

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420776

研究課題名(和文) プレス成形における素材の初期残留応力の影響の予測・評価手法の確立

研究課題名(英文) Establishment of prediction and evaluation techniques of the effect of initial residual stress in sheet metal forming process

研究代表者

早川 邦夫 (Hayakawa, Kunio)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：80283399

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)： プレス加工など塑性加工に供される金属板材の初期残留応力が、成形後の部品の形状精度におよぼす影響は、部品形状や部位によっては無視できない問題となる。そこで、本研究では、「プレス成形用金属板材の加工前残留応力の高精度な予測」、「加工前残留応力がプレス成形製品の寸法精度や強度に及ぼす影響の評価」を目的として、研究を行った。

その結果、圧延後の矯正工程により導入される残留応力の詳細を高精度構成式を用いて予測できた。また、矯正前後の残留応力の2次元検出器によるX線評価装置を用いた測定による評価と解析結果との比較をおこない、実際の矯正工程における素材の残留応力のその場測定の可能性について明らかにした。

研究成果の概要(英文)： In the present study, the effect of initial residual stress of sheet metal, which is induced by the rolling and leveling processes, on the prediction of the geometry and subsequent residual stress of the formed sheet, as well as the precise observation of surface residual stress of sheet metal is investigated.

As a result, the precise prediction of the residual stress after forming was performed by using the high-precision constitutive equation. Furthermore, the precise observation of residual stress of the sheet metal after the leveling process by using 2-dimensional X-ray diffraction apparatus and the comparison of the observed data with the calculated results was performed. Finally, the possibility for on-site observation of the residual stress of the sheet metal under the leveling process using the 2-dimensional X-ray diffraction apparatus was revealed.

研究分野：塑性加工学

キーワード：残留応力 プレス成形 金属薄板 X線 2次元検出 矯正工程

### 1. 研究開始当初の背景

プレス加工など塑性加工に供される金属板材は、圧延・熱処理の残留応力により平坦度不良を引き起こす。その平坦化のためにプレスやローラーを利用する矯正工程にて再度付与される。さらに、プレス加工現場への納入に際しては、しばしばロール状で運搬され、加工現場での矯正工程にて真直にされ加工に供される。このようにプレス加工では、加工前から複雑な残留応力が素材に導入されている。この初期残留応力が、成形後の部品の形状精度におよぼす影響は、部品形状や部位によっては無視できない問題となる。

矯正工程が素材に及ぼす影響については、平成 17~20 年度に日本鉄鋼協会で「矯正工程の高精度化・高機能化」が実施された。研究会では、主に数値解析による矯正メカニズムの解明に主眼をおいた取組みが実施され、大きな成果を残した。申請者は、この研究会に参加し、これまでに、形鋼のローラー矯正の動的有限要素解析を行い、初期不整形の矯正後形状に及ぼす影響や塑性ひずみ分布やローラー荷重を明らかにしてきた。しかし、その研究会では、研究の多くが矯正後鋼材の平坦度に着目したものであり、残留応力に関しては定量的な把握・評価は十分には行われていない。また、操業現場では主に平坦度管理が行われているのみであり、顕在化しない残留応力の定量的な把握まではなされていない。

軽量化と安全性の両立のため多用される高張力鋼板や、意匠性の高いステンレス鋼板などは難加工材としても知られ、現状では有限要素解析による加工時の割れ、しわの発生や、スプリングバック後の形状を解析することにより加工の可否や寸法精度の予測が行われる。特に、Yoshida and Uemori による弾塑性構成式の有効性が多く調べられている。研究代表者らも、ステンレス鋼板のプレス加工における上記モデルの適用の有効性や、さらなる課題について調べている。特に、高張力鋼板の初期残留応力はプレス加工後の残留応力と比較して無視できないレベルの大きさであり、素材の初期残留応力を考慮することは、解析のさらなる高精度化に非常に有効であると考えられる。

X 線などの放射光を用いた残留応力の非破壊評価は、研究分担者の研究も含めこれまで多くの研究が行われている。しかし、多くの残留応力測定研究は、溶接部や熱処理部位など明らかに大きい残留応力に対する研究が主である。また、通常プレス成形に用いられる鋼板は、その加工性向上のため、面内異方性をあえて増加させていることが多い。そのため、このような異方性を考慮することが重要であるが、これについてはそれほど多くの研究は行われていない。塑性加工分野において矯正工程前後の残留応力の変化やその定量化については、鉄鋼メーカー、大学等研究機関においても研究は進んでいない。しかし、

その重要性はますます高くなっている。

### 2. 研究の目的

本研究の主目的は、  
・プレス成形用金属板材の加工前残留応力の高精度な予測

・加工前残留応力がプレス成形製品の寸法精度や強度に及ぼす影響の評価  
である。

そのために、以下の研究を行う。

・矯正工程の高精度有限要素解析による残留応力予測とその場計測による残留応力評価ならびに両者の比較

・初期残留応力を考慮したプレス成形シミュレーションによる製品寸法・強度の高精度予測

### 3. 研究の方法

1) 矯正工程中の金属板材の残留応力の高精度有限要素解析

圧延後の矯正工程により導入される残留応力の詳細を調べるため、ローラー矯正や調質圧延などの過程の有限要素解析を実施し、どのような残留応力が導入されるかを予測する。さらに、その結果を引継いだプレス成形解析を行うための手法を構築する。

矯正工程における残留応力の高精度な予測には、陰的静解法による解析が必要である。また、Yoshida-Uemori モデルのような高精度な弾塑性構成式を用いる必要がある。そのため、連携研究員（上森武、近畿大学、上記モデルの共同開発者）と連携し、構成式のさらなる高精度化とその実装について情報交換・協働する。

2) 矯正前後の残留応力の X 線評価装置による測定による評価と解析結果との比較

実際の矯正工程における素材の残留応力のその場測定を、購入予定の X 線残留応力装置にて行う。本装置はポータブル性に優れており、鉄鋼メーカーのエンジニアとも協力し、実操業現場にて測定を行う。

X 線による残留応力測定は、主に表層のみの評価となる。そこで、有限要素解析結果による板厚方向残留応力分布と比較する必要がある。このように解析結果と実際の評価にて校正された残留応力分布を明らかにする。

また、本装置は、従来多く用いられている  $\sin^2\psi$  法ではなく、デバイ環全てを取得し、残留応力の有無によるそのずれから残留応力を評価する  $\cos\alpha$  法である。この  $\cos\alpha$  法の妥当性および限界を、本学所有の  $\sin^2\psi$  法による残留応力測定装置による測定も用いて説明する。

### 4. 研究成果

1) 残留応力を高精度に予測・再現できる弾塑性構成式の開発

Yoshida-Uemori モデルを改良し、矯正工程や高ひずみ域での加工硬化挙動を再現できる構成式を開発した。さらに、簡便な表記で

接線係数を十分な精度(理論誤差  $10^{-8}$  以下)で計算し、複雑な工具接触問題も安定的に解析可能となり、残留応力を高精度に検証することが可能となった。

3) 矯正工程前後の残留応力の高精度非破壊測定技術の開発

X線による cosa 法をベースにした新たな残留応力の高精度測定技術を開発した。高精度な非破壊応力評価には、平均的な弾性的性質を実測し、X線応力測定に必要な特定回折面の応力定数を求める必要がある。本研究では製造ばらつき(矯正前/矯正条件)を考慮した実機での矯正前後の実鋼板の測定は断念したため、真の意味での残留応力測定ならびに実機での変化に富む金属組織での研究を実施できず、実生産の鋼材に対する本残留応力測定手法の信頼性向上に対する知見を得るまでには至らなかった。

4) 板プレス成形解析における素材初期残留応力の影響の評価

プレス成形シミュレーションにおいて、矯正時に導入された残留応力の有無が、加工後の応力分布および形状に及ぼす影響を評価した。対象として 1) 長方形素板をローラーベラーへ模擬した繰返し 4 点曲げ後のハット曲げ加工、2) 実生産(多段工程)されるプレス成形部品を選択した。

成形実験、残留応力測定と同時に有限要素解析を行った結果、以下が明らかになった。  
・局所的な変形を伴わない領域でも、加工中に降伏応力を超える張出し/圧縮や曲げ変形を受ける領域では、初期残留応力の数倍の応力が付与されるため、初期応力の影響はほとんど消失。

・加工中に降伏応力を超えるような応力が与えられない領域では、初期残留応力の影響で寸法精度の低下が見られる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 0 件)

[学会発表](計 8 件)

早川邦夫: 鋼材矯正後残留応力の予測・評価, 日本塑性加工学会圧延工学分科会第 122 回研究会, 2016 年 3 月 11 日, 東京電気大学(東京都足立区)。

林拓海, 坂井田喜久, 早川邦夫, 矢代茂樹: cos 法による鋼板の矯正加工時の X 線応力測定, 日本材料学会第 49 回 X 線材料強度に関するシンポジウム, 2015 年 7 月 16, 17 日, エル・おおさか(大阪市)。

坂井田喜久, 林拓海, 早川邦夫: 圧延鋼板の表面残留応力測定, 日本鉄鋼協会第 169 回春季講演大会シンポジウム, 2015 年 3 月 19 日, 東京大学駒場キャンパス(東京都目黒区)。

早川邦夫: 鋼板初期残留応力を考慮したプレ

ス成形解析, 日本鉄鋼協会第 169 回春季講演大会シンポジウム, 2015 年 3 月 19 日, 東京大学駒場キャンパス(東京都目黒区)。  
林拓海, 坂井田喜久, 早川邦夫, 矢代茂樹: cosa 法による鋼板の矯正加工時の X 線応力測定, 日本材料学会第 48 回 X 線材料強度に関するシンポジウム, 2014 年 07 月 24 日, エル・おおさか(大阪市)。

上森武, 瀧口三千弘: 複素数階微分法を用いた商用 FEM ユーザーサブルーチン構築とその応用, 日本鉄鋼協会第 167 回春季講演大会, 2014 年 3 月 23 日, 東京工業大学(東京都目黒区)。

早川邦夫・坂井田喜久, 上森武: 初期残留応力を考慮した鋼板の繰返し 4 点曲げに対する有限要素解析, 日本鉄鋼協会第 167 回春季講演大会, 2014 年 3 月 23 日, 東京工業大学(東京都目黒区)。

坂井田喜久, 林拓海, 早川邦夫: cosa 法による鋼板の X 線残留応力測定, 日本鉄鋼協会第 167 回春季講演大会, 2014 年 3 月 23 日, 東京工業大学(東京都目黒区)。

[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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

早川 邦夫 (Hayakawa, Kunio)  
静岡大学・工学部・教授  
研究者番号: 80283399

### (2) 研究分担者

坂井田 喜久 (Sakaida, Yoshihisa)  
静岡大学・工学部・教授  
研究者番号: 10334955

(3)連携研究者

上森 武 (Uemori, Takeshi)

岡山大学・工学部・准教授

研究者番号：70335701