様　式　C－１９、F－１９－１、Z－１９　(共通)

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

令和　　元 年　　６ 月 １９ 日現在

機関番号：３２６６０
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2016～2018
課題番号：１６Ｋ０５９８８

研究課題名（和文）溶接接合部の材料不均一性を考慮した非線形破壊力学解析

研究課題名（英文）Nonlinear fracture mechanics analyses considering the material nonuniformities in and the vicinities of welded joints

研究代表者

岡田　裕（Okada, Hiroshi）

東京理科大学・理工学部機械工学科・教授

研究者番号：５０２８１７３８

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,700,000円

研究成果の概要（和文）：　溶接構造物の破壊は多くの場合で溶接継手とその近傍が起点となる．溶接継手とその近傍では，溶接施工時の熱履歴の影響による残留応力や材料の機械的性質が分布する．従来の金属材料に対する破壊力学手法は多くの場合で材料が一様であることを仮定し，体系化されてきた．材料が決して一様でなく，残留応力が分布し，さらに破壊前に大変形をする溶接継手とその周辺の破壊力学評価のために，本研究では，新しいJ積分法と相互積分法による応力拡大係数計算手法を提案してきた．数値解析例からはそれらの経路独立性が示されている．さらに，溶接継手中のボイドなどの欠陥を簡便にモデル化するための反復型重合メッシュ法の提案もした．

研究成果の学術的意義や社会的意義
　発電プラント構造物や機器，船舶，橋梁等，社会的に重要なインフラ構造物の多くが溶接構造物である．溶接構造物の多くで溶接継手とその近傍が破壊の起点である．そのため，溶接継手とその周辺から発生する疲労き裂の力学的評価は大変重要な課題である．本研究では，溶接継手とその周辺のき裂損傷に対する破壊力学評価手法の高度化と体系化により，学術的貢献をするとともに，社会的に重要なインフラ構造物の安全性と信頼性向上に寄与するものである．本研究では，破壊力学解析手法として，J積分法や相互積分法の高度化に成功し，溶接欠陥の簡便なモデル化のために反復型重合メッシュ法による材料・幾何学的非線形解析を提案した．

研究成果の概要（英文）：The failures of welded structures, in many cases, initiate from their welded joints and their vicinities. The weld processes generate the weld residual stresses. The material properties may vary in the joints and their vicinities due to the complex temperature and deformation histories. In the past, many fracture mechanics methodologies have been developed for homogeneous materials. In order for us to apply them to the fracture evaluations of cracks in and in the vicinity of welded joints, the fracture mechanics methodologies need certain extensions. In the present investigation, we successfully developed new J-integral formulations for infinitesimally small deformation and for finite deformation problems with spatially varying mechanical properties. Furthermore, an iterative s-Version Finite Element Method for material and geometrical nonlinear problems was proposed in the investigation.

研究分野：計算破壊力学

キーワード：非線形破壊力学　溶接接手　J積分　応力拡大係数　相互積分法　有限要素法

様　式　C－１９、F－１９－１、Z－１９、CK－１９（共通）

１．研究開始当初の背景

計算破壊力学の歴史は長く, 非線形問題への適用も数多く行われてきた. しかし, 多くの場合, 材料は一様かつ微小変形問題を仮定するなど様々な単純化のもとで実施される. 例えば, 非線形破壊力学で多用される領域積分法による J 積分評価式は暗黙のうちに材料は一様, 弾塑性体の場合は比例負荷状態, 積分領域はき裂前縁を囲む筒状の領域と仮定することが多い.

一方, 溶接接合部では材料の溶融・混ざり合い, 熱影響部材料特性の変化, 残留応力の分布, 溶接施工時に発生するボイド等溶接欠陥などがあり, 決して単純ではない. 溶接接合の種類は様々であるが, 破壊力学を含む強度解析で多くの共通項目がある. 溶接部近傍の力学評価を精密に行うためには, 溶接残留応力に加え材料内部で材料の機械的性質や残留応力の連続／不連続な空間的分布を考慮することが必須である.

以上の理由により, 本研究の開始にあたり, (a) 溶接部の弾性定数・降伏応力や硬化係数・残留応力が連続／不連続に変化する場合に対し, J 積分と相互積分法計算法の厳密な定式化, (b) 高精度な計算を可能にするプログラム実装, (c) 微小空孔（ボイド）等の欠陥モデリングのためのマルチスケール解析手法に関する研究の推進が必要と考えられた.

２．研究の目的

材料内部でその機械的性質や残留応力が連続的に変化する問題に対する学術的な取り組みは, 傾斜機能材料の力学として取り扱われてきた. 本研究の取り組みは傾斜機能材料の力学解析の高度化という観点から学術的に大変意義あるものである. 研究代表者は, 四面体有限要素を用いた高精度な応力拡大計算とき裂進展解析のための自動メッシュ生成手法を提案してきた. さらに, 大変形弾塑性問題でも経路独立性を担保可能な J 積分評価式とその実装法を示した. また, 材料中に存在する多数の介在物やボイドをモデル化する重合メッシュ法によるマルチスケール解析に関する研究も行ってきた. それらの経験・知識に基づき, 傾斜機能材料や溶接部の破壊力学解析評価の研究を推進し, 高精度な破壊力学パラメータ計算と溶接欠陥を考慮した溶接部の重合メッシュ法解析を可能にすることが本研究の目的である.

３．研究の方法

本研究代表者が研究してきた J 積分や相互積分計算法を材料の機械的性質が連続または不連続に変化する問題に対して拡張する. その際, J 積分法や相互積分法の第二積分の取り扱いについて新しい提案をしていく. 一方, 材料中の微小欠陥をモデル化するための反復型重合メッシュ法では, 平成 27 年度までに実施した予備研究（二次元線形弾性問題）の成果に基づき三次元・材料非線形問題にスケールアップを行う. 反復型重合メッシュ法の反復解法の高速化を分離型連成解析法による大規模非線形解析の知見を活用して進めていく. それらは, 溶接接合部の損傷解析シミュレータ構築の基盤技術となる.

４．研究成果

(1) J 積分解析手法の高度化研究

従来, 非線形破壊力学パラメータとして, き裂進展に伴うエネルギ解放率を表す J 積分は, 一様材料と微小変形を仮定した定式化が行われてきた. 本研究ではその仮定を取り除き, かつ, 高精度な J 積分計算を可能にする手法の提案を行ってきた. 一様材料の仮定が無い場合, 領域積分法に基づく J 積分は, 弾性問題で現れる第一積分に加え, 材料の非均一性や弾塑性問題で比例負荷状態からの逸脱の結果として現れる第二積分からなる.

$$J_{3D} = -\frac{1}{\Delta A}\left[\int_V \left(W\delta_{ik} - \sigma_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial x_k}\right)\frac{\partial q_k}{\partial x_i}\mathrm{d}V + \int_V \left(\frac{\partial W}{\partial x_k} - \sigma_{ij}\frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_k}\right) q_k \mathrm{d}V\right] \tag{1}$$

ここで, V は積分領域, ΔA は仮想き裂進展面積, q_k は仮想き裂進展ベクトルである. また, $W\left(=\int_o^{\varepsilon_{ij}}\sigma_{ij}\,d\bar{\varepsilon}_{ij}\right)$, δ_{ij}, σ_{ij}, u_i, x_i はひずみエネルギ密度, クロネッカーのデルタ, 応力, 変位, 座標を表す. なお, ε_{ij} はひずみである.

第二積分はひずみエネルギ密度や変位こう配の微係数を含むため, それらの精度が悪化することで J 積分計算精度に悪影響をおよぼすだけでなく, 計算アルゴリズムに局所最小二乗法を用いるなどするため計算アルゴリズムも煩雑になる. 本研究では材料の機械的性質の連続変化がある場合でも一定条件下で比例負荷状態となり, 非線形感度解析の考え方に基づき非線形問題でのひずみエネルギ密度の微係数の計算が可能なことを見出している. その結果, 次の J 積分計算式を導いた（雑誌論文①).

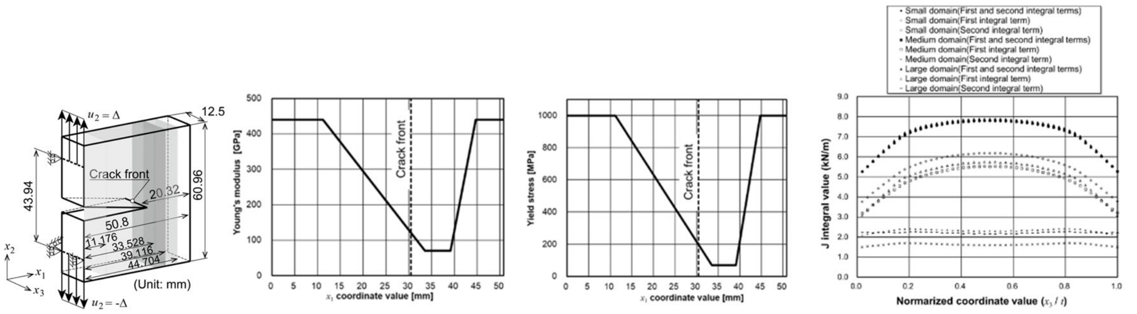
$$J_{3D} = -\frac{1}{\Delta A}\left[\int_V \left(W\delta_{ik} - \sigma_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial x_k}\right)\frac{\partial q_k}{\partial x_i}\mathrm{d}V + \int_V \frac{\partial W\left(\eta_m(x),\ \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathrm{const.}\right)}{\partial x_k} q_k \mathrm{d}V\right] \tag{2}$$

図 1（a）と（b）に示す CT 試験片と試験片内部で降伏応力とヤング率が図中 x_1 座標の関数として変化する場合を仮定した. 図 1（c）は, 算出したき裂前縁位置の J 積分値を示す. 図 1（c）からは提案手法を用いれば, 異なる大きさ（大, 中, 小）の積分領域によるよる J 分解析結果が

ほぼ一定であることがわかる．一方，従来法，すなわち式（2）中の第一積分だけを用いた場合，得られる J 積分値は積分領域の大きさに大きく依存するる．すなわち，式（2）右辺の第二積分を適切に計算することによって式（2）右辺全体として積分領域の大きさに依らず，得られた J 積分値が一定になる．経路独立性を有する定式化に成功したことが示された．

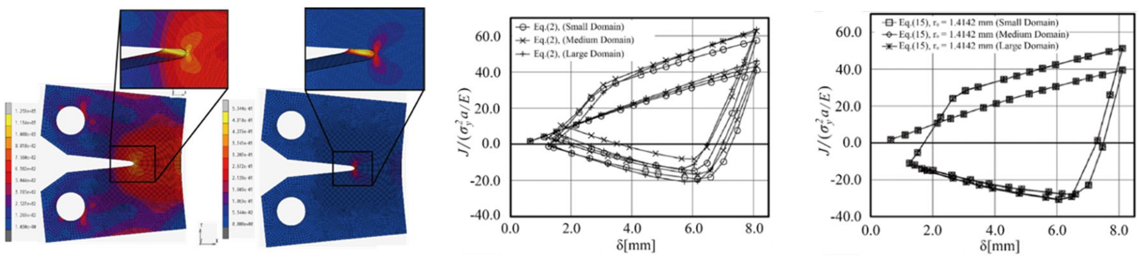
次に，有限変形問題では一様な弾塑性体であっても比例負荷状態とならない．はじめに，任意の変形履歴を受ける有限変形弾塑性問題でも経路独立性が保証される新しい J 積分法を提案した（雑誌論文②）．この J 積分は，き裂前縁近傍に設定した微小だが有限な領域V_ε^o内部へと，単位面積あたりのき裂進展で散逸していくエネルギを表す．また，き裂のごく近傍の領域V_ε^oを，式(3)第二積分の積分領域から除外したため，ひずみエネルギ密度や変位こう配の微係数をき裂のごく近傍で解析する必要がなく、高精度な数値計算の実施が可能になる．その結果，図２に示すような，繰返し負荷を受けるため，き裂近傍で降伏応力が大きく変化する場合でも経路独立性が保証されることを実証した（雑誌論文②）．

$$G = J = -\frac{1}{\Delta A}\left[\int_{V^0}\left(W^0\delta_{i1} - \Pi_{ij}\frac{\partial u_j}{\partial X_1}\right)\frac{\partial q(\boldsymbol{X})}{\partial X_i}\mathrm{d}V^0 + \int_{V^0 - V_\varepsilon^0} q(\boldsymbol{X})\left(\frac{\partial W^0}{\partial X_1} - \Pi_{ij}\frac{\partial^2 u_j}{\partial X_i \partial X_1}\right)\mathrm{d}V^0\right] \tag{3}$$



(a) CT 試験片寸法　　(b) 弾性率や降伏応力と x_1 座標の関係　　(c) J 積分値の板厚方向分布

図１　微小変形問題を仮定した、材料内で弾性率や降伏応力が変化する場合の例題解析



(a) 塑性ひずみ　　(b)相当応力　　(c) 第一積分だけの結果　　(d) 提案手法の結果

図 2 繰返し負荷を受ける有限変形問題の J 積分解析

(2) 反復型重合メッシュ法の高度化研究

重合メッシュ法は，構造形状を表すグローバルモデルと局所形状を表すローカルモデルを連成することで,孔,欠陥,き裂などの局所形状を有する構造の解析を容易にする解析手法である．しかし，グローバルモデルとローカルモデルの連成効果を表す結合剛性マトリックスの生成のためのプログラム実装は大変煩雑であり多大な計算量が必要となる．本研究で採用する反復型重合メッシュ法はグローバルモデルとローカルモデルの解析を交互に反復することで解を求める．先行研究により，二次元線形弾性問題に対して良好な精度と収束性を確認済みである．

はじめに二次元弾性問題での先行研究の成果に基づき，(1) 三次元問題と(2) 複数のローカルメッシュ領域を有する場合への展開を行った．すなわち，二次元問題からのスケールアップである．それらの成果は雑誌論文④と⑤で公表済みである．図 3 に複数のローカルメッシュ領域を有する場合の三次元弾性解析結果の例を示す．ガスタービンブレードを模したモデルに多数の冷却孔を仮定したときの応力分布である．多数の円孔の近傍の応力集中を評価できた．

続けて，反復型重合メッシュ法を幾何学的非線形問題および材料非線形問題へ展開した(学会発表⑩⑬)．このような非線形問題は増分法によって解析される．そのため，図 4 のように各増分ステップ中でグローバルメッシュとローカルメッシュの間で反復計算を行う．非線形解析の中での，グローバル／ローカル反復計算アルゴリズムの構築が問題となる．最も一般的な非線形解析アルゴリズムであるニュートンラプソン法を一番内側の反復ループに用いることで，非線形解析用反復型重合メッシュ法のアルゴリズム構築と実装に成功した．

さらに，開発した非線形解析用反復型重合メッシュ法を用い，内部に欠陥を有する溶接継手の引張解析を実施した．その結果，溶接継手内部の空洞などの欠陥を簡便にモデル化し，大変形弾塑性解析を実施することが可能になった．図 5 に三個の球状欠陥を仮定した溶接継手の相当塑

性ひずみ分布を示す．欠陥の存在が塑性域の形成過程に影響を与えていることが見て取れる．
　以上の成果から，溶接継手内部の空孔等欠陥の重合メッシュ法による簡便なモデル化が可能になったといえる．

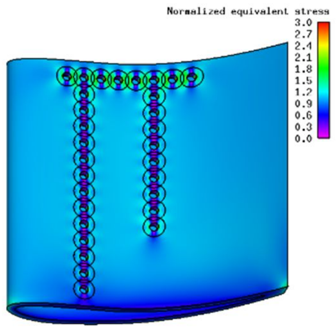


図 3　多くの丸孔を有するガスタービン・タービンブレードを模した構造の相当応力分布

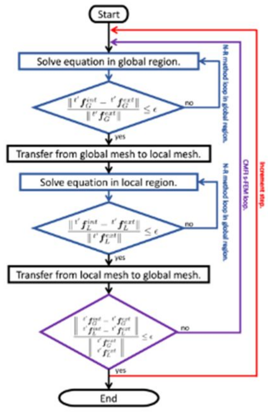


図 4　非線形反復型重合メッシュ法の解析アルゴリズム

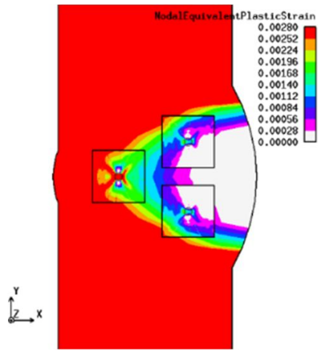


図　5　溶接継手中に 3 箇所の欠陥（ボイド）を仮定した解析の相当塑性ひずみ分布

(3)　相互積分法解析手法の高度化研究
　弾性係数の空間的変化と残留応力の分布を考慮した，相互積分法による応力拡大係数計算法の定式化とプログラム実装を行った．成果は既に国際会議で発表ずみである（学会発表⑥）．
　本研究では研究代表者らによる，三次元四面体有限要素用の相互積分法と材料の機械的性質の連続変化を許容する J 積分法に基づき，相互積分法の定式化とプログラム実装を行ってきた．相互積分法では，有限要素法解析の解である実場，き裂の漸近解である補助場の二つの弾性解を使用する．本報告書では，上付きの(1)は実場，(2)は補助場である．提案手法では一様材料の定式化で現れる第一積分に加え，材料の機械的性質の変化を表現する第二積分が含まれている．

$$\frac{2K_I^{(1)}K_I^{(2)}}{E'}+\frac{2K_{II}^{(1)}K_{II}^{(2)}}{E'}+\frac{2K_{III}^{(1)}K_{III}^{(2)}}{G}=-\frac{1}{\Delta A}\int_V\left(W^{(1,2)}\delta_{1i}-\sigma_{ij}^{(1)}\frac{\partial u^{(2)}}{\partial x_1}-\sigma_{ij}^{(2)}\frac{\partial u^{(1)}}{\partial x_1}\right)\frac{\partial q}{\partial x_i}\mathrm{d}V -\frac{1}{\Delta A}\int_V\left(\frac{\partial W^{(1,2)}}{\partial x_1}-\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\sigma_{ij}^{(1)}\frac{\partial u^{(2)}}{\partial x_1}\right]-\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\sigma_{ij}^{(2)}\frac{\partial u^{(1)}}{\partial x_1}\right]\right)q\mathrm{d}V \quad (4)$$

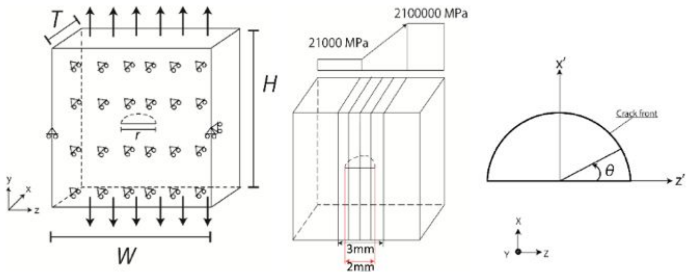
ここで，$D_{ijkl}(\boldsymbol{x})$ と D_{ijkl}^{tip} は材料点位置に依存する弾性定数とき裂前縁（先端）での弾性定数を表す．$K_I^{(1)}$，$K_{II}^{(1)}$，$K_{III}^{(1)}$ と $K_I^{(2)}$，$K_{II}^{(2)}$，$K_{III}^{(2)}$ は実場と補助場のモード I，II，III、応力拡大係数である．$W^{(1,2)}\left(=D_{ijkl}^{tip}\varepsilon_{ij}^{(1)}\varepsilon_{kl}^{(2)}\right)$ はひずみエネルギ密度に関わる量である．$\sigma_{ij}^{(1)}$ と $\sigma_{ij}^{(2)}$，$\varepsilon_{ij}^{(1)}$ と $\varepsilon_{ij}^{(2)}$，$u_i^{(1)}$ と $u_i^{(2)}$ はそれぞれ応力，ひずみ，変位である．式(4)では，補助場の弾性定数や使用するき裂の漸近解の選択に任意性がある．その選択の仕方により，いくつかの異なる定式化が可能である．本研究では，補助場の変位 $u_i^{(2)}$ を $K_I^{(2)}$，$K_{II}^{(2)}$ 又は $K_{III}^{(2)}$ に対応する漸近解として与え，それに対応するひずみ $\varepsilon_{ij}^{(2)}$ により計算し，応力 $\sigma_{ij}^{(2)}$ をき裂前縁部の弾性定数 D_{ijkl}^{tip} を用いて計算する（$\sigma_{ij}^{(2)}=D_{ijkl}^{tip}\varepsilon_{kl}^{(2)}$）．それらの結果，次式を導くことができた．

$$\frac{2K_I^{(1)}K_I^{(2)}}{E'}+\frac{2K_{II}^{(1)}K_{II}^{(2)}}{E'}+\frac{2K_{III}^{(1)}K_{III}^{(2)}}{G} =-\frac{1}{\Delta A}\int_V\left(W^{(1,2)}\delta_{1i}-\sigma_{ij}^{(1)}\frac{\partial u^{(2)}}{\partial x_1}-\sigma_{ij}^{(2)}\frac{\partial u^{(1)}}{\partial x_1}\right)\frac{\partial q}{\partial x_i}\mathrm{d}V-\frac{1}{\Delta A}\int_V\left(D_{ijkl}^{tip}-D_{ijkl}(\boldsymbol{x})\right)\varepsilon_{kl}^{(1)}\frac{\partial\varepsilon_{ij}^{(2)}}{\partial x_1}q\mathrm{d}V \quad (5)$$

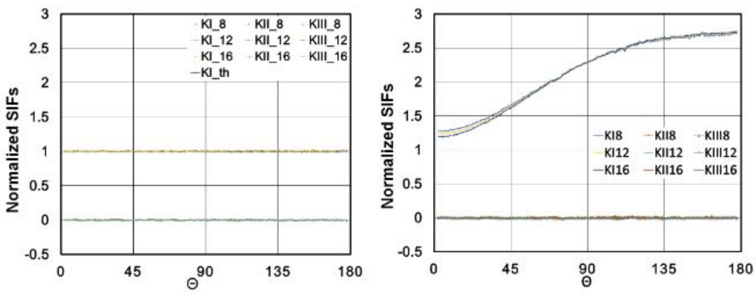
式(5)の第二積分には $\left(D_{ijkl}(\boldsymbol{x})-D_{ijkl}^{tip}\right)$ が含まれている．この項はき裂先端からの距離 r に比例する量として，き裂前縁（先端）でゼロとなる．そのため，第二積分中の被積分関数の特異性は $1/r$ となり，数値積分可能なものである．領域積分法を実施する際は，き裂前縁に接する要素の弾性定数 $D_{ijkl}(\boldsymbol{x})$ にき裂前縁位置での D_{ijkl}^{tip} を与え，き裂前縁要素に対する第二積分を不要としている．
　この定式化を利用し，図 6 のような弾性ブロック中の埋没き裂問題の解析を行った．き裂近傍では材料のヤング率が 21GPa から 2100 GPa へと線形的に変化する問題である．図 6（a）は，

1/2 領域解析とする際の境界条件とブロック概観を示す．図 6（b）はき裂角θの模式図である．

異なる３種類の大きさの積分領域を使用して相互積分法解析を行った結果を図６ (c)と(d)に示す．図6(c)は一様材料を仮定した場合，図(d)は材料の機械的性質の変化を仮定した場合である．それぞれ，無限弾性体中の埋没き裂のモードＩ応力拡大係数で正規化して示している．図6中，例えば，図 6(c)からは正規化されたモード Ｉ 応力拡大係数が 1，他はほぼゼロである．なお，図中 KI_8 等はモードＩ応力拡大係数をき裂前縁要素の代表寸法の 8 倍の半径を有する積分領域 V を使用して計算した結果である．KII はモードⅡ，KIII はモードⅢ応力拡大係数を示し，続く数字は積分領域の半径である．一様材料の場合の計算結果は積分領域の半径に依らず，ほぼ同じ値である．よって，相互積分法解析の精度は良好と言える．図 6(d)の弾性率の変化を仮定した場合でも応力拡大係数の値は積分領域の大きさに依らずほぼ一定である．



(a) 境界値問題　　　　　　(b) き裂角の定義



(c) 一様材の SIF　　　　　　(d)非一様材の SIF

図 6　弾性率が変化する弾性ブロック中の埋没き裂問題とその解析結果（応力拡大係数の分布）

（4）まとめ

本研究で提案した J 積分法や相互積分法により，溶接継手のように残留応力が分布した非一様材料中のき裂の評価が可能になった．また，溶接金属中に発生した巣などの溶接欠陥を反復型重合メッシュ法による簡便なモデル化と評価が可能になった．既に，成果の多くは論文や口頭発表により公表済みである．発表論文として公表していない研究成果については早急に論文投稿を進める予定である．

５．主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計　6　件）

① Hiroshi Okada, Satoshi Kadowaki, Mitsumasa Suzuki, Yasunori Yusa, J-integral computation for elastic-plastic materials with spatially varying mechanical properties, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 207, pp. P. 181-202, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2018.12.029.

② 荒井 皓一郎，岡田裕，遊佐泰紀，任意の荷重経路と有限変形を許容する新しい三次元Ｊ積分法の提案，日本機械学会論文集，84 巻 863 号 p. 18-00115, 2018. https://doi.org/10.1299/transjsme.18-00115

③ 荒井 皓一郎，岡田裕，遊佐泰紀，有限変形弾塑性問題に適用可能なＪ積分範囲ΔＪの三次元領域積分表示の提案，日本機械学会論文集，84 巻 867 号，p. 18-00309. https://doi.org/10.1299/transjsme.18-00309

④ Yasunori Yusa, Hiroshi Okada, Yosuke Yumoto, Three-dimensional elastic analysis of a structure with holes using accelerated coupling-matrix-free-iterative s-version FEM, International Journal of Computational Methods, Vol. 15, No. 5 (2018) 1850036 (35 pages).

⑤ Yasunori Yusa, Joe Okamoto, Daiji Toyama, Hiroshi Okada, Analysis of a many-hole problem using coupling-matrix-free iterative s-version FEM with multiple local meshes,

Mechanical Engineering Journal, Vol. 5, No. 5, Paper No.18-00264, 2018. https://doi.org/10.1299/mej.18-00264

〔学会発表〕（計　17　件）

① Koichiro Arai, Hiroshi Okada, Yasunori Yusa, Formulation of Three-Dimensional J-Integral for Finite Strain Elastic-Plastic Fracture Problems Under Any Load Histories (Monotonic and Cyclic Loads), ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference (PVP2018), 2018 年 7 月.

② Hiroshi Okada, Tatsuro Ishizaka ,Masahiro Ono, Yasunori Yusa, Computations of Fracture Mechanics Parameters for 3D Arbitrary Shaped Crack in Welded Joint and Functionally Graded Material, The 13th World Congress in Computational Mechanics/2nd Pan American Congress on Computational Mechanics, 2018 年 7 月.

③ Hiroshi Okada, Revisiting Methodologies for Computing Fracture Mechanics Parameters, The 13th World Congress in Computational Mechanics/2nd Pan American Congress on Computational Mechanics, 2018 年 7 月.

④ 荒井 皓一郎, 岡田 裕, 遊佐 泰紀, 領域積分法に基づく新しい三次元 J 積分と ∆J 積分の定式化と数値解析例, 日本機械学会 第 31 回計算力学講演会(CMD2018), 2018 年 11 月.

⑤ Hiroshi Okada, Yasunori Yusa, Computations of 3D fracture mechanics parameters for crack in welded joint and functionally graded material, International Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly, 2018 年 11 月.

⑥ Omar Tabaza, Hiroshi Okada, Yasunori Yusa, Computation of mixed mode stress intensity factors in 3D functionally graded material using tetrahedral finite element, International Conference on Computational and Experimental Engineering and Sciences 2019 (ICCES2019), March 25-28, Tokyo, Japan, 2019 年 3 月.

⑦ 荒井皓一郎, 遊佐泰紀, 岡田裕, 三次元非線形破壊力学評価のための J 積分, 日本機械学会 第 30 回計算力学講演会（CMD2017）, 2017 年 9 月.

⑧ 宮内彰太, 遊佐泰紀, 岡田裕, 領域分割法を用いた大規模溶接シミュレーションのための検討, 日本機械学会　第 30 回計算力学講演会（CMD2017）, 2017 年 9 月.

⑨ 宮内彰太, 遊佐泰紀, 岡田裕, 領域分割法を用いた移動熱源問題の大規模熱伝導解析, 第 22 回　計算工学講演会, 2017 年 6 月.

⑩ 外山太治, 遊佐泰紀, 岡田裕, 反復型重合メッシュ法を用いた幾何学的非線形問題の解析, 第 22 回 計算工学講演会, 2017 年 6 月

⑪ Hiroshi Okada, Satoshi Kadowaki, Koichiro Arai, Yasunori Yusa, EVALUATION OF ENERGY RELEASE RATE FOR FUNCTIONALLY GRADED MATERIALS UNDERGOING ELASTIC-PLASTIC DEFORMATION,International Conference on Computational & Experimental Engineering and Science - ICCES2017, 2017 年 6 月.

⑫ Hiroshi Okada, Masahiro Ono, Koichiro Arai, Yasunori Yusa, J- and interaction integral evaluations for fracture problems of welded joints, US National Congress on Computational Mechanics, 2017 年 7 月.

⑬ Daiji Toyama, Yasunori Yusa, Hiroshi Okada, Large-Deformation Analysis Using Coupling-Matrix-Free Iterative S-Version FEM with Implicit Nonlinear Solution Algorithm, 2nd International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems, 2017 年 10 月.

⑭ 織茂 勝利, 宮内 彰太, 遊佐泰紀, 岡田裕, 領域分割法を用いた熱弾塑性問題の大規模並列有限要素解析, 日本機械学会関東支部　第 23 期総会・講演会, 2017 年 3 月.

⑮ 荒井皓一郎, 門脇聖, 遊佐泰紀, 岡田裕, 大変形弾塑性問題や傾斜機能材料の J 積分計算に関する研究, 日本機械学会　九州支部　第 70 期　総会・講演会, 2017 年 3 月.

⑯ 岡田裕 , 門脇聖 , 遊佐泰紀, 傾斜機能材料の J 積分評価に関する研究, 日本機械学会　第 29 回計算力学講演会（CMD2016）, 2016 年 9 月.

⑰ Yasunori Yusa, Yosuke Yumoto, Hiroshi Okada, Coupling-matrix-free Iterative S-version FEM Accelerated by Preconditioning and Line-search Techniques, WCCM XII(12th World Congress on Computational Mechanics) & APCOM VI(6th Asia-Pacific Congress on Computational Mechanics), 2016 年 7 月.

６．研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：遊佐泰紀

ローマ字氏名：YUSA Yasunori

所属研究機関名：東京理科大学

部局名：理工学部機械工学科

職名：助教

研究者番号（8 桁）：70756395