

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05737

研究課題名(和文) 高精度大ひずみ弾塑性材料モデルを用いた一貫成形FEMの開発とその応用

研究課題名(英文) Development of integrated forming finite element method with high accurate elasto-plastic material model at large strains and its applications

研究代表者

上森 武 (Uemori, Takeshi)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：70335701

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、一貫成形過程で起こる不具合を事前に予測できる高精度FEMを開発した。本システムを開発する為に、高精度降伏関数(Yoshida6次降伏関数)と高精度移動硬化モデル(Yoshida-Uemoriモデル)を商用FEMに導入した。開発したシステム検証のため、二軸圧縮試験、面内繰返し反転試験を行った。本研究で開発したシステムの解析結果と実験結果は一致した。また、上記システムを使用した圧延加工後のテンションレベラ解析(一貫成形工程の解析)を実施した。解析結果は実験結果を精度良く再現できた。

研究成果の概要(英文)：In the present research, finite element methods with high accuracy were developed for the improvement of predicting defaults during metal forming before producing industrial products. In order to realize the above mentioned systems, the high accurate yield function "Yoshida 6 order yield function" and the high accurate kinematic hardening model "Yoshida-Uemori model" were introduced into the commercial finite element methods. To verify the developed system, two kinds of basic mechanical tests "bi-axial compression test" and "cyclic tension-compression test" for a pure aluminum sheet were conducted. The calculated responses (Equi-plastic strain loci and cyclic stress-strain responses) could capture the corresponding experimental data accurately. For further investigations, finite element simulations of tension levelling process after rolling deformation were carried out. The calculated results showed good agreements with the experiment.

研究分野：弾塑性力学

キーワード：弾塑性材料モデル 大ひずみ 一貫成形

1. 研究開始当初の背景

自動車業界を中心に、車体軽量化と衝突安全性対策の観点から、様々な特徴のある金属材料（高強度や高延性など）のプレス成形品が使用され始めている。しかしながら、超高張力鋼板やアルミニウム板などは、プレス成形後に板材内部に発生する残留応力とそれに起因するスプリングバック（弾性回復）変形に悩まされている。

特に、数値シミュレーション技術が著しく進展した現在においても、日本においては、金属加工シミュレーションの精度は低く、ドイツが提唱している”インダストリ 4.0”のような工業製品の一貫成形工程の構築には至っていない。そのような流れを打破すべく、板材矯正過程 - プレス成形過程 - スプリングバック過程という一貫成形（大ひずみ変形）過程において、金属材料内部の残留応力と変形形状を高精度に計算する CAE の開発とその実験検証を行う必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、板材矯正過程 - プレス成形過程 - スプリングバック過程という一貫成形（大ひずみ変形）過程において、金属材料内部の残留応力と変形形状を高精度に計算するシステムの構築とその実験検証を目的とする。

本研究の特徴は、開発する材料モデルが大ひずみ域におけるバウシガ効果と降伏曲面形状変化を再現でき、結果として得られる。残留応力値が定性・定量的に正しいユーザーフレンドリーなシステムを構築する点である。

3. 研究の方法

(1) 研究の方法は、高強度材料である高張力鋼板と高延性材料であるアルミニウム板材の圧延加工からテンションレベラ加工、そしてその後のプレス成形に至る一貫成形工程を高精度にシミュレート可能な CAE 解析ソフトウェアの構築である。

(2) それを行う為に、本研究では、大ひずみ面内繰返し反転試験および二軸圧縮試験装置による材料の弾塑性変形挙動の実験観察を行う。

(3) さらに上記研究で得られた変形挙動を高精度に再現可能な弾塑性材料モデル（応力ひずみ関係を再現する数式）の提案を行う。

(4) 上記弾塑性材料モデルを金属材料の一貫成形工程の解析を商用有限要素解析に導入し、そのソフトウェアを用いた圧延加工 - テンションレベラ加工 - プレス成形加工 - 加工後に発生するスプリングバックという一連の工業生産工程の数値解析を行う。また得られた結果と実験結果を比較することで、開発したシステムの妥当性を検討する。

4. 研究成果

(1) 弾塑性構成モデルの改善：本研究では、金属材料の繰返し塑性変形・加工硬化挙動の再現精度を更に改善するために、新しい高精度材料構成式の提案を行った。行った材料構成式の詳細については紙面の都合上割愛するが、大きな変更点として、従来の Yoshida-Uemori モデルにおいて材料の加工硬化を表す材料パラメータの発展式に、Swift や Voce 型の等方硬化型の発展式を導入した。それにより、大ひずみ域における金属材料の加工硬化挙動を再現することができている。一例として、以下に高張力鋼板の面内繰返し反転挙動解析結果と、同鋼板のビード引抜き試験解析条件・同結果を併せて示す(図1~3)。なお、ブランク引抜き速度は 1.0mm/min である。

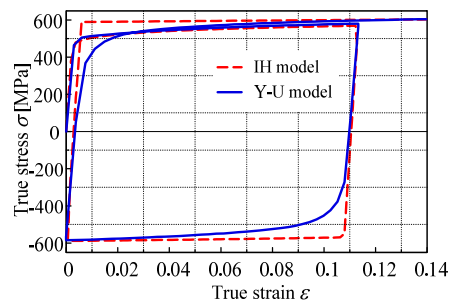


図1 面内繰返し反転計算結果（赤：等方硬化モデル，青：大ひずみ域における加工硬化則を導入した新 Yoshida-Uemori モデル）。

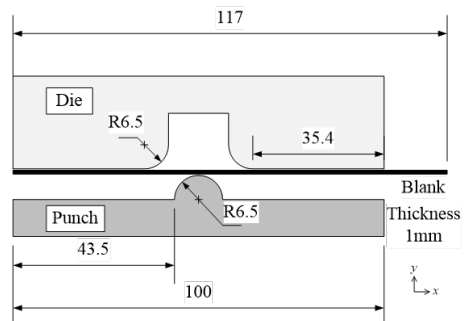


図2 ビード引抜き解析条件

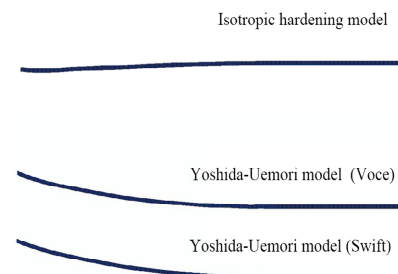


図3 最終形状（引抜き解析結果）

本結果より、従来の Yoshida-Uemori モデルでは、ブランク最終形状が平坦な形状となっている。これとは大きく異なり、大ひずみ域における加工硬化挙動を再現可能な新 Yoshida-Uemori モデルの方が大きな残留そり

を計算していることが分かった。これは、ビード部においてブランクに大きな繰返し曲げ変形が付与され、その変形により大きな加工硬化がブランクに付与された結果である。

(2) 異方性降伏関数とバウシング効果を再現する材料モデルの融合：本研究では、高精度プレス成形解析において金属薄板材料の持つ複雑な塑性異方性とバウシング効果を考慮した数値解析を実施した。解析で使用した材料は5000系および6000系アルミニウム合金である。解析にはU曲げを設定し、塑性異方性ならびにバウシング効果の考慮有無がスプリングバック量に与える影響について解析的に検討した。また、解析結果の妥当性検証の為、解析と同条件のプレス成形解析を行った(図4~5)。



図4 U曲げ後のスプリングバック角度

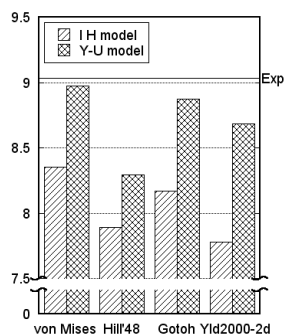


図5 塑性異方性とバウシング効果がスプリングバック角度に与える影響

得られた結果より、塑性異方性ならびにバウシング効果の考慮は不可欠であること、また適切な降伏関数や移動硬化則を適用しなければ、高精度予測はできないことが分かった。

(3) 大ひずみ域高精度弾塑性構成式を使用した圧延加工 - テンションレベラ加工解析：(1)および(2)で示した、塑性異方性とバウシング効果を共に再現可能な弾塑性材料モデルを導入した汎用 FEM による圧延加工 - テンションレベラ加工解析を実施した。上記一貫工程を計算することで、通常は、各工程後で検討していた塑性異方性などを連像的に予測することが可能となった。しかしながら、計算時間の問題、また安定した数値解析を実行するために、若干の問題を抱えており、この点については今後も検討を行う必要があることが確認された。なお、上記問題を克服する研究については、静的陰解ソルバー

で必要となる応力求解におけるサブステップの導入とサブステップ間で得られた接線係数行列の平均化などの様々な新しい数値解析手法により、計算継続のための安定性の大幅な改善が確認されており、継続的な検討を行うことで、本問題を解決する予定である。なお、その方法や検討結果については今後の学会などで報告予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

Takeshi Uemori, Tetsuo Naka, Naoya Tada, Hidenori Yoshimura, Takashi Katahira, Fusahito Yoshida, Theoretical predictions of fracture and springback for high tensile strength steel sheets under stretch bending 査読有, Vols.207, 2017, 1594-1598.

DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.1054

Shinobu Narita, Kunio Hayakawa, Yoshihiro Kubota, Takafumi Harada, Takeshi Uemori, Effect of Hardening Rule for Spring Back Behavior of Forging, Procedia Engineering, 査読有, Vols.207, 2017, 167-172.

DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.1054

成田忍, 上森武, 早川 邦夫, 久保田 義弘, 冷間多段鍛造による非調質ボルトの成形および強度解析に及ぼす硬化則の影響, 塑性と加工, 査読有, 57 巻, 2016, 50-56.

Fusahito Yoshida, Hiroshi Hamasaki, Takeshi Uemori, Description of Closure of Cyclic Stress-Strain Loop and Ratcheting Based on Y-U Model, 査読有, Key Engineering Materials Vols.725, 2016, 351-358.

DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.725

Takeshi Uemori, Kento Fujii, Toshiya Nakata, Shinobu Narita, Naoya Tada, Tetsuo Naka, Fusahito Yoshida, Springback Analysis of Aluminum Alloy Sheet Metals by Yoshida-Uemori Model, Key Engineering Materials, 査読有, Vols.725, 2016, 566-571.

DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.725

上森武, 澄川智史, 中哲夫, 麻寧緒, 吉田総仁, アルミニウム合金板のスプリングバックに及ぼすバウシング効果と異方性の影響, 軽金属, 査読有, 65 巻, 2015, 582-287.

〔学会発表〕(計 7 件)

坂田彰生, 多田直哉, 上森武, 成田忍, 圧延・矯正加工がアルミニウム板材の機械的特性に与える影響についての解析的検討, 日本機械学会中四国支部, 第56期総会講演会, 平成30年3月7日(水), 徳島大学(徳島県徳島市).

坂田彰生, 多田直哉, 上森武, 成田忍,

中田隼矢, 商用有限要素法への高精度材料構成式導入と深絞り加工解析, 日本金属学会・日本鉄鋼協会 中国四国支部, 中国四国支部第 36 回若手フォーラム, 平成 30 年 2 月 17 日(金), 岡山国際交流センター(岡山県岡山市).

坂田彰生, 上森武, 多田直哉, 中田隼矢, 大ひずみ域における加工発展を考慮した Yoshida-Uemori モデルによる高張力鋼板のスプリングバック解析, 日本材料学会「材料シンポジウム」ワークショップ, 平成 28 年 10 月 11 日(火)・14 日(金), 京都テルサ(京都府京都市).

成田忍, 上森武, 早川邦夫, 鍛造シミュレーションにおける見かけのヤング率の塑性ひずみ依存性とその影響, 日本塑性加工学会第 67 回塑性加工連合講演会, 平成 28 年 10 月 21 日(金)・23 日(日), 日本工業大学(埼玉県南埼玉郡).

上森武, 坂田彰生, 成田忍, 吉田総仁, 中田隼矢, 多田直哉, 大ひずみ域での加工硬化を考慮した Yoshida-Uemori モデルによるスプリングバック解析, 日本塑性加工学会第 67 回塑性加工連合講演会, 平成 28 年 10 月 21 日(金)・23 日(日), 日本工業大学(埼玉県南埼玉郡).

上森武, 多田直哉, 中田隼矢, 藤井健斗, 吉田総仁, 瀧澤英男, 成田忍, 均質化結晶塑性有限要素法によるアルミニウム合金の変形解析と成形解析への応用, 軽金属学会第 129 回秋期大会, 平成 27 年 11 月 21 日(土)・22 日(日), 日本大学生産工学部 津田沼キャンパス(千葉県習志野市).

成田忍, 上森武, 早川邦夫, 久保田義弘, 複合硬化則の多段鍛造成形シミュレーションの適用に関する検討, 日本塑性加工学会第 66 回塑性加工連合講演会, 平成 27 年 10 月 29 日(木)・31 日(土), いわき市文化センター(福島県いわき市).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:

権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等
無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上森 武 (UEMORI Takeshi)
岡山大学・大学院自然科学研究科・准教授
研究者番号: 70335701

(2) 研究協力者

多田 直哉 (TADA Naoya)
吉田 総仁 (YOSHIDA Fusahito)
成田 忍 (NARITA Shinobu)