

令和 6 年 4 月 17 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14147

研究課題名（和文）厚肉シェル要素を導入する高精度・低コストな板曲げ加工モデルの開発

研究課題名（英文）Development of high-precision and low-cost plate bending model using thick shell element

研究代表者

山本 剛大（Yamamoto, Takeki）

広島大学・先進理工系科学研究科（工）・助教

研究者番号：00802860

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、板曲げ加工に対する生産性向上を目的とした数値シミュレーションの基盤となる高精度・低コストな板曲げ加工モデルを開発することを目的とした。本研究課題により、板厚方向の力学挙動を考慮した幾何学モデルの生成および厚肉シェル要素を用いた数値シミュレーション手法、弾塑性材料を対象とした非線形解析を効率的に実施するための計算アルゴリズムについての基本的な枠組みを構築することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、構造要素を用いてこれまで考慮できなかった板厚方向の力学挙動を考慮した幾何学モデルの生成とそれに基づく数値シミュレーション手法を提案した。これらの研究は、板曲げ加工に対する生産性向上を目的とした数値シミュレーションの開発の基礎であり、今後、設計段階や製造工程での金型製作および成形時に発生する不具合の原因究明などに用いられる技術発展が期待される。

研究成果の概要（英文）：The objective of this work is to develop a high accuracy and low cost plate bending model as a basis of numerical simulation for improving the productivity of plate bending. In this work, we construct the basic framework on the generation of the geometric model considering the mechanical behavior in the thickness direction, the technique of numerical simulation using thick shell element, and the numerical algorithm for efficiently performing the nonlinear analysis for the elastoplastic material.

研究分野：計算力学

キーワード：板成形 弾塑性 大変形 有限要素法 シェル要素

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ものづくりに広く用いられる板曲げ加工において、製造工程に要する時間や費用を削減するために、設計段階に数値解析技術が導入されている。このような中、研究代表者等の研究グループでは板曲げ加工に対する設計段階や製造工程での生産性向上を支援するための数値シミュレーション手法の開発を行っている。

板曲げ加工の生産性向上には、設計段階や製造工程での効率的な金型製作や成形時に発生する不具合の原因究明が重要となる。しかしながら、従来の板曲げ加工モデルに適用されるシェル理論では板厚方向に平面応力状態が仮定されるため、実際の板成形で生じる変形や応力を正確に評価できないことが課題として挙げられる。このように実際の現象と数値シミュレーションが乖離する問題は、自動車等の製造工程全体のコスト削減に向けた障壁となる。

その障壁をなくすためには、計算コストに対する優位性を損なわずにシェル要素を高精度化する必要がある。また、板材の力学挙動を再現するためには、板曲げ加工モデルに適用する材料モデルに実験データを組み込む必要があり、その材料モデルを加工せずに数値シミュレーションを実施すべきである。このような力学的な仮定を排除した数値シミュレーションの実現するために、研究代表者等は板厚方向の力学挙動を評価できる構造要素の開発および数値計算モデルの構築を目指し、研究を行ってきた。この研究課題に対しては、構造要素の枠組みで板厚方向の力のつりあい式を定義し、板厚変化を表現するための追加自由度に対する計算コストの増加を最小限に抑えることで、従来のシェル要素と同等の計算コストで高精度な結果が得られる数値解析技術を開発した。

このような背景の下で、板曲げ加工の生産性を向上させるための数値シミュレーション手法と力学的な仮定を排除した数値計算モデルを構築するためには、成形で生じる板材の変形を高精度に予測可能な数値解析技術が必須であると認識した。このようなシミュレーションを実現するためには、有限要素解析の基盤技術から改良する研究が必要であると考えた。

2. 研究の目的

本研究課題では板曲げ加工の生産性向上を支援するための数値解析技術として、板曲げ加工シミュレーションの基盤となる高精度・低コストな板曲げ加工モデルを構築することを目的とする。これにより、板成形で生じる変形や応力状態の評価のみではなく、成形時の接触を正確にモデル化して再現されるシミュレーションに基づいて、金型製作の方針を提供することが可能となる。さらに、成形時に発生する不具合の原因究明を目的とした再現解析の実施や金型寿命の予測を提示する板曲げ加工シミュレーションシステムの構築が可能になると考えている。

このような研究は、ものづくりに関わる幅広い製造業界において数値解析技術の有用性、信頼性の向上に貢献するものであり、計算力学の適用分野を新たに開拓する独創的な研究と位置づけられる。本研究課題では、板曲げ加工シミュレーションに適用するためのシェル要素の高精度化と板曲げ加工モデルの改良、板曲げ加工を再現するための力学モデルの生成とそのモデルを実装した数値シミュレーションを効率的に実施する技術を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究課題では、板曲げ加工の生産性向上の支援を目的とした高精度・低コストな数値シミュレーションを実現するために、研究期間内に取り組み課題として、次の3つのテーマを設定し、研究を実施した。

(1) 板曲げ加工を再現するための板材モデルの構築

板曲げ加工で生じる板材の挙動を再現するにあたって、実際の材料挙動を表現できる板材モデルの構築が不可欠である。そこで、本研究課題では実験結果等から得られた応力ひずみ線図に基づいて材料構成則を選定し、その材料モデルをそのまま幾何学モデルに適用する方法とそのモデルに基づく数値シミュレーション手法を開発する。

(2) 板曲げ加工で生じる力学挙動を考慮できる要素の開発

有限要素法を用いた高精度な板曲げ加工シミュレーションの実現には、実際の板成形で生じる現象を数値解析技術に組み込む必要がある。そのために、研究代表者等が提案する数値シミュレーション技術において実装可能な要素として、板曲げ加工で生じる力学挙動を考慮したシェル要素を開発する。

(3) 新しい要素を実装した数値シミュレーションの実現と数値計算モデルの妥当性検証

板材モデルの離散化に新しく開発した要素を適用し、板曲げ加工シミュレーションの基盤となる数値解析技術を確立する。高精度・低コストな要素の開発に加えて、本研究課題で提案する板曲げ加工モデルを実装した数値シミュレーションの高速化に向けた新たな手法を検討する。開発した数値シミュレーションの結果を基に、提案する板曲げ加工モデルの妥当性を検証する。

4. 研究成果

本研究課題で設置した上述の3つの技術課題に対して、それぞれ以下のような研究成果が得られた。

(1) 板曲げ加工を再現するための板材モデルの構築

板曲げ加工で生じる板材の材料挙動を数値シミュレーションで再現するためには、力学的な仮定を含まない材料モデルを用いて、板材をモデル化する必要がある。金属材料に対する板材モデルの構築を想定した場合、異方性を考慮した構成則では実験から得られる応力ひずみ線図を表現するための材料パラメータが大幅に増加する。そこで本研究では、まず、応力ひずみ線図の特徴を十分に表現可能な材料モデルの選定を目的として、等方性材料でのパラメータ同定を検討した。令和4年度の研究では、板曲げ加工によって板材に生じるひずみの大きさを設定し、パラメータ同定に用いる応力ひずみ線図の範囲を変化させながら、材料構成則に含まれる各パラメータの感度解析を実施した。その分析結果を基に、令和5年度の研究では実験から得られる応力ひずみ線図に対する各パラメータの同定を行い、同定したパラメータを用いた材料モデルを数値シミュレーションに実装した。

材料モデルの妥当性検証として、板厚方向に対して平面応力が仮定される従来のシェル要素、研究代表者等が開発した板厚方向の力学挙動を評価できる厚肉シェル要素、3次元挙動をそのまま表現できるソリッド要素の3種類の数値計算モデルを用意し、要素レベルでの材料挙動を比較した。面内方向の荷重に対しては3種類の要素で力学挙動がほぼ等しく、従来のシェル要素でも十分な表現性能を有することが確認できた。一方、板曲げ加工のような面外方向に作用する荷重に対しては従来のシェル要素で表現できない変形状態を確認した。それに対して、板厚方向に平面応力状態を仮定しない厚肉シェル要素では、ソリッド要素と同様に3次元の変形挙動が表現できることを示した。

(2) 板曲げ加工で生じる力学挙動を考慮できる要素の開発

金属材料の塑性変形は微圧縮状態を示すことが知られており、板厚変化を含む3次元挙動の表現が重要となる。本研究では、板材モデルの離散化に厚肉シェル要素を適用する。厚肉シェル要素では、板厚方向のつりあい式を定義し、要素ごとに板厚変化を表現するための自由度が追加される。このとき、隣り合う要素で板厚が独立であると仮定することで、追加された自由度を要素レベルで縮約することが可能となり、解くべき連立方程式の未知数の数が従来のシェル要素と同等になる。これにより、各要素で縮約操作に伴う逆行列の演算のみが追加される分だけ計算コストは増加するが、その増加分は事前の見積もりが容易で、連立方程式の求解に比べて十分に小さいことが確認できており、厚肉シェル要素を用いた数値シミュレーションは実用に耐えうる技術といえる。令和4年度には、厚肉シェル要素の特性を生かし、局所的な挙動を表現するためのパラメータを積分点レベルで導入した。そのようなパラメータの追加は連立方程式の求解と独立しており、板厚変化を表現するために追加した自由度の増加と同等であるため、新たな定式化による計算コストの増加は軽微とみなせる。この定式化により、厚肉シェル要素の表現性能が向上した。

板成形の再現解析には、工具と金型の接触面を厳密に定義して表現することが不可欠となる。本研究課題では、板材のモデル化に厚肉シェル要素を採用する。厚肉シェル要素では、板厚変化を表現する自由度で区切られた構造を積層とみなすことで、板内部および板表面の位置を定義できる。この考え方にに基づき、令和4年度には表面力に対する仮想仕事に通常の節点に対する仮想仕事と追加の自由度に対する仮想仕事に分離されることを明らかにし、シェル要素の枠組みで板表面に作用する外力を直接扱える定式化を実現した。さらに、令和5年度には追加の自由度に対して幾何学的な拘束条件を与える定式化を行い、板表面で生じる反力の妥当性を評価することで、板厚方向の変形を積極的に取り扱うことができる厚肉シェル要素を確立した。

(3) 新しい要素を実装した数値シミュレーションの実現と数値計算モデルの妥当性検証

板曲げ加工の生産性を向上するための数値シミュレーションでは、本研究課題が目指す高精度・低コストな板曲げ加工モデルを基盤技術とすることを想定している。本研究では、その基礎技術の開発と並行して、弾塑性材料を対象とした非線形解析を効率的に実施するための計算アルゴリズムを検討した。令和4年度には微小変形弾塑性問題に対する計算アルゴリズムを提案し、令和5年度にはそのアルゴリズムを拡張して、大変形弾塑性問題に対する計算アルゴリズムを確立した。計算アルゴリズムの妥当性・有効性については、数値計算の収束性・安定性・収束速度の観点から定量的に評価し、実用に耐えうる技術を確立した。

新しい厚肉シェル要素を研究代表者等が開発している有限要素解析プログラムに実装した。新しい要素の実装では、これまでの要素開発の知見を生かし、要素特性を把握するためのパッチテストを実施して、新しい要素に対して数値計算上の不安定性がないことを確認した。新たに開発した厚肉シェル要素の精度と計算コストを評価するために、平板を新しい厚肉シェル要素、ソリッド要素でそれぞれ離散化し、面内方向の変形、曲げを伴う面外方向の変形に対する計算精度を比較した。現状の厚肉シェル要素の性能では、幾何学的な拘束条件近傍に生じる局所変形の表現がソリッド要素と異なるが、大域的な変形挙動は同等とみなせることを定量的に示した。そのような表現性能の改良については、今後の検討課題である。また、厚肉シェル要素による離散化

は従来のシェル要素と同様であり，入力データの作成から幾何学モデルの生成まで，特別な処理が必要なく，通常の有限要素解析に実装できることを確認した．

以上より，本研究課題が目指した板曲げ加工シミュレーションの基盤となる高精度・低コストな板曲げ加工モデルの構築に対して，力学的な仮定を排除した数値計算モデルの開発は達成された．しかしながら，研究期間内においては，提案する数値計算モデルを用いた接触解析を伴う板曲げ加工シミュレーションを実施する段階までには到達することはできなかった．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 山本 剛大, 山田 貴博, 松井 和己	4. 巻 88 巻
2. 論文標題 Block Newton法による内部反復のない超弾性シェル の有限要素解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 22-00150
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.22-00150	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 -

1. 著者名 Takeki Yamamoto, Takahiro Yamada, Kazumi Matsui	4. 巻 71
2. 論文標題 Introduction of pseudo-stress for local residual and algebraic derivation of consistent tangent in elastoplasticity	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Computational Mechanics	6. 最初と最後の頁 1081 ~ 1091
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00466-023-02268-0	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 Takeki Yamamoto, Takahiro Yamada, Kazumi Matsui	4. 巻 72
2. 論文標題 Elastoplastic analysis of shells without any local iterative calculations by block Newton method	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Computational Mechanics	6. 最初と最後の頁 967 ~ 989
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00466-023-02322-x	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山本 剛大, 山田 貴博, 松井 和己
2. 発表標題 平面応力弾塑性解析へのBlock Newton法の適用
3. 学会等名 第27回計算工学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takeki Yamamoto, Takahiro Yamada
2. 発表標題 Elastic Buckling of Cylindrical Shell Subjected Pressure Load at Surface
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics & 8th Asia Pacific Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山本 剛大, 山田 貴博, 松井 和己
2. 発表標題 Block Newton法の大変形弾塑性問題への適用
3. 学会等名 第28回計算工学講演会
4. 発表年 2023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
---------	---------