

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K03849

研究課題名(和文) データ同化を援用したマルチマテリアル構造のM・M統合解析システムの開発

研究課題名(英文) Development of multi-scale and multi-physics integrative analysis system for multi-material structures by data assimilation

研究代表者

岸本 喜直 (Kishimoto, Yoshinao)

東京都市大学・理工学部・准教授

研究者番号：20581789

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：当該解析システムの開発を進めるとともに、その解析精度と実用化した際の課題を調べた。打撃試験および通電試験に先立って実施した数値シミュレーションの結果から、試験片の接合部界面における応力分布は固有振動数から同定できることがわかった。一方で、電流密度分布の同定の可能性は電流の流し方に依存することがわかった。また、基礎試験片に対する打撃試験および界面における介在物の影響に関する調査を通じて、本解析システムの解析精度は良好であると判断できた。最後に大規模シミュレーションおよび有限要素モデルの簡略化を検討し、そのノウハウを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

接合部のすき間が非常に狭く、その場の応力分布などの物理量を直接測定することが困難であることが、接合部の力学現象を再現するための数値シミュレーションを一層難しくしていた。また、計算に考慮しなければならない接合部の寸法に対して、自動車のボデー全体を対象とするような寸法が非常に大きい数値シミュレーションを実行するには計算対象全体と接合部との相互作用に基づくマルチスケールな解析手法に頼らざるを得ない。当該解析システムの開発を進める過程において種々の数値シミュレーションと打撃試験を実施することで前述の課題を解決するための知見を得た。

研究成果の概要(英文)：This study has developed the analysis system and investigated the computation accuracy and issues in practical applications. Results of the numerical simulations executed before the hammering test and the current-carrying test have revealed that the interfacial stress distribution could be identified by the natural frequency. The possibility of the identification of the current density distribution depends on the input-output flow of the electric current. The hammering test and the investigation of the influence of inclusions have shown that the analysis system properly works in actual situations. In addition, this study has discussed the simplification of the finite element model for the large-scale simulation.

研究分野：機械材料・材料力学

キーワード：機械材料・材料力学 逆問題 マルチマテリアル マルチスケール マルチフィジックス データ同化
界面剛性 界面強度

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自動車産業では、自動車のボデーを構成する際に、強度が必要な部位には重い強度のある鉄鋼材料を、そうでない部位には低強度であるが軽量のアルミ合金やプラスチックを用いるマルチマテリアル化が進んでいる。広義には既存のほとんどの工業製品や構造物がマルチマテリアル構造をなしているといっても過言ではない。

一方で、部材と部材の接合部には接着剤などの存在や、サビなどの化合物の生成によって、その接合部界面における強度や剛性は、接合部の微細な現象を無視して見積もった近似値よりも著しく低い。特に、接合部のすき間が非常に狭く、その場の応力分布や電流密度分布などの物理量を直接測定することが困難であることが、接合部の力学現象を再現するための数値シミュレーションを一層難しくしている。さらに、機械の長期の使用に対する信頼性を保証するには、接合後の各部における物性の時間変化に即したシミュレーションが望まれていた。

また、計算に考慮しなければならない接合部の寸法がマイクロメートルレベルであるのに対して、自動車のボデー全体を対象とするような寸法が非常に大きい数値シミュレーションを実行するには、既存の研究レベルの計算機では、計算対象全体と接合部との相互作用に基づくマルチスケールな解析手法に頼らざるを得ない。このとき、シミュレーションに必要な物理量を取得する際に、接合の前後を問わず、接合部界面の面内方向の実測範囲はミリメートルオーダーである。このような広範囲にわたる接合部の物理量をその場で同定する技術も望まれていた。

2. 研究の目的

工業製品のマルチマテリアル化に対し、その信頼性向上のため、データ同化を援用したM(マルチスケール)・M(マルチフィジックス)統合解析システムを開発することを本研究の目的とする。具体的には、直接測定が困難な接合部界面におけるミクロスケールの応力分布や電流密度分布を、直接測定が容易なマクロスケールの固有振動数や磁場から逆解析的に同定するとともに、データ同化によって、実時間で数理モデルの再現性を向上させる解析システムの構築を目指す。加えて、打撃試験と通電試験を実施し、本解析システムの解析精度と実用化した際の課題を明らかにする。これにより、従来では成し得なかった実時間の変化に即したフィードバック機能を持つ数値シミュレーションの実現を目指す。

3. 研究の方法

以下の三項目を順次遂行して、本解析システムの解析精度(1)と実用化した際の課題(2)(3)を調べた。

(1) 基礎試験片に対する本解析システムの解析精度

本解析システムの計算コードの製作と基礎試験片に対する本解析システムの解析精度を調べた。まず、研究代表者がこれまでに自作した構造および電磁場に関する解析コードをアレンジし、連成解析シミュレータとして統合した。次に、基礎試験片(図1)を製作し、打撃試験と通電試験の準備をした。基礎試験片は主に鋼板とアルミ合金板を複数のボルト・ナットで締結したものを用意した。打撃試験では、インパルスハンマで試験片を打撃したときの加速度センサの信号から試験片の固有振動数を得ることとした。通電試験では、試験片を通電させ、試験片周囲に生じた磁場を磁気センサで測定することとした。これらの試験に先立って、同一の試験条件で本解析システムによるシミュレーションを実施した。本解析システムの解析結果を実測値のほか、接合面の凹凸データを用いた解析手法とも比較し、界面の応力や固有振動数などの解析精度を評価することとした。

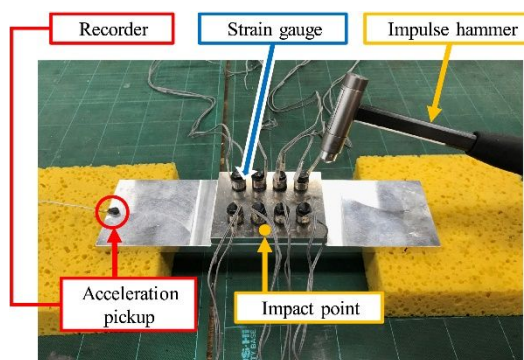


図1 基礎試験片(引用文献)

(2) 接合部界面における介在物の影響に関する調査

界面に接着シートやガスケットを挿入した試験片、ならびに接合面上にサビを設けた試験片をそれぞれ製作し、基礎試験片と同様の試験と解析を行った。試験結果などに基づき、数理モデルの改良と適用範囲を確認した。

(3) 大規模シミュレーションおよびモデル簡略化の検討

実際の自動車のフレームを1/10程度に縮小した模擬試験片と、その有限要素モデルを製作し、基礎試験片と同様の試験と数値シミュレーションを行った。多数存在する接合部の解析精度や解析に要する計算時間を調べるとともに有限要素モデルの簡略化を検討した。

4. 研究成果

(1) 基礎試験片に対する本解析システムの解析精度

打撃試験および通電試験に先立って実施した数値シミュレーションの結果から、試験片の接合部界面における応力分布は固有振動数から同定できることがわかった。一方で、電流密度分布の同定の可能性は電流の流し方に依存することがわかった。そこで、本研究では打撃試験を優先的に実施し、通電試験は基本的な現象の確認に留めることにした。打撃試験では、インパルスハンマで試験片を打撃したときの加速度センサの信号から試験片の固有振動数を得た。ここで、ボルト・ナットの締付力を変化させ、試験片の接合部界面の応力分布を変えたときの固有振動数の実測値を得た。並行して、同一の試験条件で本解析システムによるシミュレーションを行った。本解析システムの解析結果を実測値のほか、接合面の凹凸データを用いた解析手法とも比較した。以上によって得られた界面の応力分布や固有振動数は良い一致を示したことから、本解析システムの基礎試験片に対する解析精度は良好であると判断できた(図2, 図3)。

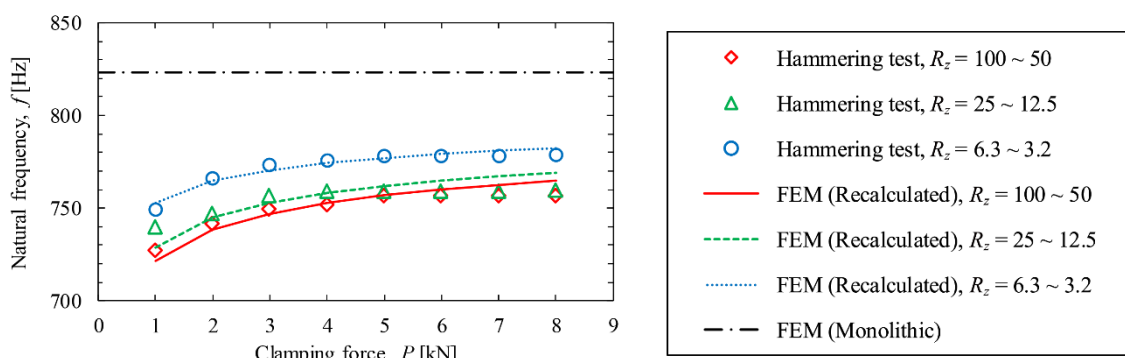


図2 ボルト・ナットの締付力を変化させたときの固有振動数(引用文献)

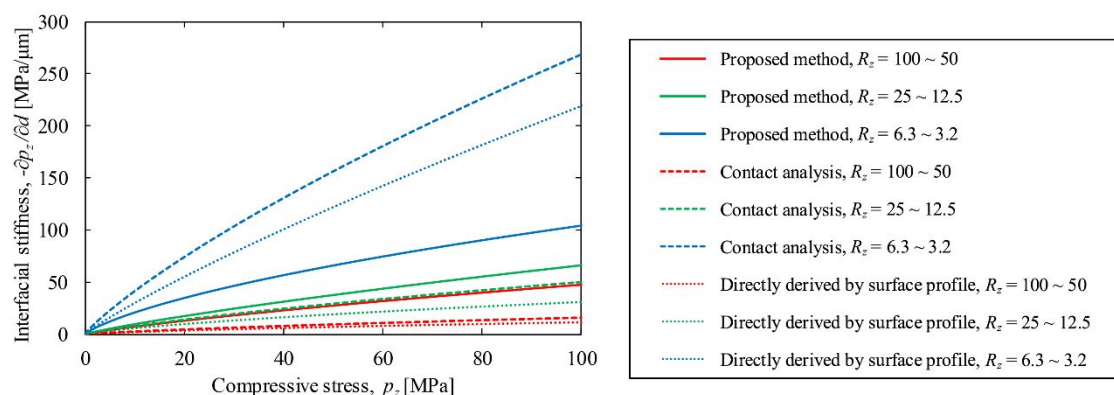


図3 接合部界面における圧縮応力と剛性変化の同定結果(引用文献)

(2) 界面における介在物の影響に関する調査

接合部界面に接着シートやガスケットを挿入した試験片を製作し、基礎試験片と同様の打撃試験と、本解析システムによるシミュレーションを行った。打撃試験の結果から、接合部界面に接着シートやガスケットを挿入すると、接合部界面の応力分布すなわちボルト・ナットの締付力の変化に対して、試験片の固有振動数の変化は緩やかになった(図4)。本解析システムによるシミュレーションではこの現象をよく再現できており、かつシミュレーションから得られた応力分布や固有振動数の計算値は妥当な数値であると考えられたことから、本解析システムは接合部界面に介在物が存在する場合でも適用できる可能性のあることがわかった。加えて、本解析システムの実用例として、トンネル天井板を模擬した鋼板とコンクリートブロックからなるミニチュア試験片に対しても適用を試みた。ここで、鋼板とコンクリートブロックの間には、ゴム製の支承材を挟んだ場合と挟んでいない場合の二通りに対して、打撃試験とシミュレーションを行った。打撃試験とシミュレーションの結果がよく一致したことから、本解析システムは原理的には有効に機能すると判断できた。

また、接合面上にサビを設けた試験片も用意した。具体的には、鋼板二枚を八組のボルト、ナット、座金で締結した後、塩水に浸して錆びさせた。試験片は錆びさせた後にボルト、ナット、座金を取り外したうえで固着した鋼板二枚を引きはがしてから再度組み立てた。サビのある試験片の固有振動数はサビのない試験片よりも低くなること、ならびに事前に実施した本解析システムによる数値シミュレーションの予測結果とよく一致することを確認した。したがって、被締結部材の表面がさびるだけでも明らかに試験片の固有振動数が低下することがわかった。

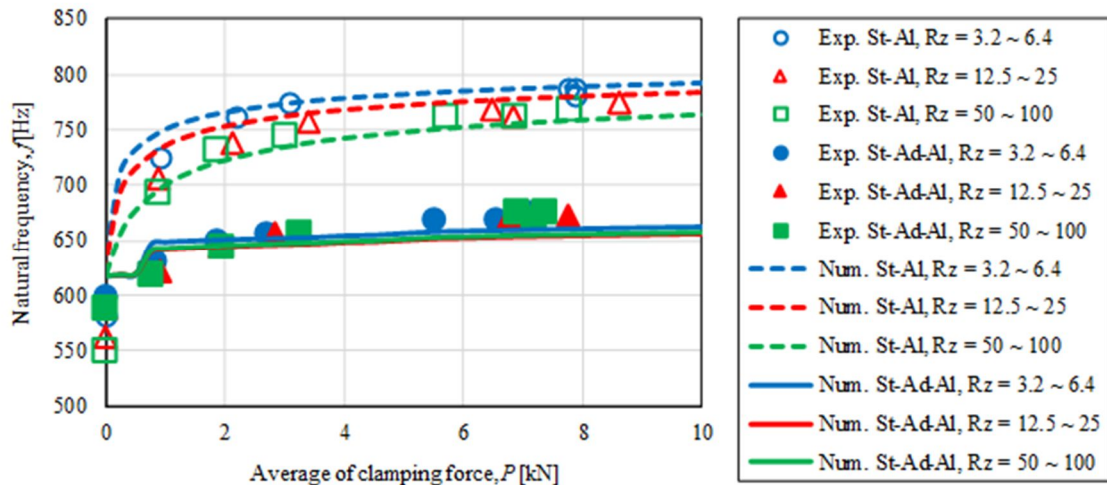


図4 接着シートの有無による試験片の固有振動数の違い (引用文献)

(3) 大規模シミュレーションおよびモデル簡略化の検討

自動車のフレームを1/10程度に縮小した模擬試験片を用意して、数値シミュレーションを実施したところ、ボルトの本数の増加や、接合部界面が多数存在するようになると、解析に要する計算時間が増加し、実用上十分な時間内で計算が終了しなかった。したがって、本解析システムを実用化するには、多数存在するボルトや接合部界面をいかに簡略化して、解析精度を保ちつつ、計算時間を短縮できるかに課題があると判断した。

ボルトおよび接合部界面の簡略化ノウハウの構築については、ボルト頭部の形状、ボルト孔の有無、ボルト頭部の有無、ボルト軸部の形状に着目した簡略化モデルを製作した(図5)。これらのモデルを用いた数値シミュレーションの結果から、ボルトの寸法がモデル全体と比較して大きくないことと、接合部界面に生じる圧縮応力分布が大きく異なることの二つが満たされれば、簡略化モデルにおいてもモデル全体の固有振動数は簡略化されていないモデルと比較して大差のないことがわかった。

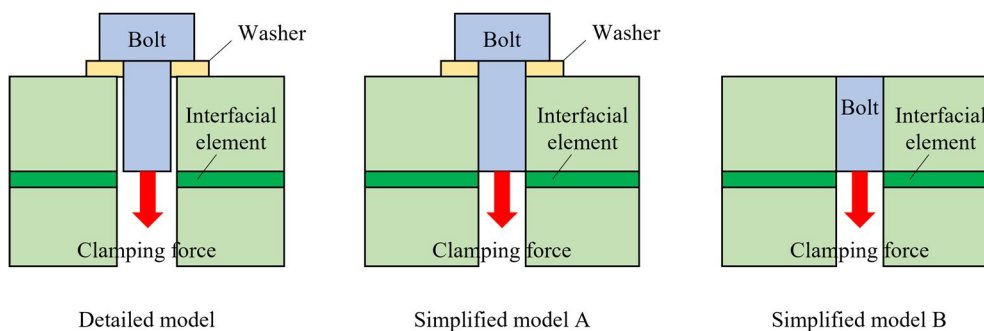


図5 ボルトおよび接合部界面の簡略化

さらに、本解析システムを用いて、ねじ部および座面部の界面剛性が固有振動数に与える影響を調べた。ねじ部および座面部が変形しない剛体モードの固有振動数には、ボルト・ナットの締付力の変化に伴うねじ部および座面部の剛性変化の影響は見られなかった。一方で、ねじ部および座面部が変形する振動モードの固有振動数には、ボルト・ナットの締付力の変化に伴うねじ部および座面部の剛性変化の影響が見られた。しかしながら、このときの固有振動数の大きさはボルトの寸法が小さくなるにつれて高くなり、これまで本研究で用いてきた試験片の固有振動数よりも極めて高かった。したがって、本研究の範囲内では、ねじ部および座面部の剛性変化の影響は小さく、無視できるものと判断した。

<引用文献>

Yoshinao Kishimoto, Yuki Yoshi Kobayashi, Toshihisa Ohtsuka, Akira Matsumoto, Motoi Niizuma, Estimation method of interfacial stiffness of bolted joint in multi-material structure by inverse analysis, Mechanical Engineering Journal, Vol.6, No.3, 2019, DOI: 10.1299/mej.18-00471.

岸本喜直, 小林志好, 大塚年久, 神保直紀, 篠原拓也, ボルト締結と接着を併用した接合体における界面剛性のマルチスケールモデリング, 日本機械学会 2020年度年次大会講演論文集, 2020, J04215.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 岸本喜直	4. 巻 76
2. 論文標題 界面の力学に基づいたねじ締結部の剛性シミュレーション	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 自動車技術	6. 最初と最後の頁 50-54
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 岸本喜直	4. 巻 65
2. 論文標題 ねじ締結体の剛性評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 機械設計	6. 最初と最後の頁 19-23
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 岸本喜直	4. 巻 50
2. 論文標題 ねじ締結部界面の剛性を考慮した有限要素法とその検証実験	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本ねじ研究協会誌	6. 最初と最後の頁 172-179
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 岸本喜直, 小林志好, 大塚年久, 小室貴太	4. 巻 75
2. 論文標題 接合部界面の剛性を考慮した有限要素法による鋼材とコンクリートからなるボルト締結体の振動シミュレーション	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集 A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_13-I_24
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscejam.75.2_I_13	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshinao Kishimoto, Yuki-yoshi Kobayashi, Toshihisa Ohtsuka, Akira Matsumoto, Motoi Niizuma	4. 巻 6
2. 論文標題 Estimation method of interfacial stiffness of bolted joint in multi-material structure by inverse analysis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 18-00471-1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/mej.18-00471	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計8件(うち招待講演 1件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Yoshinao Kishimoto, Yuki-yoshi Kobayashi
2. 発表標題 Simple modeling for stiffness evaluation of bolted joints using interfacial element
3. 学会等名 The 8th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshinao Kishimoto, Yuki-yoshi Kobayashi, Toshihisa Ohtsuka, Takuya Shinohara, Naoki Jimbo
2. 発表標題 Interfacial element for finite element modal analysis of bolted joints
3. 学会等名 14th World Congress in Computational Mechanics and ECCOMAS Congress 2020 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岸本喜直, 小林志好, 大塚年久, 神保直紀, 篠原拓也
2. 発表標題 ボルト締結と接着を併用した接合体における界面剛性のマルチスケールモデリング
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 Yoshinao Kishimoto
2. 発表標題 Inverse problems in interfacial mechanics of multi-material structures
3. 学会等名 The 6th Symposium on Theoretical and Applied Mechanics (Kick-Off Symposium of Japan Consortium for Theoretical and Applied Mechanics)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岸本喜直, 小林志好, 大塚年久, 松本爽
2. 発表標題 締結部界面の剛性を考慮した有限要素法によるボルト・ナット締結状態の評価に関する研究(プラスチック板と金属板を締結した場合への適用)
3. 学会等名 日本機械学会2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岸本喜直, 小林志好, 大塚年久, 小室貴太
2. 発表標題 トンネル天井板におけるボルト締付力の同定に関する研究(解析手法の有効性の検討)
3. 学会等名 第65回理論応用力学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岸本喜直, 小林志好, 大塚年久, 松本爽, 新妻基
2. 発表標題 マルチマテリアル構造におけるマクロスケールの界面剛性評価に関する研究(界面の輪郭曲線を用いたミクロスケールの有限要素法との比較)
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2018材料力学カンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岸本喜直
2. 発表標題 逆解析を援用した複合構造における界面の力学モデルの構築とその応用
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2018材料力学カンファレンス(招待講演)
4. 発表年 2018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
---------	---------