

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 16 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010 年 10 月 20 日～2013 年 3 月 31 日

課題番号：22560149

研究課題名（和文） 安全・安心社会のための協調作業可能な三次元破壊力学解析統合プラットフォーム

研究課題名（英文） Three-dimensional fracture mechanics software platform enabling collaborative software development for building safe society

研究代表者

岡田 裕 (OKADA HIROSHI)

東京理科大学・理工学部・教授

研究者番号：50281738

研究成果の概要（和文）：多数の研究者・技術者が其々の目的においてカスタマイズ・協調作業可能な三次元破壊力学解析統合プラットフォームを構築すること目的として研究を遂行してきた。標準化されたデータフォーマットのもとで、完全自動き裂進展解析ソフトウェアの構築、非線形破壊力学解析のための J 積分プログラムの実装と解析、大規模データのハンドリング技術の構築した。それらを利用し、本ソフトウェアプラットフォームを利用し、研究者・技術者が様々なパートを分担しながら、協調して三次元破壊力学ソフトウェアを構築していくことが可能なことを実証できた。

研究成果の概要（英文）：This research has been performed under the purpose of developing a three-dimensional fracture mechanics analysis software platform that enables us to carry out a collaborative software development. Under a standardized data format, we successfully developed a fully automatic crack propagation analysis software, a J-integral program for nonlinear fracture mechanics analysis and a data handling technique to deal with large scale fracture mechanics analysis. It has been proven that researchers and engineers can develop three-dimensional fracture mechanics software under a collaborative manner.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2011 年度	500,000	150,000	650,000
2012 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：設計工学・機械機能要素・トライボロジー

科研費の分科・細目：設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：CAE・CAD, 大規模有限要素法解析, 安全・安心設計, 破壊力学

1. 研究開始当初の背景

現在、日本では原子力機器に代表されるエネルギー機器、高速道路や鉄道に代表される社会的インフラストラクチャーの経年化が進みつつある。例えば、現在稼働中の原子力発電所の多くは 1970 年代に建設され、その

設計寿命（35 年）を迎えつつある。また、東名高速道路や東海道新幹線は建設から 40 年以上経過している。これらのエネルギー機器や社会的インフラストラクチャーは無くってはならないものであるが、経年化による突然の故障や破壊の危険性が年々増すばかりで

ある。世界に目を向ければ、ミネアポリスの橋梁崩落などの事故が発生している。

社会的に重要なエネルギー機器やインフラストラクチャーの破壊事故を未然に防ぐためには、コンピュータシミュレーション技術を用いた経年構造物に対する構造健全性評価や余寿命予測が大変有用である。特に、構造のき裂損傷を適切に評価する破壊力学解析は大変重要な役割を果たすであろう。しかしながら、三次元破壊力学解析による、損傷を受けた実構造物の構造健全性や余寿命評価は、その作業に膨大な時間を要することから実用化に至っていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、多数の研究者・技術者が其々の目的においてカスタマイズ・協調作業可能な三次元破壊力学解析統合プラットフォームを構築することである。

本研究では、基本機能として三次元複雑構造物中の疲労き裂進展解析と過荷重による非線形（弾塑性）破壊力学問題の解析に的を絞った研究開発を行うが、提案する三次元破壊力学解析統合プラットフォームを利用すれば様々な機能拡張（例えば、クリープ環境下や溶接残留応力下の破壊力学解析）を簡単かつ高速に行うことができる。その結果、種々の三次元破壊力学解析による経年構造物の構造健全性や余寿命評価の実用化が可能になる。

3. 研究の方法

本研究では、3年の研究期間で「三次元大規模破壊力学解析統合プラットフォーム」の構築をしてきた。

平成22年度は、本研究の代表者らが今までに作成した関連のソフトウェア群を統合化し、仮システムの構築と非線形破壊力学解析システム構築のための準備を行った。次年度からは、大規模データハンドリング技術の確立、き裂解析システムの構築とテストを行った。さらに、実証計算（例題解析）を行った。解析は、主として並列PCクラスタを使用し行ってきた。

4. 研究成果

参考文献⁽¹⁾⁽²⁾に示す、き裂メッシュ自動生成プログラムをシステムの組み入れ、さらに、複数き裂問題とその合体まで考慮したプログラムシステムを構築した。そのプログラムシステム構成を図1に示す。

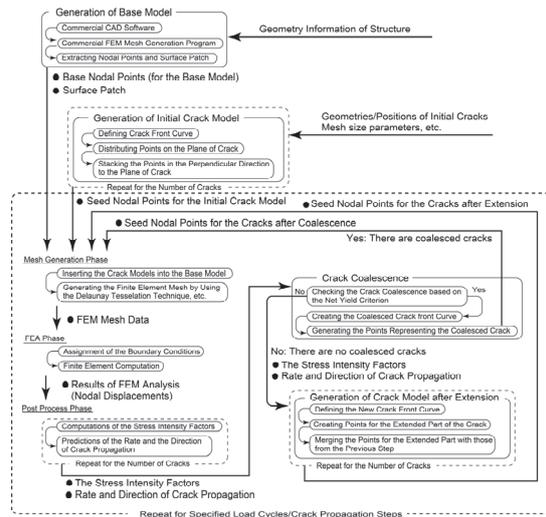


図1 複数き裂解析用のプログラムシステムの構成

図1に示す。

き裂の挿入には、論文⁽¹⁾⁽²⁾で提案した、点群データに基づくものを踏襲した。図2に点群に基づくき裂挿入手法の概要を示す。

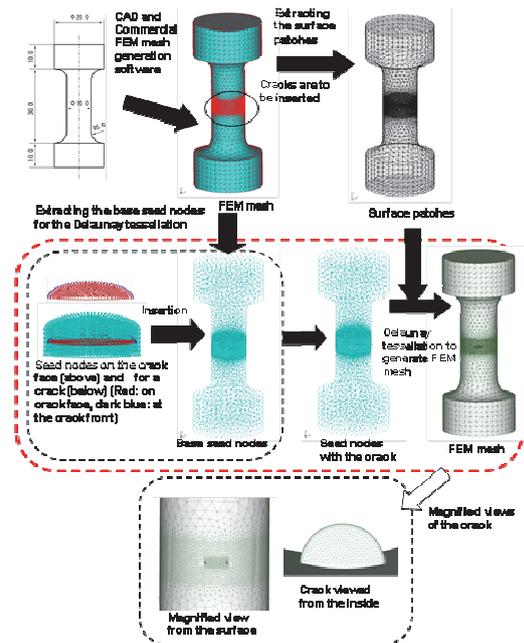


図2 点群をベースとしたメッシュき裂の挿入法

図2に示す、点群データに基づくき裂挿入手法では、CADデータなどから自動メッシュ生成ソフトウェア等を用い、一旦き裂を持たない解析モデルを生成する。き裂無し解析モデルから、表面パッチデータやき裂なし点群データを抜き出し、き裂に係る点群データを合体する。そして、デローニ分割法を利用

し、き裂を有する解析モデルを生成する。

き裂進展解析では、き裂の点群をアップデートすることでき裂形状のアップデートが可能である。例えば、図3に示すように、き裂進展による点群をき裂進展前の点群に追加していくことで、き裂進展後の点群を生成できる。

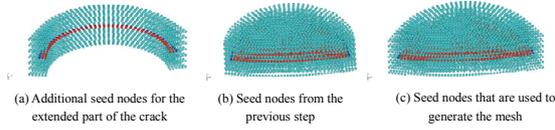


図3 進展後き裂点群の追加によるき裂点群のアップデート

き裂進展方向は、三次元的なキंक角 (φ) と傾じれ角 (ψ) を用い、図4のように表される。

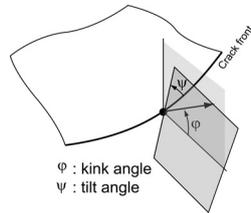


図4 き裂のキंक角 (φ) と傾じれ角 (ψ)

それらは、疲労き裂進展の場合、応力拡大係数振幅 (ΔK_I , ΔK_{II} , ΔK_{III}) によって、次式で表すことができる。

$$\varphi = - \left[140^\circ \left(\frac{|\Delta K_{II}|}{\Delta K_I + |\Delta K_{II}| + |\Delta K_{III}|} \right) - 70^\circ \left(\frac{|\Delta K_{II}|}{\Delta K_I + |\Delta K_{II}| + |\Delta K_{III}|} \right)^2 \right] \text{sgn}(\Delta K_{II} / \Delta K_I) \quad (1)$$

$$\psi = - \left[78^\circ \left(\frac{|\Delta K_{III}|}{\Delta K_I + |\Delta K_{II}| + |\Delta K_{III}|} \right) - 33^\circ \left(\frac{|\Delta K_{III}|}{\Delta K_I + |\Delta K_{II}| + |\Delta K_{III}|} \right)^2 \right] \text{sgn}(\Delta K_{III} / \Delta K_I) \quad (2)$$

ここで、式(1)と(2)はRichardら⁽³⁾によるものである。本研究では、主としてこれを採用している。他には、最大周方向応力説 (Eldogan and Sih⁽⁴⁾) などがある。なお、式(2)で示されたき裂の傾じれ角 (ψ) は、進展後のき裂の有限要素法解析モデル生成が困難なため、考慮しないこととした。

き裂進展則は、例えば、式(3)のように等価応力拡大係数振幅を定義し、さらに Paris 則 (式(4)) でき裂進展速度を予測する。

$$\Delta K_{eq} = \frac{\Delta K_I}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\Delta K_I^2 + 4(\alpha_1 \Delta K_{II})^2 + 4(\alpha_2 \Delta K_{III})^2}$$

$$(\alpha_1 = 1.155, \alpha_2 = 1) \quad (3)$$

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eq})^n \quad (4)$$

これらを用いて、繰返し混合モード負荷を受ける丸棒の表面き裂進展解析を行った例 (文献⁽⁵⁾) を示す。混合モード負荷を受ける表面き裂問題の概要と、き裂メッシュの進展の様相を図5, 6, 7に示す。これらの解析は本ソフトウェアプラットフォーム上で結合された各種ソフトウェアを用いて完全自動で実施したものである。

これらの問題の解析によって、キंकを有するようなき裂進展解析を、本ソフトウェアプラットフォームを用い、統合化されたソフトウェアで実施することができた。

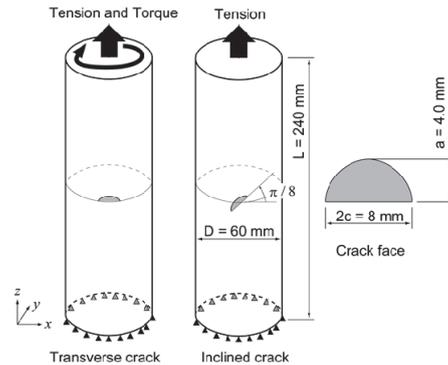
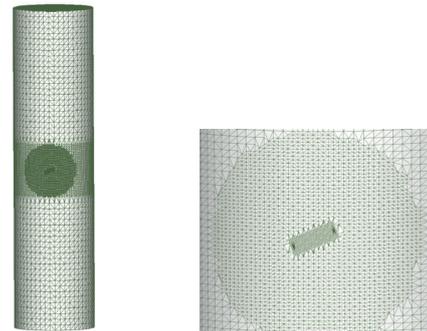


図5 混合モード繰返し(負荷を受ける丸棒(軸に垂直な初期き裂と傾いた初期き裂を仮定)



(a) 全体 (b) き裂付近の拡大



(c) 初期き裂メッシュ



(d) 15 ステップのき裂進展後のき裂メッシュ (667164 サイクル)

図6 繰返し軸荷重を受ける場合のき裂進展の様相 (初期き裂のときのメッシュ図と進展後のき裂メッシュ図)



(a) 初期き裂メッシュ



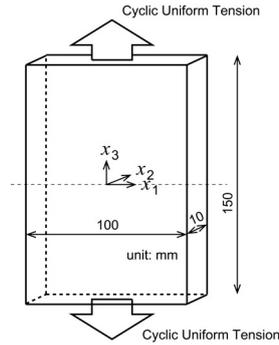
(b) 15 ステップのき裂進展後のき裂メッシュ (1126330 サイクル)

図7 繰返し複合負荷を受ける場合のき裂進展の様相 (初期き裂と進展後のき裂メッシュ図)

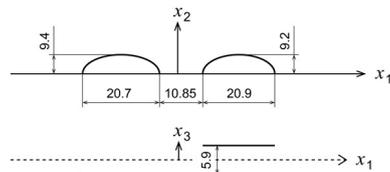
さらに、き裂の合体を考慮した解析も可能である。図8に示す繰返し面内荷重を受ける平板に対して、3個の同一面内のき裂や2個の段違い初期き裂を考慮した解析を行った例を示す。

段違いのき裂を仮定した場合は、2つのき裂が進展し、互いの距離が近づき、合体する。合体後は三次元的曲率を持ったき裂が、図9(c)のように生成される。同一面内に複数のき裂がある場合は、合体後、合体部分の応力拡大係数が大きくなり、進展が速く進む。そのため、浅く、幅の広いき裂へと成長していく。

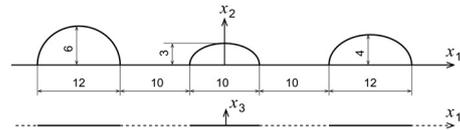
さらに、論文 (Kaneko, Okada, Kawai⁽⁶⁾) 中では、Leek⁽⁷⁾の実験結果とも比較し、本研究で行った解析結果が妥当であることを示している。



(a) 板全体の寸法と荷重

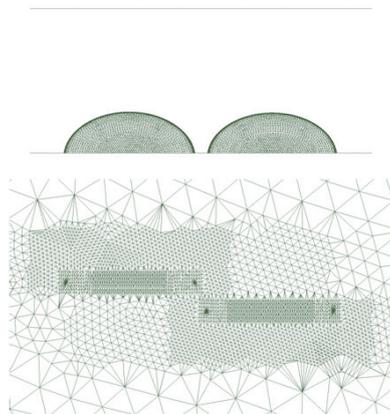


(b) 段違いの初期き裂



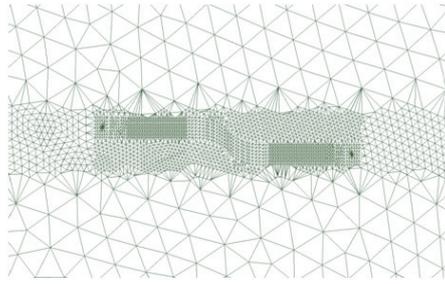
(c) 初期き裂を3つ仮定した場合

図8 繰返し面内荷重を受ける複数の初期き裂を有する平板

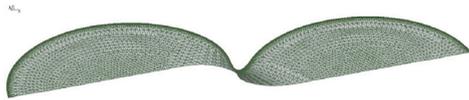


(a) 合体直前のメッシュ図 (き裂面と板表面)





(b) 合体直後のメッシュ図 (き裂面と板表面)



(c) き裂面の三次元的形状

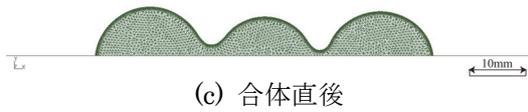
図9 段違いき裂の進展と合体



(a) 初期き裂



(b) 合体直前



(c) 合体直後



(d) 浅く長いき裂への成長

図10 三個の同一面内き裂の進展と合体

非線形問題への拡張では、当初の予定通り J 積分プログラムを開発し、統合化プラットフォーム上でき裂解析システムに組み込むことができた。なお、J 積分計算の実装には、式(5)で示す、領域積分法を用いた。

$$J = -\frac{1}{\delta A} \int_V \left(W \delta_{ki} - \sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} \right) \frac{\partial q_k}{\partial x_i} dV \quad (5)$$

式(5)で、 δA と V はき裂前縁の仮想き裂進展面積と領域積分の積分領域である。 W 、 σ_{ij} と u_i はひずみエネルギー密度、応力テンソル、変位ベクトルである。 q_k はき裂前縁で仮想き裂進展を表し、積分領域内で $q_k \neq 0$ であり、連続かつ区部的に一回微分可能なベクトルである。 x_i は空間内の座標を表す。

J 積分の実装にあたり、積分領域の大きさを解析精度の関係とキックしたき裂の取り扱いについて徹底的に考察を行った。四面体二次要素を使用したき裂のモデリングでは、六面体有限要素を用いた場合と比べて大きな積分領域を設定することが必要であることが明らかになった。また、積分領域の外形は図11に示すような滑らかな形状ではない。これは、自動メッシュ生成を利用しているので、要素配置がいわゆるマップドメッシュになっていないためである(Okada and Ohata⁽⁸⁾)。

大変形問題への拡張では、積分領域や仮想き裂進展面積を初期配置に基づく V_o と δA_o を使用し、ひずみエネルギー密度を初期配置に基づく W_o 、コーシー応力に替わり第一 Piola-Kirchhoff 応力 π_{ij} とし、材料点座標も初期配置に基づく X_i を用いる。すなわち、式(6)のようになる。

$$J = -\frac{1}{\delta A_o} \int_{V_o} \left(W_o \delta_{ki} - \pi_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial X_k} \right) \frac{\partial q_k}{\partial X_i} dV_o \quad (6)$$

構成方程式に超弾性体を仮定して、き裂解析を行い、積分領域の大きさに依らず、ほぼ一定値を得ることができた。図12に仮定したCT試験片の解析条件、メッシュ分割の外観を示す。超弾性解析では Neo-Hookean モデルで行った。弾性ポテンシャル関数は偏差部分 W_{dev} と体積部分 W_{vol} に分けて $W=W_{dev}+W_{vol}$ と表わす。ここで、 $W_{vol} = 9K(I_{III}^{1/6} - 1)^2/2$ とし、材料定数 C_{10} と右コーシーグリーンテンソルの低減不変量 \tilde{I}_C と体積弾性率 K をそれぞれ $c_{10} = E/4(1+\nu) = 39.6\text{GPa}$ 、 $\tilde{I}_C = I_C/(III_C)^{1/3}$ 、 $K = E/3(1-2\nu) = 171.7\text{GPa}$ とする。用いている I_C と III_C はそれぞれ右コーシーグリーンテンソル \mathbf{C} の第一不変量と第三不変量である。右コーシーグリーンテンソル \mathbf{C} は変形勾配 \mathbf{F} を用いて $\mathbf{C} = \mathbf{F}^T \cdot \mathbf{F}$ と表現する。また、応力とひずみの関係は第二ピオラキルヒホッフ応力 \mathbf{S} とグリーンラグランジュひずみ \mathbf{E} を用いて $\mathbf{S} = \partial W / \partial \mathbf{E}$ で表す。解析モデルは $h=61.88\text{mm}$ 、 $w=50.80\text{mm}$ 、 $t=12.50\text{mm}$ 、 $l=20.32\text{mm}$ であ

る. 点 O を原点とし, 拘束条件は点(0, 8.7, 0), (0, 53.18, 0), (0, 8.7, 12.5)を x 方向に, 点(0, 8.7, 0)を z 方向に固定し, $x=0, y=8.7$ 上の点を y 方向に固定し, $x=0, y=53.18$ 上の点に y 方向にき裂開口変位($B-A$)が 8mm になるように強制変位をかける. 四面体二次要素を使用し, 総節点数と総要素数はそれぞれ 593309 と 424367 である. 積分領域はき裂前縁の要素の代表寸法 $\Delta crack=0.0651\text{mm}$ に対して, 積分領域の幅を一定して, 半径を r に対して $r/\Delta crack$ を 20~700 と変化させた. J 積分計算結果を, 図 13 に示す. 積分半径を大きく変えても J 積分値は変わらない. 極めて良好な積分領域独立性が得られている. このことより, J 積分計算式の手法が妥当であることが言える.

弾性大変形問題への拡張では, 比例負荷の仮定が成立しなくなるので, 式(6)に加えて, ひずみエネルギー密度の空間微係数を含む項を精度良く求める必要がある (式 (7)). しかし, き裂のごく近傍での計算精度に問題があるため, 現在検討中である.

$$J = -\frac{1}{\delta A_o} \left[\int_{V_o} \left(W_o \delta_{ki} - \pi_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial X_k} \right) \frac{\partial q_k}{\partial X_i} dV_o \right. \quad (7)$$

$$\left. + \int_{V_o} \left(\frac{\partial W_o}{\partial X_i} \delta_{ki} - \frac{\partial}{\partial X_i} \left[\pi_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial X_k} \right] \right) q_k dV_o \right]$$

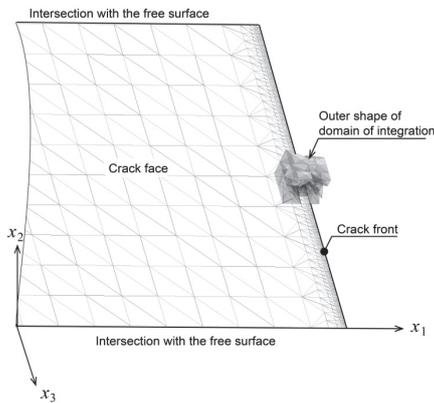


図 11 典型的な積分領域外形とき裂面の例

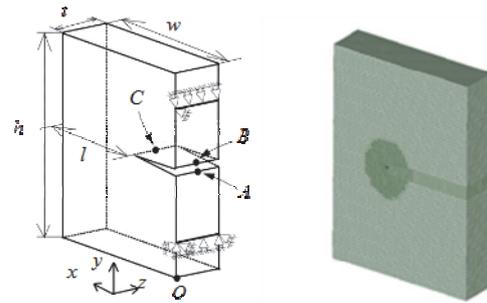


図 12 CT 試験片を仮定した解析モデルとメッシュ分割外観

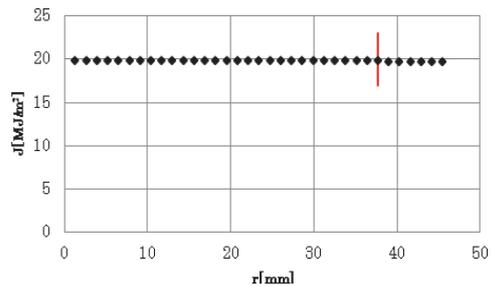


図 13 積分領域半径と J 積分値の関係

大規模き裂問題に対しては, データ転送がボトルネックになることを想定した開発を行ってきた. 解析結果のうち, 応力拡大係数計算に関係する, き裂のごく近傍の節点や要素が保持変位や応力, ひずみエネルギー密度などをリモートサイトのスーパーコンピュータからローカルサイトの PC/ワークステーションに転送し, き裂パラメータを計算する手法を構築した.

例えば, 半楕円表面き裂の場合, き裂パラメータ解析に必要なデータを保持する節点や要素は, 図 14 に示すようにき裂前縁のごく近傍のものだけである. これにより, 解析モデル全体が億単位の自由度を持っていても, ローカルサイトの PC/ワークステーションで容易に破壊力学パラメータの解析と, き裂進展方向と速度の予測が可能になる.

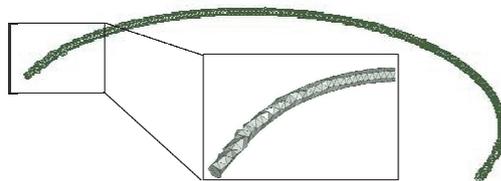


図 14 き裂パラメータ計算に必要なデータを保持する節点や要素

以上のように様々な研究開発を行うことに成功している. これらは, 協調作業可能な三次元破壊力学解析統合プラットフォーム上で数名の大学院生と協調しながら, 様々な

機能を持つソフトウェアを構築することができたためである。開発チームが、協調しながらも、様々なソフトウェアを同時進行的に開発していくことができ、例題計算に成功している。このような意味で、本研究は所定の成果を挙げる事ができたと言える。

参考文献

- (1) 徳田貴志, 河合浩志, 岡田裕, 福井泰好, 三次元き裂進展自動解析システムの構築 (第1報, き裂解析システムの概要と有限要素法モデル生成), 日本機械学会論文集 A 編, 第76巻, 770号, pp. 1255-1262, 2010.
- (2) 岡田裕, 河合浩志, 徳田貴志, 福井泰好, 三次元き裂進展自動解析システムの構築 (第2報, き裂進展解析システムとき裂進用有限要素法モデル生成), 日本機械学会論文集 A 編, 第76巻, 772号, pp. 1681-1688, 2010.
- (3) H. A. Richard, M. Fulland, F. G. Buchholz, M. Schöllmann, 3D fracture criteria for structures with cracks, Steel Research, Vol. 74 (2003), pp. 491-497.
- (4) F. Erdogan, and G. C. Sih, On the Crack Extension in Plates under Plane Loading and Transverse Shear, J. Basic Engng, Vol. 85 (1963), pp. 519-527.
- (5) H. Okada, H. Kawai, T. Tokuda and Y. Fukui, Fully automated mixed mode crack propagation analyses based on tetrahedral finite element and VCCM (virtual crack closure-integral method), International Journal of Fatigue, Vol. 50 (2013), pp. 33-39.
- (6) S. Kaneko, H. Okada, H. Kawai, Development of Automated Crack Propagation Analysis System (Multiple Cracks and their Coalescence), JCST Journal of Computational Science and Technology, Vol. 6(2012) No. 3, pp.97-112.
- (7) T.H. Leek and I.C. Howard, An examination of method of assessing interacting surface cracks by comparison with experimental data, Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol. 68 (1996), pp. 181-201.
- (8) H. Okada and S. Ohata, Three-dimensional J-integral evaluation for cracks with arbitrary curvatures and kinks based on domain integral method for quadratic tetrahedral finite element, Engineering Fracture Mechanics, 投稿中.
- (9) 越間 哲也, 岡田 裕, 大変形問題における J 積分計算に関する研究 (自動メッシュ生成された四面体二次要素による計算), 日本機械学会第25回計算力学講演会 (CMD2012) (2012), CD-ROM.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① Kota Sugawara, Hirohito Koya, Hiroshi Okada, Yinsheng Li, Kazuya Osakabe, Hiroshi Kawai, Fully automatic SCC and fatigue crack propagation analyses on deep semi-elliptical flaws, Proceedings of the ASME 2013 Vessels and Piping Division Conference, (2013). PVP2013-97678. (採択済み) (査読有り)
- ② Hiroshi Okada, Hiroshi Kawai, Takashi Tokuda and Yasuyoshi Fukui, Fully automated mixed mode crack propagation analyses based on tetrahedral finite element and VCCM (virtual crack closure-integral method), International Journal of Fatigue, Vol. 50, 2013, Pages 33-39, 2013. (査読有り)
- ③ Shuhei Kaneko, Hiroshi Okada, Hiroshi Kawai, Development of Automated Crack Propagation Analysis System (Multiple Cracks and their Coalescence), JCST Journal of Computational Science and Technology, Vol. 6(2012) No. 3, pp.97-112. (査読有り)
- ④ Hiroshi Okada, Hirohito Koya, Hiroshi Kawai, Yinsheng Li Computations of stress intensity factors for deep cracks in plates by using the tetrahedral finite element, Proceedings of the ASME 2012 Pressure Vessels and Piping Division Conference, (2012). PVP2012-78580. (査読有り)

[学会発表] (計11件)

- ① H. Okada, Development of crack propagation analysis software system using the tetrahedral finite element and remeshings, 4th International Conference on Computational Methods (ICCM2012), Thematic Plenary Lecture, 2012, (2012年11月27日, ゴールドコースト, オーストラリア).
- ② S. Kaneko, H. Okada, H. Kawai, Analysis of Multiple Crack Propagation and their Coalescence using the Automatic Meshing Technique for Quadratic Tetrahedral Finite Element, 4th International Conference on Computational Methods (ICCM2012), 2012, (2012年11月26日, ゴールドコースト, オーストラリア).

- ③ 越間 哲也, 岡田 裕, 大変形問題における J 積分計算に関する研究 (自動メッシュ生成された四面体二次要素による計算), 日本機械学会第 25 回計算力学講演会 (CMD2012) (2012), CD-ROM, (2012 年 10 月 8 日, 神戸).
- ④ H. Okada, S. Ohata, R. Daimon, J and Interaction Integral Evaluation using the Tetrahedral Finite Element, JSME-CMD ICMS2012 in Kobe International Computational Mechanics Symposium 2012, 2012 (2012 年 10 月 11 日, 神戸).
- ⑤ R. Daimon, H. Okada, INTERACTION INTEGRAL METHOD FOR THE QUADRATIC TETRAHEDRAL FINITE ELEMENT WITH CORRECTION TERMS, 10th World Congress on Computational Mechanics, 2012 (2012 年 7 月 12 日, サンパウロ, ブラジル).
- ⑥ H. Okada, H. Kawai, Y. Tanaka, S. Kaneko, K. Ogawa, ON THE DEVELOPMENT OF CRACK PROPAGATION ANALYSIS SYSTEM FOR COMPLEX SHAPED STRUCTURE WITH ARBITRARY SHAPED AND PLURAL CRACKS, 10th World Congress on Computational Mechanics, 2012, (2012 年 7 月 12 日, サンパウロ, ブラジル).
- ⑦ 大門龍太郎, 岡田裕, 補正項を用いた四面体二次要素用相互積分法を用いた混合モードき裂解析, 第 17 回 計算工学講演会論文集 (CD-ROM), 2012, (2012 年 5 月 30 日, 京都).
- ⑧ 大畑将吾, 岡田裕, 四面体二次要素を用いた領域積分法による三次元 J 積分に関する研究, 第 17 回 計算工学講演会論文集 (CD-ROM), 2012 (2012 年 5 月 30 日, 京都).
- ⑨ H. Okada, H. Kawai, Y. Tanaka, S. Kaneko, K. Ogawa, Crack propagation analyses of arbitrary shaped and plural cracks, ICCES' 12 (International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences), 2012, (2012 年 5 月 1 日, クレタ, ギリシャ).
- ⑩ H. Okada, H. Kawai, S. Kaneko, S. Ohata, K. Satoh, R. Daimon, Crack Propagation Analysis System based on Virtual Crack Closure-Integral Method and Delaunay Tessellation Technique for Tetrahedral Finite Element, ICMR2011 International Conference on Materials and Reliability 2011, 2011, (2011 年 11 月 21 日, プサン, 韓国).
- ⑪ 岡田 裕, 佐藤 皓明, 大畑 将吾, 大規模三次元非線形破壊力学解析用 J 積分計算手法 (マップドメッシュの不要なテト

ラ要素用 J 積分), 第 24 回 日本機械学会計算力学講演会 CD-ROM, 2011, (2011 年 10 月 9 日, 岡山).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡田 裕 (OKADA Hiorshi)
 東京理科大学・理工学部・教授
 研究者番号 : 50281738