

令和 3 年 5 月 17 日現在

機関番号：32663

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K02963

研究課題名(和文) 無償配布可能なオープンソースCAEを利用したビジュアルな材料力学教育教材の開発

研究課題名(英文) Development of visualized learning materials for materials mechanics using open source CAE

研究代表者

藤岡 照高 (Fujioka, Terutaka)

東洋大学・理工学部・教授

研究者番号：60371580

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：材料力学の知識はものづくりの上で必須とされるが、現実的な機械部品は、変形が極めて小さい線形弾性範囲で使用され、実現象との関連が実感できないことから学習に困難を伴うことがある。有限要素法に基づくCAEソフトウェアを用いた変形の誇張表示や応力分布の可視化が期待されるが、現状普及している企業向けCAEソフトウェアは概して高価であり、個人や中小企業での導入には困難がある。本研究では無償で利用できるオープンソースCAEを活用し、工業高等学校水準から社会人技術者教育まで利用できる材料力学教材を開発した。教材には、はりの曲げなど標準的な学部教科書に含まれるもののほか、実用上重要な熱疲労の解析事例を含めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果により、従来、富裕国の大企業に限定されていたCAEの利用が、中小企業や発展途上国にも開かれ、技術のアクセス性に関する格差軽減に寄与すると期待される。個人レベルでの利用が進むことで、公衆安全にかかわる部分を含む技術知見の透明性が強化される。生涯学習に役立てられることから高齢化社会での熟練技術者の活用や、在宅での取り組みによるはたらき方の見直しにもつながる。

研究成果の概要(英文)：Learning the strength materials is sometimes thought to be difficult because of the difficulty in observation of actual small-scale deformation of realistic mechanical parts. Using CAE software including FEA may be helpful because these software systems can display exaggerated deformation and visualize stress distributions. Widely employed CAE software, however, are usually expensive to introduce, and thus these are not reasonably employed for personal study or small business operations. In this study, educational materials for the strength of materials using open source CAE which can be introduced free-of-charge have been developed. The analytical examples include bending of elastic beam and other linear elastic problems included in standard text books for under graduate education, and thermal fatigue problem, which is important in practical mechanical design.

研究分野：材料力学

キーワード：有限要素法 材料力学 熱疲労 計算力学

1. 研究開始当初の背景

材料力学はものづくりをはじめとするさまざまな分野で必須とされるが、理工系大学教育の現場では、実際の変形や破壊との関連がイメージしづらく、演習問題のテンプレートに数値を代入して済まそうとする学生も多い。変形が小さいため、実験的に変形や破壊をとらえることも容易でない。学校教育の現場だけでなく、企業内での社会人技術者教育にあたっては同様な問題がある。有限要素法を核とする CAE ソフトウェアは変形を誇張表示できるなど材料力学問題をビジュアルに可視化できるため、理論、実験と並行して活用することでメカニズムを把握した上での学習に効果的と期待される。ただし、実用に供せられている市販の CAE ソフトウェアは企業向けであるため概して高額で、かつ利用継続のためには保守費用もかかるため、個人での自己研さんに利用できる環境にはない。中小企業での普及にあたっては導入コストがネックとなる。原則無償で利用できるオープンソース CAE も普及が図られているが、商用ベンダーが提供するレベルのユーザサポートがなく、使用者は独力で学ぶ必要が生じる。中小企業でも技術者教育のコストが結局、商用 CAE 導入のコストに匹敵する負担になるとの指摘もある。

2. 研究の目的

無償で公開可能なオープンソース CAE を用いて、工業高等学校や工学系学部教育レベルから社会人技術者教育まで利用できる材料力学教材を開発する。

3. 研究の方法

商用 CAE に匹敵する多機能なフランス製オープンソース CAE である Salome-Meca¹⁾を用いて、学部教育で行われる標準的な材料力学カリキュラムで取り上げられる弾性力学問題や、企業におけるものづくりで実用される疲労、破壊力学問題について理論や評価法のメカニズムが理解しやすいビジュアルな解析事例を蓄積する。

教育機関や公設試験場に備えられていることからアクセス性が高い引張試験機を用いての実験や、公開文献に記載されている熱疲労、熱疲労き裂進展試験の再現なども行い、解析と実現象との対応を明確化する。

4. 研究成果

(1) 材料力学公式の妥当性確認

学部教育の標準的なカリキュラムではオイラーの理論に基づくはりのたわみと曲げ応力が取り上げられる。このため、細長いはりでない場合にソリッド要素を使うとたわみの評価精度が低下する。図 1 は幅広の片持ちはりの自由端に荷重をあたえたときの変形と応力分布のカラーコンター図を示す。学習者はこうして変形や応力を可視化することである程度は公式どおりの解が得られるものの、公式の前提を逸脱する場合もあることが体感できる。

また、ソリッド要素を用いる片持ちはりの固定端には応力集中を伴う特異点が生じ、要素分割を細かくして行くとカラーコンター表示の上では最大応力が高くなるように見える。固定端における板厚方向応力分布をグラフ化することで、オイラーの理論で仮定される線形の応力分布と曲げモーメントがつり合うことが確認できる。

図 2 は丸棒軸にトルクをあたえたときの変形の誇張表示とミーゼス相当応力のコンター図である。軸の設計公式において仮定される、物体の内部で中心からの距離に比例して応力が分布する状態が可視化できる。また、微小変形を前提とすると、軸の外表面・軸方向の変位の分布が線

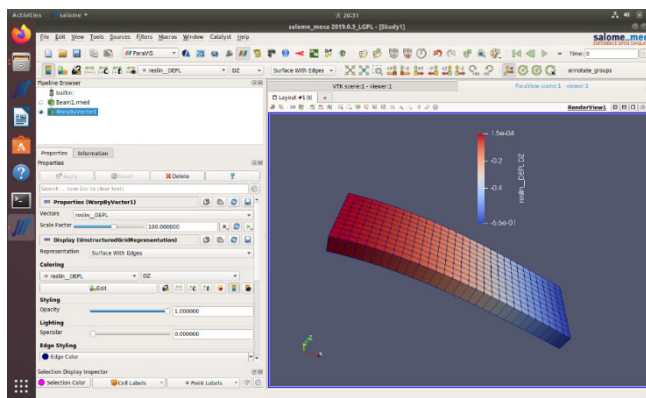
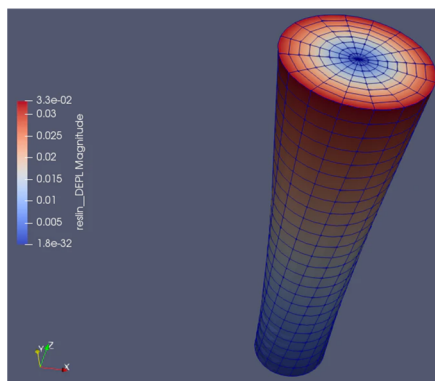


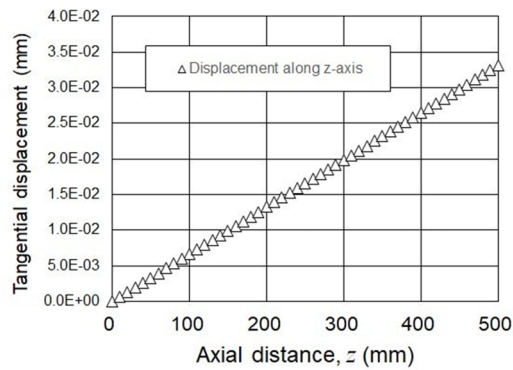
図 1 片持ちはりの変形と応力分布コンターの Salome-Meca での表示画面例

形になっており、線形弾性に基づく材料力学公式との整合を確認できる。

図3は内圧を受ける圧力容器の解析例である。薄肉圧力容器の公式では、板厚方向に一樣な応力分布が仮定されているが、現実には分布があり、周方向応力の板厚方向平均が公式になっていることが理解できる。

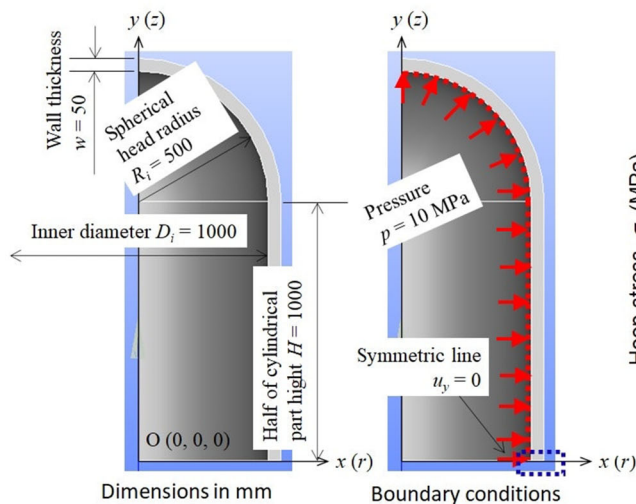


(a) Visualization of deformed shaft

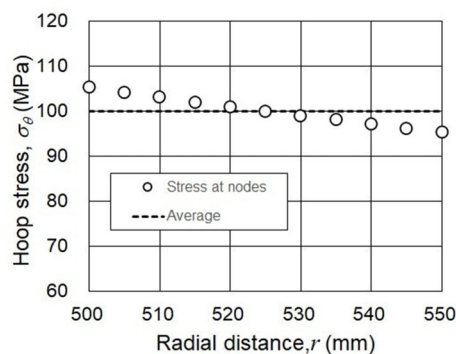


(b) Tangential displacement on shaft surface axial distance

図2 トルクを受ける丸棒軸におけるミーゼス相当応力のからコンター表示と外表面軸方向の変位分布



(a) Dimensions and boundary conditions of pressure vessel



(b) Distribution of hoop stress along radial distance

図3 内圧を受ける圧力容器の解析モデルと胴部周方向応力の板厚方向分布

(2) 引張試験解析

引張試験は材料試験の中でも標準的で工業高等学校や公設試験場にも備えられており、アクセス性が高い。過去に軸対称要素を用いて行った引張試験解析²⁾についてSalome-Mecaの最新バージョンを用いて再解析した結果を図4に示す。

この図から、幾何学的非線形性を考慮した大変形弾塑性解析を行うことで実際の試験で観察されるくびれが再現できることや、真応力-真ひずみ曲線と公称応力-公称ひずみ曲線の関係などの基本事項を実際の現象と対応づけられる。

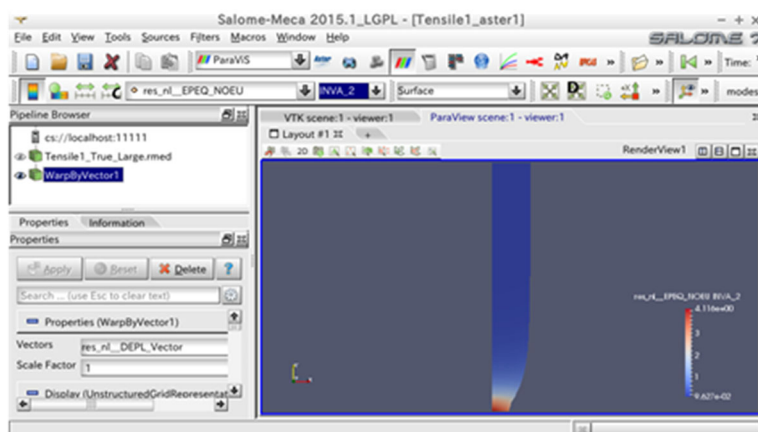


図4 引張試験の再現解析の表示画面例

(3) 熱疲労解析

疲労評価が実製品の耐久性評価や事故調査の上で重要であることは認識されているが、CAE解析の結果得られる多軸応力の時刻歴から疲労耐久性を評価する手順を細部まで記載した教材に

乏しい。特に発電設備や内燃機関で問題になり得る熱疲労については、実験が困難であることもあって実験的検証事例が極めて少ない。ここでは、日本原子力研究開発機構³⁾が過去に実施したナトリウム中熱疲労試験を Salome-Meca を用いて再現し、技術者教育での利用に供した。

図 5 に非定常熱伝導解析の結果得られた温度分布のカラーコンター図を示す。解析にはオープンソースの Salome-Meca のほか、商用 CAE の MSC.Marc⁴⁾ を併用し両者を比較している。図 6 には弾性応力解析結果を比較している。応力が比較的低い位置で若干の相違が生じている。これは熱伝導解析において生じた温度の違いに起因している。材料力学問題であっても熱伝導の側面からの洞察や経験が必要であることが示唆された。

(4) 破壊力学解析

事故原因調査やプラント機器の余寿命診断の目的で破壊力学解析が行われることがあるが、熱疲労によるき裂進展の実験的検証は前述の熱疲労よりもさらに難易度が高く、熱疲労試験を解析で良好に再現したとの公開文献はほとんどない。ここでは貴重な文献データを参照し、フランス原子力庁が公開している応力拡大係数解のテーブル⁶⁾を用いて、Salome-Meca による無き裂弾性熱応力解析に基づき熱疲労き裂進展を再現した。

実験では SUS304 円筒試験体の内外面に周方向表面き裂を導入し、鉛ビスマスで急冷、急加熱を繰り返す、試験後の切断観察によってき裂深さが計測された。図 7 には最終的なき裂深さに対する解析結果と実験における観察結果を比較する。応力分布の多項式近似の次数や、使用する応力拡大係数の解による違いが認められるが、実際に即した方法を選択することで精度の改善が見られた。本解析例も解析技術者の技量の確認に利用できる。

また、別途、平板中の表面き裂に対する弾塑性 J 積分の解析も行い、既存の全面塑性解⁷⁾との比較や繰返し曲げ疲労試の再現も行っている。

(5) まとめ

工業高等学校や工学系学部教育における材料力学の教材や社会人技術者の教育教材として利用できる解析例を蓄積した。本事例はオープンソース CAE ソフトウェアを用いているため、無償で利用でき、教育目的のほか、社会人技術者の自己研さんにも利用できる。ただし、こうしたソフトウェアは随時バージョンアップが行われているため、並行して教材の改訂を継続する必要がある。このためのユーザコミュニティの維持、支援のしくみ構築が期待される。

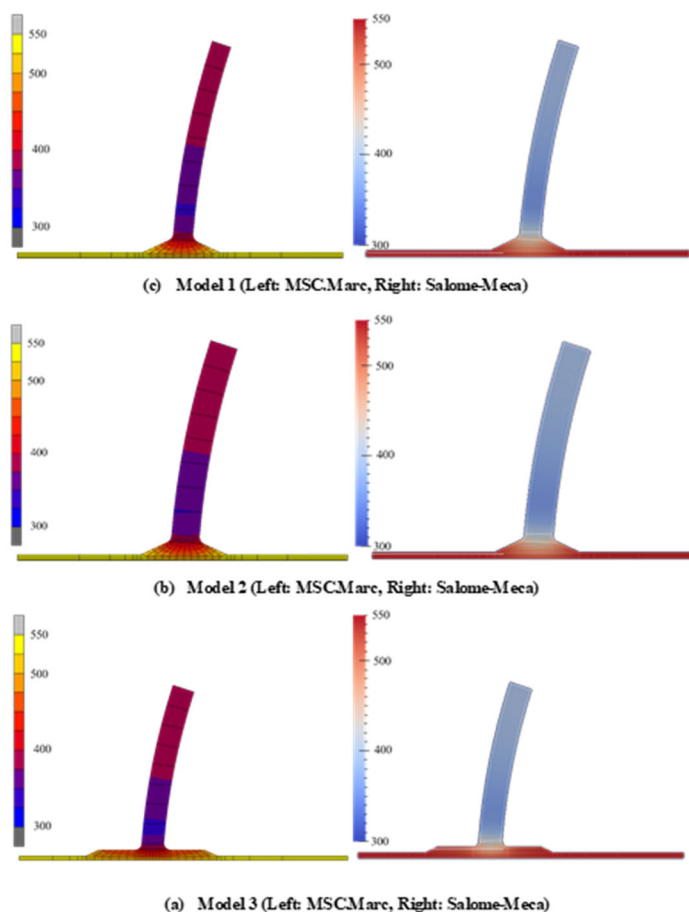


図 5 ナトリウム中熱疲労試験を再現した非定常熱伝導解析結果における Salome-Meca と MSC.Marc の比較

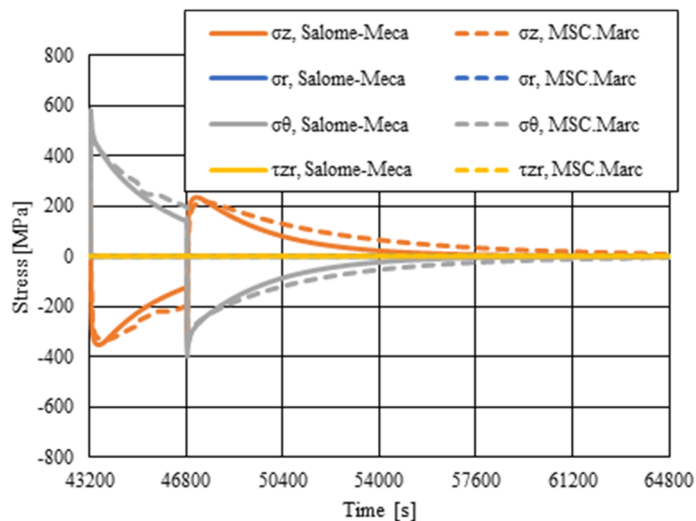


図 6 Model 1 に対する弾性応力解析結果における Salome-Meca と MSC.Marc の比較

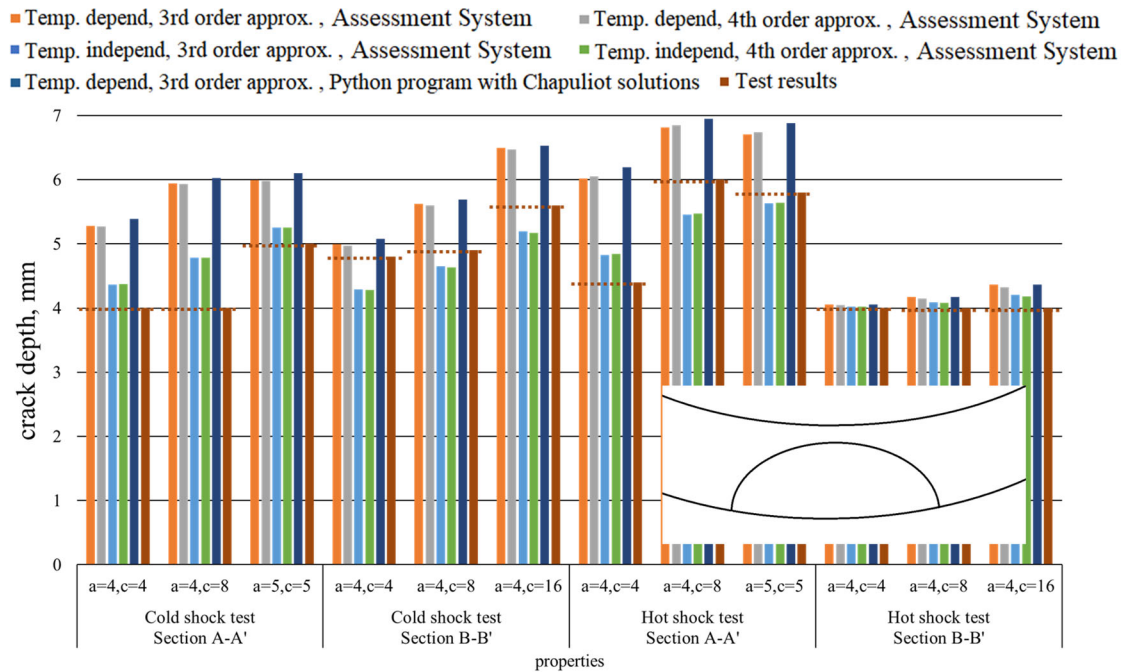


図7 熱疲労き裂進展解析と実験データとの比較例 (き裂深さ)

参考文献

- 1) Electricite de France, <https://www.code-aster.org/spip.php?rubrique2>, last accessed 2021/4/7.
- 2) 藤岡照高, 構造解析ソルバ検証用参照解の整備 (低合金鋼引張試験の Code-Aster による再現), オープンCAE シンポジウム 2015@富山, オープンCAE 学会, 富山, (2015).
- 3) 田中信之, 石崎公人, 菊池政之, 渡士克己, 岩田 耕司, STST 熱応力き裂発生試験 非弾性解析と強度評価, PNC TN9410 92-284, 日本原子力研究開発機構, (1992), pp. 1-53.
- 4) MSC Software, <https://www.mscsoftware.com/>, last accessed 2021/4/7.
- 5) Fujioka, T., Takahashi, Y., Fukuda, Y. & Satoh, Y., Simplified Method to Predict Creep-fatigue Crack Growth in Inelastic Situation - Evaluation of Thermal Fatigue Crack Growth Test-. The 3rd ASME/JSME Joint International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-3), Volume 1, S113, (1995), pp. 327-333.
- 6) Chapuliot, S., Formulaire de KI Pour les Tubes Comportant un Defaut de Surface Semi-Elliptique Longitudinal ou Circonfereential, Interne ou Externe, s.l.: RAPPORT CEA-R-5900. (2000), (in French).
- 7) 植田浩義, 矢川元基, 曲げ荷重を受ける表面き裂付平板の全面塑性解, 日本機械学会論文集 (A 編), 54 巻, 499 号, (1988), pp. 552-556.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 金子雄祐, 藤岡照高, 宮平将輔
2. 発表標題 Salome-mecaを用いた構造モデル熱疲労解析と熱疲労き裂進展解析
3. 学会等名 オープンCAEシンポジウム2019梗概集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤岡照高
2. 発表標題 先端的CAEへの期待
3. 学会等名 日本機械学会2018年年次大会先端技術フォーラム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮平将輔, 藤岡照高
2. 発表標題 オープンソースCAEを用いた非比例負荷下における熱疲労評価
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 李博華, 藤岡照高
2. 発表標題 オープンソースCAEを用いた改良参照応力法に基づく非弾性J積分の簡易評価
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤岡照高
2. 発表標題 材料力学教育へのSalome-Meca/Code-Asterの利用
3. 学会等名 オープンCAE・Front ISTR合同シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤岡照高
2. 発表標題 オープンソースCAEを用いた材料力学遠隔学習教材
3. 学会等名 日本機械学会関東支部第27期総会・講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shosuke Miyahira and Terutaka Fujioka
2. 発表標題 Assessment of a Thermal Fatigue Test Conducted Under Cyclic Non-Proportional Loading Using Open Source CAE and Finite Element Analysis Methods
3. 学会等名 The 8th International Conference on Fracture, Fatigue and Wear (FFW 2020)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------