履歴の推定と実測結果の比較

図5に破断面の写真の一例を示すが、疲労き裂は角回し溶接止端の複数点から発生、早期に合体を完了して単独の表面き裂となり、さらに成長して板厚貫通き裂に至った。

図6に提案手法により推定された疲労表面き裂の成長履歴と実測された結果の比較を示すが、いずれも安全側の推定結果が得られており、実働構造物の健全性評価の観点に立てば、妥当な結果が得られたと考えられる。一方、推定精度の更なる向上も必要であると考えられる。このためには、推定に際しての入力情報である、角回し溶接止端近傍に存在する表面き裂の応力拡大係数やき裂が成長する主板断面中の溶接残留応力分布の推定精度向上が必要であると考えられる。

(2) き裂開閉口挙動を考慮した疲労き裂成長シミュレーション手法の構築

①等価分布応力法の適用

溶接継手内部に故意に埋没欠陥を残存させた試験を用いた疲労試験、および表面き裂を付与した試験片を用いた疲労試験を実施した。図7に試験終了後の破面の一部(埋没き裂試験片)を示す。破面に刻まれたビッチマークを計測することで、き裂形状の成長履歴を測定した。

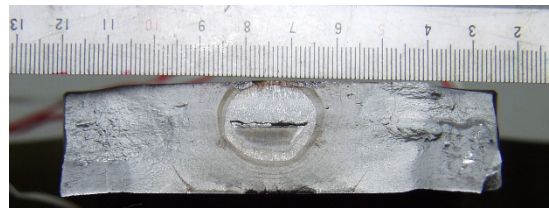


図7 疲労破面の例 (埋没き裂)

一方、数値シミュレーションによる成長履歴推定に必要なき裂形状(アスペクト比)の推定式を導出し、これと等価分布応力法を用いて成長履歴を推定した。結果を図8に示すが、提案手法を用いることで、良好な推定結果が得られることを確認した。

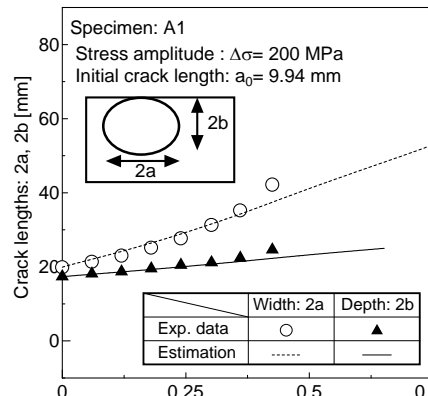


図8 埋没き裂成長の予測結果と実測値の比較

②表面き裂に対する疲労き裂開閉口シミュレーションの構築

前記①で示した手法では、疲労き裂成長解析に先立ち、評価対象に適用できる等価分布応力を算出するという「前処理」が必要である。これを省略できる一貫した疲労き裂成長解析を表面・埋没き裂に対して適用するためには、

- (a) 表面・埋没き裂に対する「表面・埋没き裂に対して精度よく応力拡大係数を算定できる、応力拡大係数重み関数を導出する。
 - (b) 板厚貫通き裂に対して導出された、「き裂結合力モデル」と「Paris の相反定理」を、表面・埋没き裂に対してできるようにする。
- という問題を解決する必要がある。

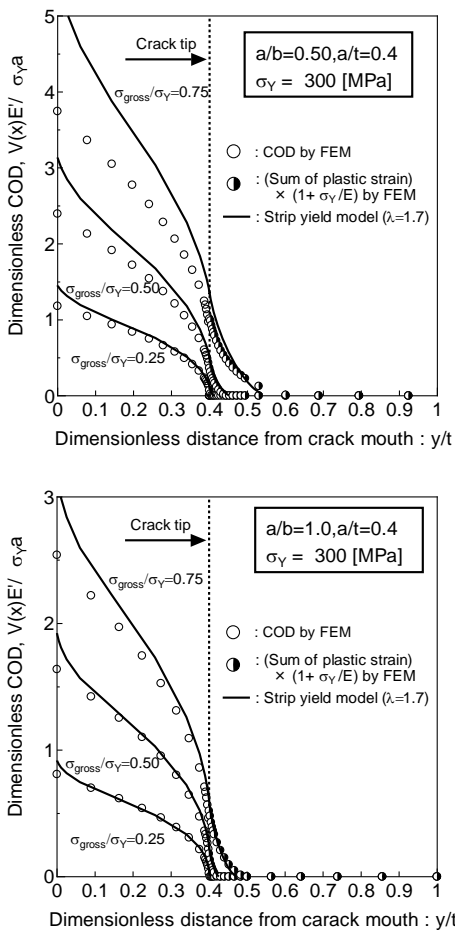


図9 提案手法による表面き裂のき裂開口変位及び塑性域長さと弾塑性FE解析結果との比較例

(a)については、Rice (ASTM STP-1020, 1989) が提示した表面・埋没き裂に対する重み関数の一般的な表現中に出てくる係数を、FE解析結果を用いて多項式で表現した Wang ら (Int. J. Fatigue, Vol.31, No.11-12, 2009) の結果を基に

して、本研究において、より一般的な応力場に関して応力拡大係数の推定精度を向上させた重み関数を導出した。(b)については、板厚貫通き裂に対する、き裂結合力モデル及びParisの相反定理の諸式に(a)で導出した応力拡大係数重み関数を適用することで、表面き裂に対するき裂開口変位の分布及び塑性域長さを良好に推定できることを確認した(図9参照)。

次に、提案した表面・埋没き裂に対するき裂結合力モデルを、板厚貫通き裂問題に対する疲労き裂伝播シミュレーションに実装させて疲労き裂成長解析を実施し、別途実験により取得した疲労表面き裂の成長履歴との比較を実施した。図10に結果を示すが、提案手法を用いることで比較的良好な精度で、疲労表面き裂の成長履歴推定が可能であることを確認した。

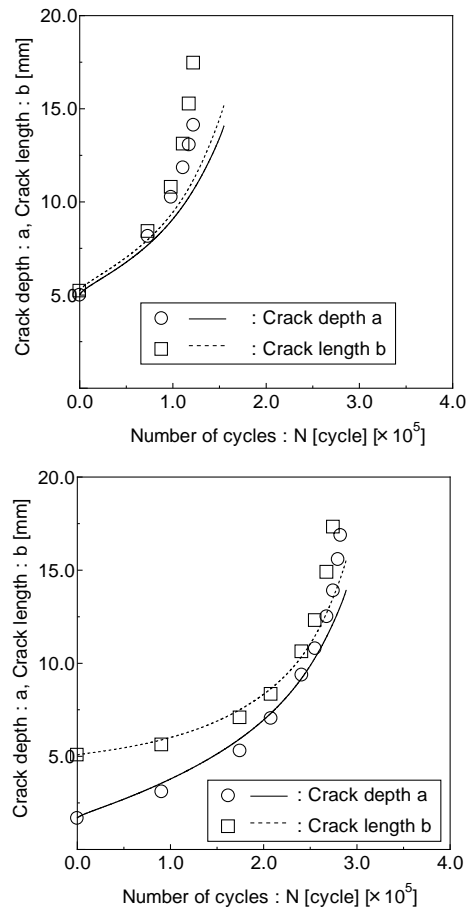
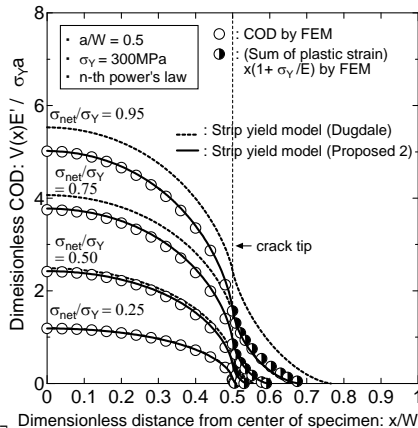


図10 提案手法による疲労表面き裂の成長履歴推定と実測結果との比較例

(3) 疲労き裂成長シミュレーション手法の高精度化

図11は提案モデルにより得られるき裂開口変位とFE解析結果の比較例であり、提案モデルの妥当性が確認できる。また、このモ

デルを実装させた疲労き裂伝播シミュレーションの開発も実施した。



[注]

- 実線：提案手法
- 破線：従来のき裂結合力モデルによる結果
- 記号：弾塑性 FE 解析結果

図 11 提案手法によるき裂開口変位推定結果と弾塑性 FE 解析の比較例

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 18 件)

1. Koji GOTOH, Toshio NIWA and Yosuke ANAI; Fatigue crack growth behaviour of an out-of-plane gusset welded joints under biaxial tensile loadings with different phases, Proceedings of 20th European Conference on Fracture (ECF20), 査読有, 2014, 印刷中.
2. 後藤浩二, 丹羽敏男, 穴井陽祐, 大森徹也, 田中義久; 位相差を有する二軸繰り返し載荷条件下における疲労き裂伝播挙動, 日本船舶海洋工学会論文集, 査読有, Vol.18, 2013, pp.101-108.
3. 後藤浩二, 大田黒哲哉; 表面および埋没き裂応力拡大係数重み関数に関する一提案, 日本船舶海洋工学会論文集, 査読有, Vol.17, 2013, pp.65-73.
4. Koji GOTOH, Toshio NIWA, Yosuke ANAI, Tetsuya OMORI, Yoshihisa TANAKA and Koji MURAKAMI; Fatigue crack propagation under biaxial loading, -Effect of the phase difference on biaxial loading-, Proceedings of 32nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2013), 査読有, 2013, OMAE 2013-10980. (OMAE 2013 Best Paper of Material Technology Symposium 受賞)
5. 原田圭輔, 後藤浩二; 材料の加工硬化特性を考慮したき裂結合力モデル, 日本船

舶海洋工学会論文集, 査読有, Vol.14, 2011, pp. 39-46.

6. Yosuke ANAI, Koji MURAKAMI and Koji GOTOH; A conventional growth estimation formula of the representative surface crack replacing plural surface cracks generated at the sound stress concentration site, Proceedings of International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2011 (ATEM'11), 査読有, 2011, OS14F029.

[学会発表] (計 14 件)

1. Koji GOTOH, Fatigue crack propagation under biaxial loading -Effect of the phase difference on biaxial loading-, 32nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2013), 2013年6月11日, Nantes, France.
2. Koji GOTOH, Improvement of fatigue crack growth simulation based on the Strip Yield Model considering the strain hardening effect of materials, 31st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2012), 2012年7月3日, Rio de Janeiro, Brazil.
3. Koji GOTOH, Estimation of the shape evolution and the growth history of an embedded crack by fatigue loading, 30th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2011), 2011年6月21日, Rotterdam, The Netherland.
4. Koji GOTOH, Numerical simulation of fatigue crack growth based on Strip Yield Model considering work hardening of materials, 29th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE 2010), 2010年6月9日, Shanghai, China.

6. 研究組織

(1)研究代表者

後藤 浩二 (GOTOH, Koji), 九州大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 60274487

(2)研究協力者

村上 幸治 (MURAKAMI, Koji), 九州大学・大学院工学府・技術専門職員

(3)研究協力者

丹羽 敏男 (NIWA, Toshio), (独) 海上技術安全研究所・研究員
研究者番号: 10208267