

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04212

研究課題名(和文) 建造から品質・安全性・寿命まで評価可能な四次元可視化CAEシステムの開発

研究課題名(英文) Development of 4 Dimensional CAE Visualization System for Assessment of Quality and Safety of Structures through Life Time Starting from Production

研究代表者

村川 英一 (Murakawa, Hidekazu)

大阪大学・接合科学研究所・招へい教授

研究者番号：60166270

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は製品の設計、生産、稼働時の安全性評価、補修からなるライフサイクル全体を視野に収めた戦略的『四次元可視化』CAEシステムの構築を目的に、破壊力学、溶接力学、実験計測分野の研究者が密に連携して実施したものである。

研究成果として(1)実構造物に発生する溶接残留応力および変形の予測が可能な高速熱弾塑性シミュレーションコードの開発(2)残留応力や変形の低減を目的とした溶接シミュレーションコードの高度化(3)溶接残留応力を有する実構造物を対象とした高速高精度き裂進展解析コードの開発(4)上記コードが連携したCAEシステムの構築および(5)疲労き裂進展実験による開発システムの検証を行った。

研究成果の概要(英文)：This research project was conducted by experts in Welding Mechanics, Fracture Mechanics and Experiment to establish a “Strategic Four Dimensional CAE Visualization System” which enables us to predict the quality and the performance of welded structures through their lifetime starting from their design and production. After three years research, (1) FE code capable to predict residual stress and distortion of large welded structures, (2) Advanced FE code for control and mitigation of welding residual stress and distortion, (3) FE code to predict crack propagation in large scale structures under the influence of welding residual stress are developed. Further, Codes (1)-(3) are integrated as a “Strategic Four Dimensional CAE Visualization System” and it is validated through experiments focused on fatigue crack growth in welded specimens.

研究分野：非線形計算力学、数値溶接力学

キーワード：CAE 溶接構造物 シミュレーション 破壊 疲労 残留応力 変形 寿命

1. 研究開始当初の背景

船舶の損傷崩壊事例の多くは波浪による荷重の下で発生した小さなき裂が大きく成長した結果と考えられ、き裂が発生する場所は大きな残留応力が存在する溶接部である。また、溶接組立誤差による目違いなどが強度に及ぼす影響を考えると、安全で寿命が長い船舶を合理的な計画に基づき設計、生産、余寿命評価、補修するためには、① 構造物が実際に製作される時に発生する残留応力や変形の予測、② 残留応力や変形を積極的に制御する方法の開発、③ 実構造物におけるき裂進展予測、④ き裂進展と繰返し座屈が連成した逐次損傷崩壊過程の予測といった時間的拡がりを持つ、品質評価および安全性評価を統合した使い易い戦略的『四次元可視化』CAEシステムが必要である。

2. 研究の目的

品質に優れ、高い信頼性を有する製品の設計ツールとしての『四次元可視化』CAEシステムの構築を提案する。『可視化』とは、『①見る：人の眼には見えない物や現象を映像や図表などにして分かりやすくする』、『②分る：現象の本質を理解し説明する』そして『③描く：共通な理解を接点にした連携を通して新しい戦略的展開を図る』ことである。また本研究で提案する『四次元可視化』では長期にわたる時間的拡がりを第4軸と位置付け、CAE技術の進化と各種コンピュータの大容量・高速化を背景としたシミュレーションによる精密な『三次元的可視化』技術の新しい展開を図る。すなわち、製品の設計、生産、稼働時の安全性評価、補修からなるライフサイクル全体を視野に収めた戦略的『四次元可視化』CAEシステムを破壊力学、溶接力学、計測分野の研究担当者の密なる連携の基に構築し、わが国の学術および産業の発展に貢献することを目的とする。そのために、次の5項目について研究を実施した。

- (1) 溶接シミュレーションの高速化
- (2) 溶接シミュレーションの高度化
- (3) 高速高精度な三次元き裂進展解析
 - ・き裂を有する溶接部有限要素法解析モデルの自動生成
 - ・残留応力マッピングの高度化
 - ・データマッピングされた残留応力データ下の線形／非線形破壊力学パラメータ解析
- (4) 溶接試験体の疲労き裂進展実験
- (5) シミュレーションプラットフォーム構築

3. 研究の方法

(1) 溶接シミュレーションの高速化
従来、主流であった陰解法と比較して並列処理による高速計算、使用メモリー低減の面で優れている理想化陽解法とGPGPUおよび代数マルチグリッド法を効果的に組み合わせることにより溶接シミュレーションの高速化

を図った。

(2) 溶接シミュレーションの高度化

固相変態モデルを導入して低変態温度溶接材料を対象とした溶接残留応力の予測を可能にした。また、重ね溶接継手で問題となる部材間の接触問題やき裂面の接触問題が取扱えるようにペナルティー法を導入した。

(3) 高速高精度な三次元き裂進展解析

・き裂を有する溶接部有限要素法解析モデルの自動生成： 制約付きDelaunay法などを導入して、溶接金属と母材の間の材料界面とき裂を表現し、完全自動で有限要素法解析モデルの生成が可能なメッシュ生成手順を提案した。

・残留応力マッピングの高度化： それぞれ粗密が大幅に異なる溶接シミュレーションFEモデルとき裂進展解析FEモデルの間での残留応力マッピングを実現するために局所最小二乗法を用いた局所平滑化法によりこれを可能にした。

・線形／非線形破壊力学パラメータ解析： 残留応力を有する構造物中のき裂が大変形する場合でも経路独立性を有するJ積分を新たに定式化した。また、応力拡大係数の計算にはき裂面荷重に対応した仮想き裂閉口積分法 (Virtual Crack Closure-Integral Method; VCCM) を採用した。

(4) 溶接試験体の疲労き裂進展実験

疲労き裂進展に対する溶接残留応力の影響を調査するため、平板試験片にビード溶接を施した溶接試験片、それに対して焼鈍を行った焼鈍試験片、さらに溶接加工を施さなかった平板試験片を対象にMTS社製250kN/2, 200N-m軸ねじり複合疲労試験機を用いて疲労試験を実施した。

(5) シミュレーションプラットフォーム構築

上記(1)～(4)の研究課題で得られた成果をシミュレーションプラットフォーム上に展開することにより『四次元可視化』CAEシステムを目指した。

4. 研究成果

(1) 溶接シミュレーションの高速化

本研究で構築した手法を図1に示す原子炉压力容器の出入り口管台部の多層溶接継手の残留応力予測に対して適用した。移動熱源による100パスを超える多層溶接時の3次元残留応力解析を実施し、従来手法では計算時間の面から解析が極めて困難であった残留応力分布(図2)の予測を実用的な計算時間で実施できることを示した。

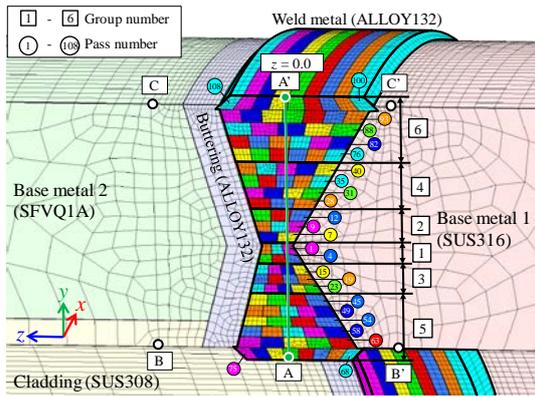


図 1 原子炉圧力容器出入り口管台部多層溶接継手の解析モデル

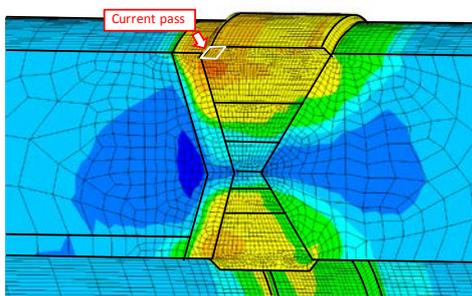


図 2 原子炉圧力容器配管モデル残留応力解析結果(周方向残留応力)

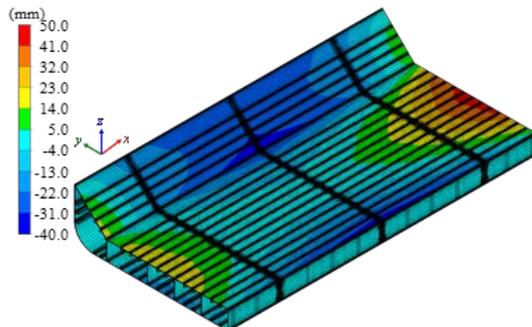


図 3 二重底モデルの溶接組立による変形解析の結果

また、図 3 は、船体の二重底ブロックの溶接組立時の変形を計算した結果であり、約 1000 万自由度の超大規模計算が PC 1 台を用いて約 10 日で実施できた。このことは、これまで極めて困難とされてきた実大構造物の溶接変形や残留応力の予測に対して理想化陽解法が有効であることを示している。

(2) 溶接シミュレーションの高度化

図 4 は、面外ガセット溶接継手の角回し部の溶接残留応力の低減に対する低変態温度溶接材料の効果を確認した結果である。

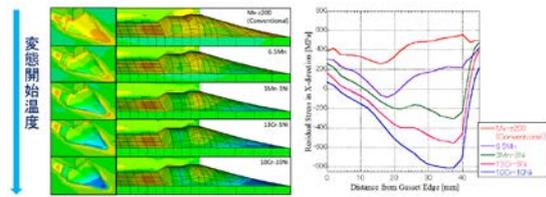


図 4 固相変態を考慮した溶接シミュレーションにより予測した溶接残留応力

図 5 は、自動車の車体などで見られる重ね溶接による撓み変形の計算結果を部材間の接触を無視した場合と考慮した場合について比較したものであり、実用構造物の溶接シミュレーションでは接触現象を無視することはできない。

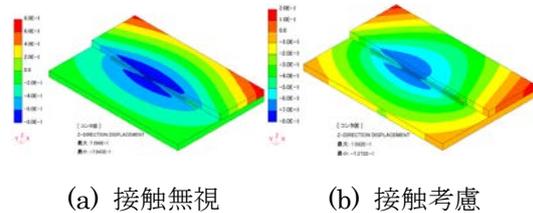


図 5 部材間の接触を考慮した溶接シミュレーション

また図 6 は、ICR (Impact Crack Closure Retrofit Treatment) により既存き裂を閉じた場合の応力解析と ICR のき裂進展抑制効果のシミュレーション結果を示す。

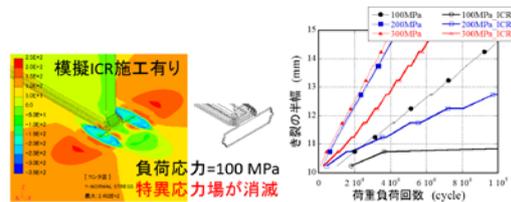
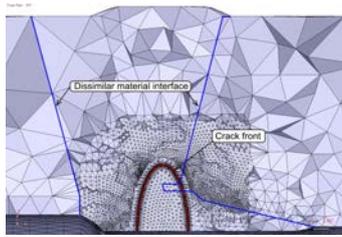


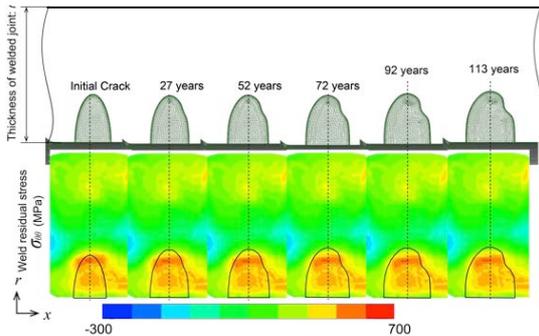
図 6 き裂面の接触を考慮した応力解析とき裂進展解析

(3) 高速高精度な三次元き裂進展解析

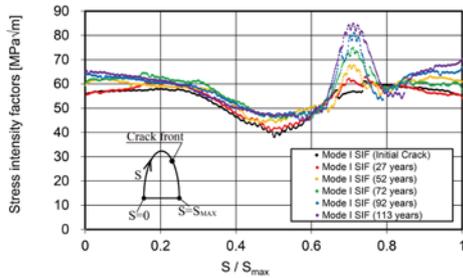
本研究で提案した解析手法を原子炉圧力容器ノズル部異材溶接部に適用した。図 7 にノズル部異材溶接部に仮定したき裂の進展解析結果を示す。図 7(a)は BWR サージノズルモックアップ異材溶接部に仮定したき裂である。さらに、図 7(b)は応力腐食割れ (SCC) 進展の様相を示す。図中には紙面に垂直な向きの垂直応力の分布を重ねてある。さらに、図 7(c)にはき裂前縁の応力拡大係数分布を示している。応力拡大係数が極大となる箇所は、き裂が溶接金属-母材境界をまたいで母材中に入り込んでおり、き裂進展速度が周囲に比較して大きく低下する部分である。そのため、き裂前縁形状がき裂側に凸形状となり、応力拡大係数の値が大きく上昇している。それ以外はき裂成長に伴い応力拡大係数分布がより一定に近づく傾向となる。



(a) 初期き裂と溶接接合部



(b) SCC き裂成長の様相



(c) き裂前縁応力拡大係数分布の変化

図7 異材溶接部の SCC (応力腐食割れ) き裂進展解析の結果

(4) 溶接試験体の疲労き裂進展実験

疲労き裂進展に対する溶接残留応力の影響を調査するため、図8に示す溶接試験片、それに対して焼鈍を行った焼鈍試験片、さらに溶接加工を施さなかった平板試験片の三種類で試験を行った。

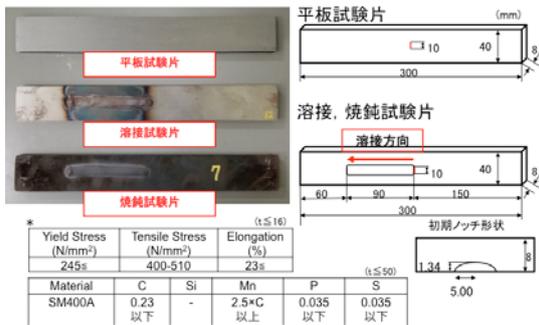


図8 試験片の寸法と材質の概要

ビーチマーク法により溶接試験片で観察されたき裂進展挙動の一例を図9に示す。ビーチマーク間距離測定結果からき算出した裂進展速度 (da/dN) と、Newman-Raju の式より求めた応力拡大係数 (ΔK_I) の関係を図10に示す。現在までの実験結果からは、溶接試験片、焼鈍試験片、平板試験片で顕著な差は見られなかった。この実験結果は、同じ試験条件を想定したシミュレーション結果にも対応するものであった。

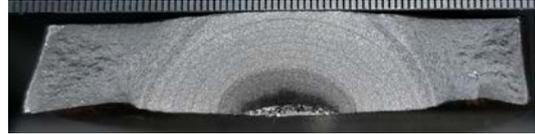


図9 溶接試験片に残されたビーチマーク

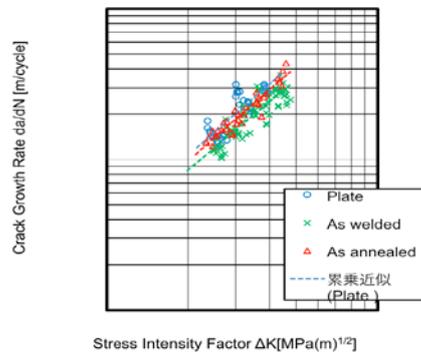


図10 応力拡大係数振幅 (ΔK_I) とき裂進展速度 (da/dN) の関係

(5) シミュレーションプラットフォーム構築

図11に示されるように溶接シミュレーションの高速化・高度化、高速高精度な三次元き裂進展解析法の確立および実験による検証が有機的に連携されたプラットフォームを構築することにより、製品の設計、生産、稼働時の安全性評価、補修からなるライフサイクル全体を視野に収めた戦略的『四次元可視化』CAEシステムを提案しその有効性をシミュレーション事例を通して示した。

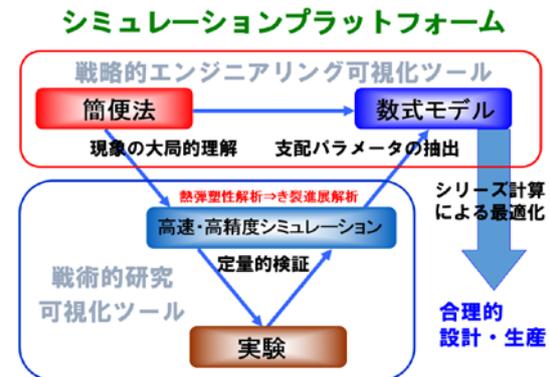


図11 『四次元可視化』CAEシステムのためのプラットフォーム

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

(1) T. Saito, D. Takakura, M. Shibahara, A. Kawahara, K. Ikushima, Numerical Optimization of Groove Shape and Welding Sequence on T-joint Multi Passes Welding and Validation by Welding Test, 溶接学会論文集, 査読有, Vol.35, No.2 (2017), pp.141s-145s, DOI: <https://doi.org/10.2207/qjws.35.28s>.

(2) Ikushima, K., Minamino, T., Kawahara, A., Nakatani, M., Shibahara, M., Enhanced large-scale analysis method and its application to multiaxial pipe weld, Welding in the World, 査読有, 60(5) (2016), pp. 915-929.

(3) C. Shiga, H. Murakawa, K. Hiraoka, N. Osawa, H. Yajima, T. Tanino, S. Tsutsumi, T. Fukui, H. Sawato, K. Kamita, T. Matsuzaki, T. Sugimura, T. Asoda, K. Hirota, Elongated bead weld method for improvement of fatigue properties in welded joints of ship hull structures using low transformation temperature welding materials, Welding in the World, 査読有, 61(4) (2017), pp. 769-788.

(4) Masahiro Nose, Hijiri Amano, Hiroshi Okada, Yasunori Yusa, Akira Maekawa, Masayuki Kamaya, Hiroshi Kawai, Computational crack propagation analysis with consideration of weld residual stresses, Engineering Fracture Mechanics, 査読有, Vol.182 (2017), 708-731, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.06.022>.

(5) Yu, T., Bui, T.Q., Yin, S., Doan, D.H., Wu, C.T., Van Do, T., Tanaka, S., On the thermal buckling analysis of functionally graded plates with internal defects using extended isogeometric analysis, Composite Structures, 査読有, Vol. 136 (2016), pp. 684-695.

〔学会発表〕(計4件)

(1) 大野雅広, 鈴木力, 遊佐泰紀, 岡田裕, 破壊力学解析のための残留応力マッピング(要素・点群探索の高速化), 日本機械学会第29回計算力学講演会(CMD2016), 名古屋, 2016年9月.

(2) Okada, H., Yusa, Y., Kikuchi, M., Ono, M., Kamaya, M., Maekawa, A, SCC propagation analysis under weld residual stress and anisotropic crack growth law, IUTAM Symposium on Multi-scale fatigue, fracture and damage of materials in harsh

environments (August 2017), Galway, Ireland, 137-141.

(3) Hiroshi Okada, Masahiro Nose, Masahiro Ohono, Kengo Yoshida, SCC (Stress Corrosion Cracking) Crack Propagation Analysis under the Influence of Weld Residual Stress, WCCM XII(12th World Congress on Computational Mechanics) & APCOM VI(6th Asia-Pacific Congress on Computational Mechanics), Seoul, Korea, (July 2016).

(4) 村川英一, 特性テンソルに基づく溶接構造における疲労き裂の進展解析, 溶接学会溶接構造シンポジウム2017、大阪.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称: 破壊現象の解析装置、破壊現象の解析方法、及びプログラム

発明者: 村川英一、麻寧緒

権利者: 大阪大学

種類: 特許

番号: 2017-125035

出願年月日: 平成29年6月27日

国内外の別: 国内

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村川 英一 (MURAKAWA, Hidekazu)

大阪大学・接合科学研究所・招へい教授

研究者番号: 60166270

(2) 研究分担者

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

柴原 正和 (SHIBAHARA, Masakazu)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号: 20350754

芹澤 久 (SERIZAWA, Hisashi)

大阪大学・接合科学研究所・准教授

研究者番号: 20294134

田中 智行 (TANAKA, Satoyuki)

広島大学・工学研究科・助教

研究者番号：20452609

生島 一樹 (IKUSHIMA, Kazuki)
大阪府立大学・工学(系)研究科(研究
院)・助教
研究者番号：80734003