

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2005～2008
 課題番号：17206086
 研究課題名（和文） 数値シミュレーションに基づく経年船舶海洋構造の強度評価に関する研究
 研究課題名（英文） Simulation-Based Strength Evaluation of Aged Ship and Marine Structures
 研究代表者
 角 洋一（SUMI YOICHI）
 横浜国立大学・大学院工学研究院・教授
 研究者番号：80107367

研究成果の概要：船舶海洋構造物の経年劣化の主要メカニズムである疲労き裂の成長と腐食による強度・延性低下について数値シミュレーション手法を確立するとともに開発手法の妥当性を実験的に検証した。疲労き裂伝播シミュレーションについてはコンテナ船疲労危険部位の評価に適用できることが示され、その実用性が実証された。腐食による経年劣化に関しては、その延性低下のメカニズムが、実験および数値計算により初めて定量的に明らかにされた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	14,000,000	4,200,000	18,200,000
2006年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
2007年度	7,100,000	2,130,000	9,230,000
2008年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
年度			
総計	36,700,000	11,010,000	47,710,000

研究分野：船体構造学、破壊力学

科研費の分科・細目：総合工学 船舶海洋工学

キーワード：海上安全、船舶海洋工学、破壊力学、疲労、腐食、シミュレーション工学、長寿命化

1. 研究開始当初の背景

1997年のナホトカ号、1999年のErika号、および2002年のPrestige号の折損事故が引き金となり、維持管理水準の低い老朽船（サブスタンダード船）による事故とその後の海洋環境汚染が、国際的に大きな社会問題として取り上げられるようになってきた。船舶海洋構造物の構造強度に関わる生涯管理は、疲労き裂管理と腐食部材管理に尽きる。疲労き裂の管理は、航空機分野では、定期検査・点検により疲労き裂を発見し補修する耐損傷設計（damage tolerant design）が取られることもあるが、海洋構造分野では、苛酷な検査環境のためこの概念をそのまま適用することは出来ない。本研究では、疲労き裂発生

の危険が予測される溶接部において、き裂伝播形態を制御することによって、そのき裂が定期検査時に目視点検で発見でき、且つその後のき裂成長の遅延あるいは停留の正確な予測ができる新しいシミュレーション・ベースのき裂管理法を提案する。

腐食に関しては、腐食ピット成長の統計モデルや強度推定についての研究は、経年船の状態評価との関係で研究が進んでいる。しかし、船舶の衝突挙動把握に極めて重要な腐食材の破断時の著しい延性低下は、その表面形状不整によることが知られているものの、腐食表面の不規則形状に対する実験・数値計算が困難なためその詳細なメカニズムは未解明のままである。本研究では、腐食材表面を

精密数値加工により再現し、系統的な実験により延性低下のメカニズムと試験片寸法に関する相似則を明らかにする。さらに、数値シミュレーションによる強度と延性評価手法を確立することによって、実験的評価が困難な腐食材の延性低下のメカニズムを解明する。

2. 研究の目的

(1) 疲労き裂伝播シミュレーション手法の開発

本研究の目的は、疲労き裂伝播経路予測を含む疲労き裂成長の有限要素法による自動逐次計算である。摂動近似によるき裂曲進の高精度予測、Paving 法によるき裂進展に対応した高速でロバストな自動要素再分割法、溶接部における残留応力影響、き裂進展に伴う3次元構造体としての応力再配分影響を考慮するが、本研究では特に構造詳細の選択によるき裂伝播経路の制御、複数き裂の干渉、伝播寿命における荷重履歴影響および溶接残留応力影響を明らかにし、発生したき裂が目視検査で発見可能であり且つ管理可能なものとする条件を解明する。

(2) 腐食材の延性低下のメカニズム解明

本研究では、延性低下が材質そのものの劣化でなく腐食ピットによる形状影響であることに着目し、精密機械加工により腐食材表面形状を再現した試験片を作成し、表面形状を経年的に変化させた試験を実施し、これによって、腐食材の塑性変形の局所化と破断までの吸収エネルギーの低下の関係を解明する。これらの実験結果を踏まえ、延性強度における幾何学的相似則の成立する範囲を明らかにするとともにさらに対応する陰解法および陽解法による計算手法を検討し、腐食表面を有する鋼板の破断シミュレーション手法を確立する。

3. 研究の方法

(1) 疲労き裂伝播シミュレーション

継続開発中の疲労き裂伝播経路・寿命シミュレーション・コードを複数き裂同時進展シミュレーションに対応できるように改良し、より多様な実船構造の疲労き裂に対応できるようにする。疲労き裂伝播には溶接残留応力の影響が大きいので、与えられた溶接条件に対する残留応力を汎用コードによる数値シミュレーションで算定する手法を開発し、その結果を伝播シミュレーションに適用する。また、変動荷重を含む作用荷重履歴の影響を正確に疲労き裂伝播に反映すべくき裂面上の残留塑性域を考慮した繰返し引張り塑性域寸法に基づく高精度のき裂伝播則を新たに導入し、伝播形態のみならず伝播寿命推定の高精度化を目指す。さらに、本手法の3次元固体内の3次元き裂の伝播形態シミュレーションへの展開を検討する。

レーションへの展開を検討する。

前述のシミュレーション・コードにより船舶海洋構造に発生する疲労き裂の伝播経路と伝播寿命を制御し定期的目視点検で実現可能な疲労き裂生涯管理概念を提案する。このためには、目視で検出可能なき裂が一定期間遅延・停留する必要がある、各種遅延のメカニズムを実験とシミュレーションにより検証する。この管理概念実現化のため変動荷重下の小型疲労試験や構造模型疲労試験を行い、溶接残留応力の有無による伝播速度影響を詳細に検証する。

(2) 腐食平板の変形能解明

各種の腐食条件下の船体用鋼板について腐食面の統計的性質を(財)日本海事協会の腐食データベースに基づいて調査し、この結果に適合する腐食ピットの生成、成長過程を数値シミュレーションする。この数値生成された腐食表面形状のデジタル・データから試験片表面形状をNC加工し、引張り試験を実施するとともに、対応する非線形有限要素解析による延性破断シミュレーションを行う。また、実船の海水腐食した平板の表面形状をレーザー式センサーをスキャン測定し、その結果得られるデジタル・データを用いて、実験と数値計算を行い、数値シミュレーション法を確立する。この手法を用いて引張り負荷に対する腐食の進行状況に応じた強度低下と変形能低下を数値的に明らかにする。

4. 研究成果

(1) 疲労き裂伝播形態の制御について

図1に示す構造詳細について、ウェブとフェイスをき裂が同時進展する状態のシミュレーションを行い、疲労き裂伝播形態の管理・制御の可能性を検討した。シミュレーションでは、き裂伝播経路の予測と要素再分割による逐次有限要素解析を実施した。

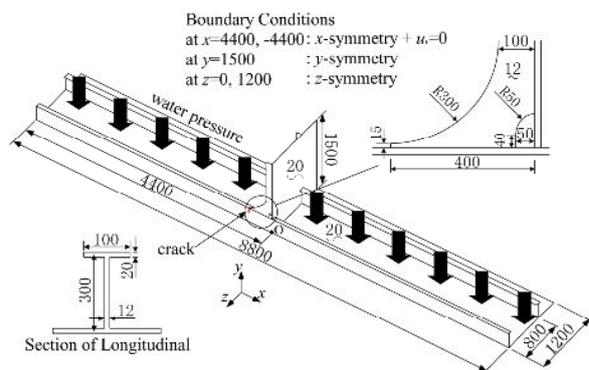


図1 水圧を受ける補強板構造とき裂発生部位

図1の縦横部材交差部ロング材に発生した疲労き裂のウェブ内のき裂伝播経路を図2に示す。図の上部がフランジ、下部がスキン材位置に相当するが、き裂はスキン材に近づくに従って大きく湾曲し、き裂のスキン材への

侵入を制御・抑止できる可能性が有ることを示している。

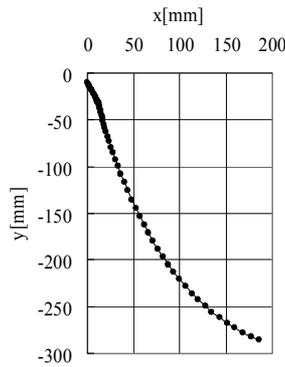


図2 ウェブ内のき裂伝播形態

(2) き裂面残留塑性域を考慮した遅延モデルについての実験的検討

疲労き裂伝播試験を図3に示すC T試験片を用いて行った。供試材は板厚 10mm の JIS SM490A 鋼板である。

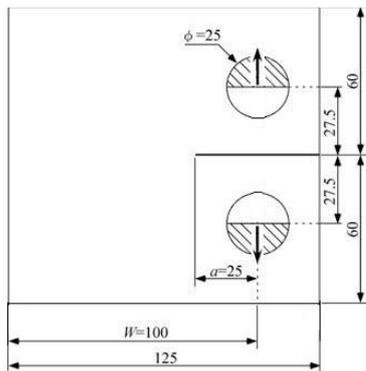


図3 C T試験片

実船での荷重履歴をモデル化したクラスター化されたランダム荷重（嵐モデル）による変動荷重を負荷条件とした。嵐モデル変動荷重試験は富田らの手法に則り A から F の 6 種類の嵐荷重をランダムに発生させた。20 年間に遭遇する嵐は 93 個とする。初期き裂を一定振幅荷重で発生させた後、ランダムな順序の嵐モデルを作用させる。（表 1、図 4 参照）

表 1 嵐荷重レベルと平均生起頻度

Storm	A	B	C	D	E	F
ΔF_{max} (kN)	11.4	13.3	15.2	17.1	20.9	28.4
Number	42	25	12	7	6	1

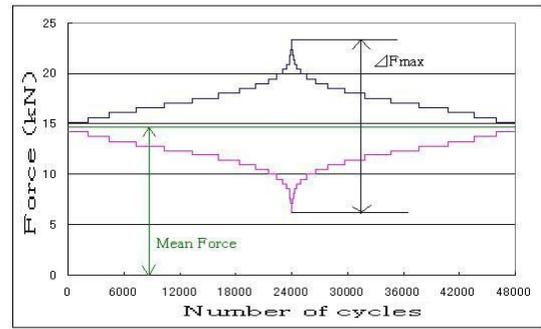


図4 単一嵐における荷重履歴

実験と本解析結果の比較例を図5に示す。等価荷重によるシミュレート結果に比べて、変動荷重に伴う疲労き裂の遅延現象が、実験とよく一致しており高い精度でシミュレートできることが確認できた。

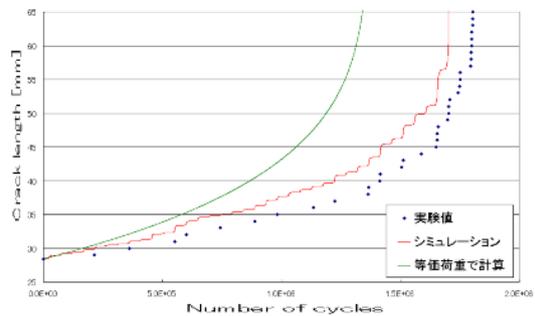


図5 ランダム荷重下の疲労き裂伝播シミュレーションと実験の比較

(3) 疲労き裂伝播に対する溶接残留応力影響

本研究では、溶接構造の溶接残留応力分布を固有応力法により簡便に計算する手法を導入した。図6は板幅の中央に溶接継手のある疲労試験片の a - N 線図を示す。解析と実験と比較すると平均伝播特性を用いた解析結果と下限伝播特性を用いた解析結果の間に実験結果があることがわかる。一方、従来手法では過大荷重に伴う遅延を再現できないため、実験結果に比べて大幅に保守的な寿命予測となる。本実験結果から溶接継手に対する本手法の適用性を確認出来た。

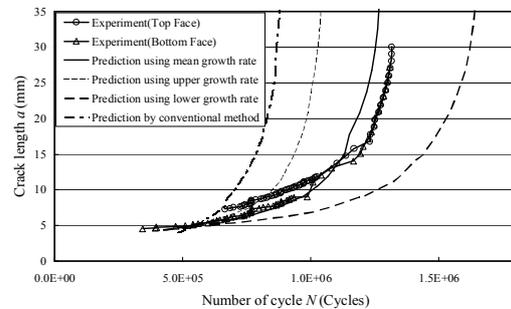


図6 溶接部におけるランダム嵐荷重に対する疲労き裂伝播曲線の比較

(4) クラスター化されたランダム荷重による船体構造の疲労き裂の伝播シミュレーション

図1に示す船体構造詳細がランダムな嵐荷重を受ける場合のフェイスおよびウェブのき裂成長の数値シミュレーション結果を図7および図8に示す。ランダムな荷重履歴の影響による伝播寿命の変動を検討するために計算は10回実施した。ここでは比較のために、Paris-Elber則による簡易計算の結果も示している。本手法による結果は簡易手法のものに比べてバラツキが大きく、平均寿命は2~3倍程度長く推定されている。これは、本手法では荷重順序の相互作用によるき裂伝播の遅延現象を考慮できるからである。図9にウェブのき裂に対する0~80万サイクルまでのき裂成長曲線とそれに対応するランダムな嵐荷重履歴を示す。本手法による結果では、高レベルの嵐を受ける間はき裂進展速度が大きく加速するが、直後の低レベルの嵐では大きく減速している。このような高レベルの嵐荷重履歴によるき裂伝播の遅延が定期的に起きることで、き裂伝播寿命が大きく引き伸ばされたと推察される。

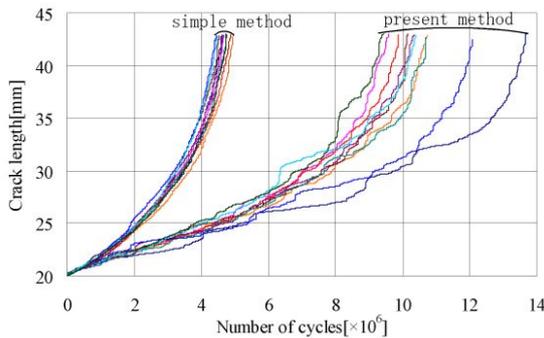


図7 フランジのき裂伝播曲線

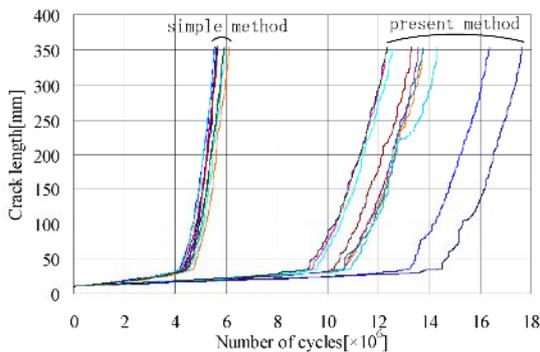


図8 ウェブのき裂伝播曲

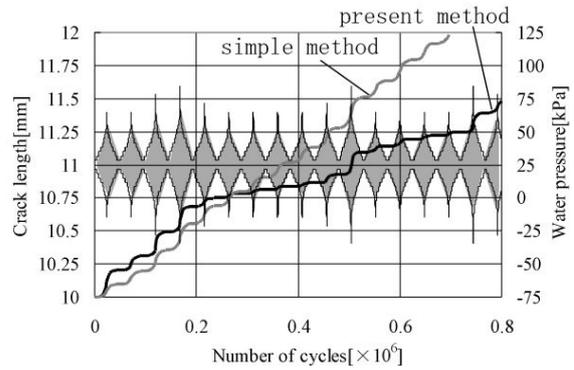


図9 高レベルの荷重クラスター負荷後のき裂伝播遅延挙動

本シミュレーション手法のランダム荷重履歴は、ISSCスペクトルなどのエネルギースペクトルで与えられる短期海象と船体の構造応答関数(RAO)を組み合わせた形へも展開可能である。その一例として、超大型コンテナ船の船側構造の疲労解析結果を図10に示す。この場合にもやはりき裂成長の遅延が現れ、簡便手法による疲労寿命に比べかなり長寿命側の予測が得られることがわかった。

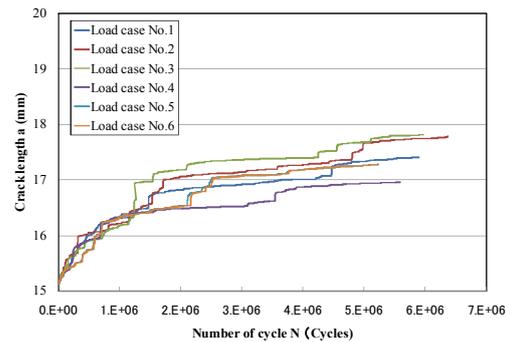


図10 コンテナ船船側構造のロンジ・フェイス材の疲労き裂伝播シミュレーション

(5) 3次元内部欠陥への適用

き裂面上の残留塑性域の接触を考慮した理論に基づく3次元内部欠陥の伝播寿命の比較計算を、前述のクラスター化されたランダムな荷重履歴(40サンプル)について行った。計算条件としては、初期き裂長さ $2a=25$ [mm]、き裂幅 $2b=5$ [mm]の楕円き裂を想定した。このシミュレーション結果に対応する等価応力範囲および種々の荷重順序に対する疲労き裂伝播寿命との関係を詳細に検討するためさらに以下の4ケースについてシミュレーションを行った。

- (case1) 嵐モデルを小さいものから順に並べ (A嵐42回⇒B嵐25回⇒・・・F嵐1回)、これを繰り返す場合 (漸増嵐)
- (case2) すべての作用荷重を小さいものから順に並び替える場合
- (case3) 遅延効果を意図的に大きくした場合
- (case4) 等価応力範囲の一定応力を作用させ

る場合

図 11 の結果を見ると、一定振幅荷重や漸増荷重のように、荷重順序影響によってき裂進展の遅延が起きない場合には、ランダムな嵐モデルによる平均よりもかなり早くき裂が進展する。実際のき裂伝播寿命は、ランダムな嵐モデルの平均寿命に 10%程度の変動係数をもつバラツキを考慮したもので十分であろう。

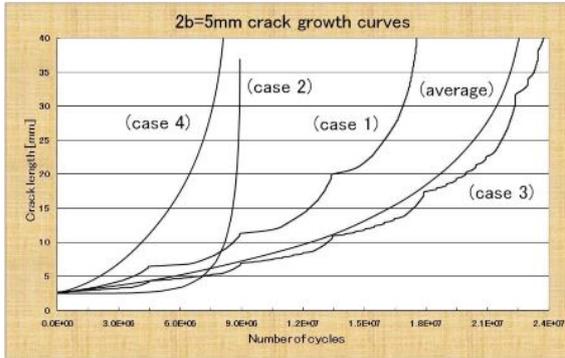


図 11 ランダム荷重下き裂進展(図中 average)と各種シミュレーション結果の比較

(6) 新しいシミュレーション・ベースのき裂管理法の実船適用

本研究により、き裂伝播形態の制御および残留応力を考慮したランダム荷重下の疲労き裂伝播寿命予測が可能となった。特に、き裂伝播の遅延が高精度で予測可能となったことから、図 10 に典型的にみられるような遅延型の疲労き裂伝播曲線が得られる場合、溶接構造物においてもようやく検査点検に基づくき裂管理に道を開くことができたと考えられる。

(7) 腐食ピット成長の統計モデルに基づく表面形状のシミュレーション

腐食平板の延性破断特性の解明に関しては、各種の腐食条件下の船体用鋼板について腐食面の統計的性質を(財)日本海事協会の調査に基づいて調査し、塗装の劣化、腐食ピットの発生および成長を考慮したシミュレーションモデルを構築し、実船で観察される腐食状況を良好に再現できること確認した。

(8) 腐食材表面の精密数値加工により再現と数値シミュレーション法の確立

腐食ピットの分布を各種系統的に変化させた腐食表面を数値的に生成し、その引張試験を小型平板試験片を用いて行い(図 12 参照)、試験片寸法に関する相似則の確認、腐食鋼板の強度および延性低下に対する腐食ピットの分布が巨視的延性低下と塑性変形領域の局所化に及ぼす影響の解明を行った。さらに、このような現象を大変形、大ひずみ

有限要素解析により数値シミュレーションで予測するための手法を確立した(図 13 参照)。このような現象理解に基づき、腐食環境下の構造物の強度低下と変形能およびエネルギー吸収量の低下の関係を主として数値解析に基づき解明することができた。

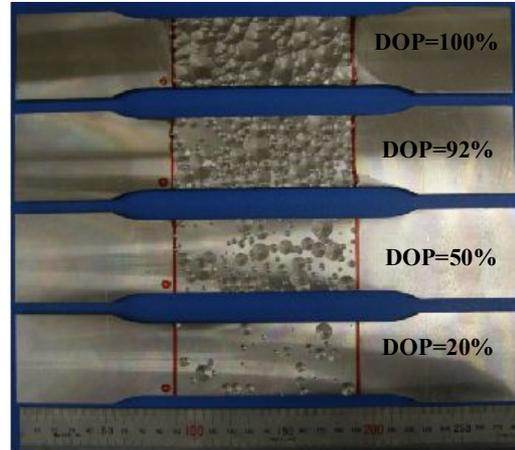


図 12 試験片表面腐食経年変化の再現加工

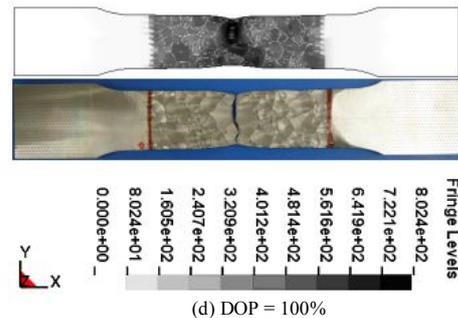


図 13 解析(上図)と実験(下図)の比較

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 10 件)

1. 毛利雅志、角洋一、伊藤友一、変動荷重を受ける溶接継手の疲労き裂伝播予測法、日本船舶海洋工学会論文集、7、2008、259-270. 査読有
2. Y. Sumi, Strength and deformability of corroded steel plates estimated by replicated specimens, Journal of Ship Production 24-3, 161-167, 2008, 査読有
3. T. Okawa and Y. Sumi, A computational approach for fatigue crack propagation in ship structures under random sequence of clustered loading, Journal of Marine Science and Technology, 13-4, 416-427, 2008. 査読有
4. 川村恭己、西本匡伸、角洋一、余寿命便益評価に基づく船体構造の保守管理手

- 法に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, 6, 361-369, 2007. 査読有
5. T. Okawa, Y. Sumi, and M. Mohri, Simulation-based fatigue crack management of ship structural details applied to longitudinal and transverse connections, *Marine Structures*, 19, 2006, 217-240. 査読有
 6. 角洋一、山村暢隆、山室佑介、表面形状の再現加工による腐食鋼板の引張強度と変形能の解明、日本船舶海洋工学会論文集、4, 2006, 239-245. 査読有
 7. 中井達郎、角洋一、斉木幸太郎、山本規雄、腐食ピットの確率モデルによる再現腐食表面形状を有する鋼板の引張試験、日本船舶海洋工学会論文集、4, 2006, 246-255. 査読有
 8. 大川鉄平、角洋一、変動振幅荷重を受ける構造体の疲労き裂伝播シミュレーション—き裂開閉口モデルを結合した自動き裂進展解析システムの開発、日本船舶海洋工学会論文集、4, 2006, 269-276. 査読有
 9. 大川鉄平、角洋一、船体縦通材の疲労き裂伝播に関する研究—3次元板骨構造の複数き裂同時進展解析、日本船舶海洋工学会論文集、2, 2005, 331-339. 査読有
 10. Y. Kawamura and Y. Sumi, Information system for structural integrity of ships, *Journal of Engng. for Maritime Environment*, 219, 2005, 93-106. 査読有
- [学会発表] (計6件)
1. Md. Mobesher Ahmmad and Y. Sumi, Measurement of true stress-strain and its application to assess the strength and deformability of steel plates with surface pits and replica for general corrosion, 日本船舶海洋工学会東部支部秋季講演会2008年11月25日、東京 査読無
 2. Md. Mobesher Ahmmad and Y. Sumi Numerical simulation of strength and deformability of steel plates with surface pits and replicated corrosion-surface, *MARSTRUCT 2009*, Lisbon, March 16-18, 2009. 査読有
 3. Y. Kawamura, Y. Sumi and M. Nishimoto, A study on a method for maintenance of ship structures considering remaining life benefit, *MARSTRUCT 2009*, Lisbon, March 16-18, 2009. 査読有
 4. Y. Sumi, Computational approach for fatigue crack propagation in

ship structures under random clustered loading, XXII International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, Adelaide, Australia, August 24-29, 2008. 査読有

5. Y. Sumi, Computational approach for fatigue crack management in ship structures under random sequence of clustered loading, The 21st Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, Yokohama, Sept. 10-13, 2007. 査読無
6. Y. Sumi and T. Okawa, Crack paths from weld details in three-dimensional plate structures, The 2nd International Conference of Crack Paths (CP 2006), Parma, Italy, Sept. 14-16, 2006. 査読無

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称：き裂進展解析方法

発明者：角洋一、毛利雅志

権利者：横浜国立大学・(株) IHI

特許：特願2008-100524、

平成20年04月08日

○取得状況 (計0件)

[その他]

招待講演 (外国大学全3件、主要2件)

1. Fatigue Crack Management of Ship Structures under Random Sequence of Clustered Loading Maritime Engineering Seminar, April 30, 2009, Technical University of Denmark
2. Crack Propagation under random sequence of clustered loading, Solid Mechanics Seminar, April 28, 2009, D'Alembert Institute, University of Pierre and Marie Curie (Paris VI).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

角 洋一 (SUMI YOICHI)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：80107367

(2) 研究分担者

川村恭己 (KAWAMURA YASUMI)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：50262407

(H19→H20：連携研究者)

和田大志 (WADA TAISHI)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：60359700

(H19→H20：連携研究者)

(3) 連携研究者