

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 22 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24360056

研究課題名(和文) 材料・力学メタモデル構築によるスプリングバック補正プレス金型の最適設計

研究課題名(英文) Optimum press-die design for springback compensation by material-mechanical meta-model building

研究代表者

吉田 総仁 (Yoshida, Fusahito)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50016797

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：近年、自動車業界では車体の軽量化と衝突安全性の向上のために高張力鋼板とアルミニウム板が多く使われてきている。こうした板材のプレス成形のために、スプリングバックの制御と補正はキーテクノロジーとなる。本研究では、U曲げ、ハット曲げにおけるスプリングバックの解消のために、カウンタパンチによる付加的曲げを用いた新しい工法を開発した。このプロセスのために、最適金型形状およびプロセスパラメータ(板押さえ力、決め押し力、カウンタパンチ力)を決定した。さらに、より精度の高い成形とスプリングバックのシミュレーションのために、異方性の発展とバウシinger効果を同時に表現できる異方硬化塑性モデルを提案した。

研究成果の概要(英文)：Nowadays, high strength steel sheets and aluminum sheets are increasingly used in automotive industry for the weight reduction and crush-safety worth of car structures. Springback control and compensation is a key technology in press forming of these sheet metals. In the present work, a new technology of springback elimination, by applying an additional bending by a counter-punch, was presented for U- and Hat-shaped sheet products. For this process, optimum die-shapes and process parameters (sheet-clamping, bottoming, and counter-punch loads) were determined. Furthermore, for accurate numerical simulation of sheet metal forming and springback, an anisotropic hardening model of plasticity to describe the anisotropy evolution together with the Bauschinger effect was proposed.

研究分野：Engineering elasto-plasticity

キーワード：板材成形 プレス金型 スプリングバック 最適プロセス

1. 研究開始当初の背景

近年、自動車業界では車体の軽量化と衝突安全性の向上のために高張力鋼板とアルミニウム板が多く使われてきている。こうした板材のプレス成形のために、スプリングバックの制御と補正はキーテクノロジーとなる。

そのために、最適な金型形状とプロセスパラメータを CAE により決定することは生産準備段階で極めて重要となる。しかし、スプリングバックの CAE による予測については多くの研究はあるものの、CAE と最適化理論により金型形状やプロセスパラメータを決定する研究は極めて少ない。その理由のひとつとして、高精度かつ計算コストの低いモデルの構築が難しいという問題があり、さらに、スプリングバック補正や抑制に対する工法が限られているという問題があった。

2. 研究の目的

本研究では、スプリングバックを抑制あるいは適切に補正できる新しい工法を提案するとともに、そのための最適な金型形状およびプロセスパラメータを決定する方法論を確立することを目的としている。

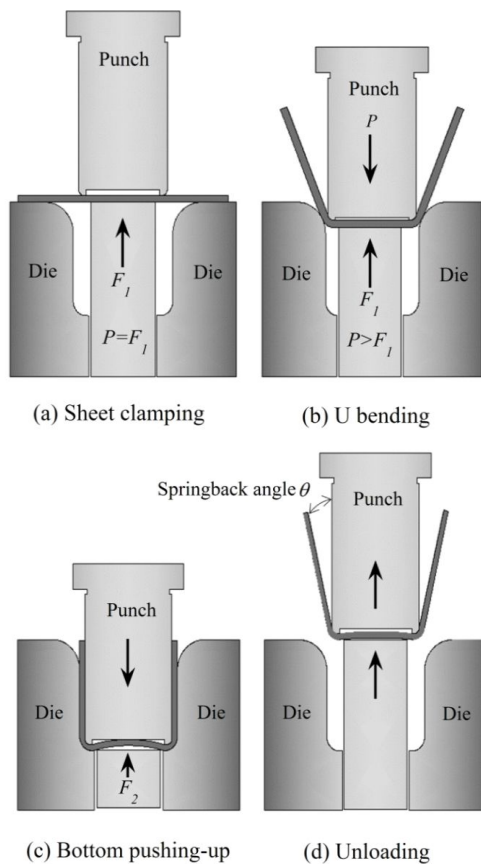


Fig. 1 スプリングバック低減のためにカウンターパンチによる付加曲げを行う新しい U 曲げ工法

また、この数値シミュレーション・最適化のための材料モデルおよび解析(力学)モデルについても検討を行う。

3. 研究の方法

スプリングバックの大きなケースとして、高張力鋼板(590~980MPa レベル)の U 形およびハット形の曲げについて検討を行った。また、一部はアルミニウム合金板についても検討した。

スプリングバックを解消(抑制・補正)するために本研究で考案した新しい U 曲げ工法を Fig. 1 に模式的に示す。この特徴は、通常の U 曲げ(Fig.1(a),(b)参照)に加えて、カウンターパンチで底板を突き上げてこの部分に曲げを加えることである。このとき、曲げ段階(Fig.1(a),(b))における板のクランプ力 F_1 、カウンターパンチによる曲げ(Fig.1(c))における曲げ力 F_2 、またパンチのスリットの長さや深さがスプリングバックの大きさを支配するので、これらの最適値を決定する。ハット曲げについては、これらに加えて、決め押し力およびフランジ押さえ位置が最適化するプロセスパラメータに加わる。

この最適解の探索には成形・スプリングバックのシミュレーションにより行うが、これには研究代表者の Yoshida-Uemori model を用いた FEM 解析ソフト PAM-STAMP 2G および一部 Marc を用いた。最適化の枠組みは以下のとおりである。

プレス成形のプロセスパラメータおよび金型の形状を代表するパラメータ $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}^T$ を設計変数として定義。

成形パネルの目的形状とスプリングバック後のパネル形状の差(目的関数 $F(\mathbf{x})$)を定義。

最適化理論を用いた高速繰返し計算で最適金プロセスパラメータ・金型形状を決定。

決定した最適形状の金型を試作して、プレス実験を行い、本工法および最適化法の妥当性を検証した。

なお、シミュレーション精度の更なる向上のために、材料の異方性発展とパウシンガー効果を同時に記述するモデルについても考案している。

さらに、これらの考え方をもっと複雑な 3 次元形状の問題に適用するために、トポロジー最適化理論を用いた金型設計についても研究を行った。

4. 研究成果

4.1 U 曲げの最適プロセス・金型の決定

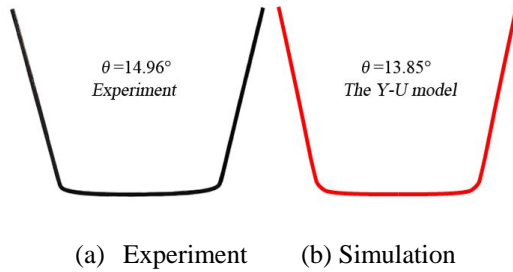


Fig. 2 980MPa 高張力鋼板のスプリングバック (付加曲げなし: $F_1=0, F_2=0$).

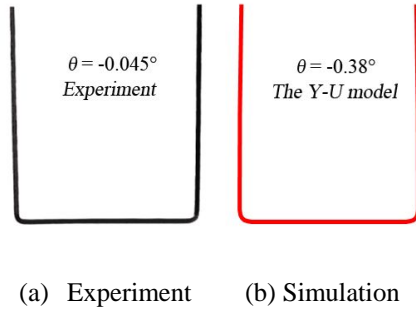
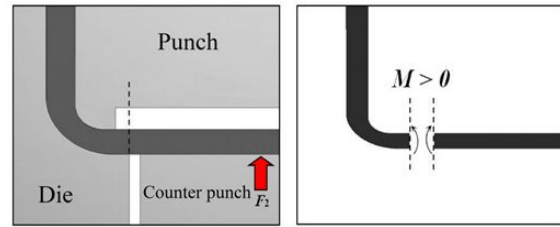


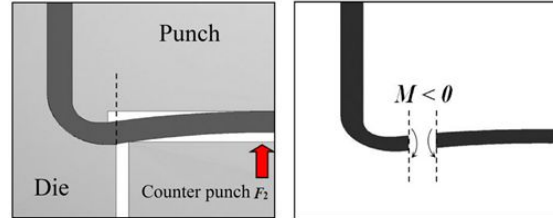
Fig. 3 最適プロセス・金型による 980MPa 高張力鋼板のスプリングバック ($F_1=2\text{kN}, F_2=20\text{kN}$).

Fig.2(a), (b)は, 980MPa 高張力鋼板について, クランプ力 $F_1=0$, カウンターパンチ曲げ力 $F_2=0$ の U 曲げ・スプリングバック後の板の形状を示す((a)は実験結果, (b)はシミュレーション). この図より極めて大きなスプリングバックが生じることがわかる. また, シミュレーションによりスプリングバックを精度良く予測できることも確認できる.

Fig.3(a), (b)は決定した最適な金型形状とプロセス条件(クランプ力 F_1 , カウンターパンチ曲げ力 F_2)を用いて U 曲げを行った後のスプリングバックの様子を示す((a)は実験結果, (b)はシミュレーション). スプリングバック解消の主なメカニズムは, Fig. 4 に模式的に示すように, カウンターパンチによる底板の突き上げにより, 曲げ成形直後のモーメント (Fig.4(a)) とは逆向きのモーメント (Fig.4(b)) が作用することにより, スプリングバックの駆動力を低減させるためである. なお, 本プレス実験では, このカウンターパンチによる付加的曲げを実現するために平頭パンチにくぼみ(スリット)を加工してある. このスリット深さはスプリングバックの大きさに影響を与えるため, この最適値を決定する必要があるが, 本条件ではこれは 1.5mm となった.



(a) 曲げによるモーメント



(b) 付加曲げによるモーメント

Fig 4 カウンターパンチによる付加曲げによる曲げモーメント

4.2 ハット曲げの最適プロセス・金型の決定

ハット曲げについては, これらに加えて, 決め押し力およびフランジ押さえ位置が最適化するプロセスパラメータに加わる. Fig. 5 には, 通常のハット曲げによるスプリングバックを(a)に, 本研究による最適化工法でのスプリングバックの様子を(b)に示す. これにより, この工法および, その最適プロセスおよび金型形状の決定の妥当性が検証できた.



(a) 通常のハット曲げによるスプリングバック



(b) 最適化工法によるスプリングバック

Fig. 5 最適プロセス・金型による 980MPa 高張力鋼板のスプリングバック

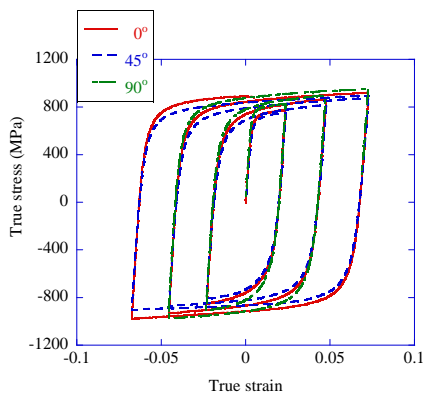
4.3 新しい材料モデルの提案

材料の異方性発展とバウシinger効果を同時に記述する塑性構成モデルを提案した。異方硬化は、内挿関数 $\mu(\bar{\varepsilon})$ を用いて次のように表現できる。

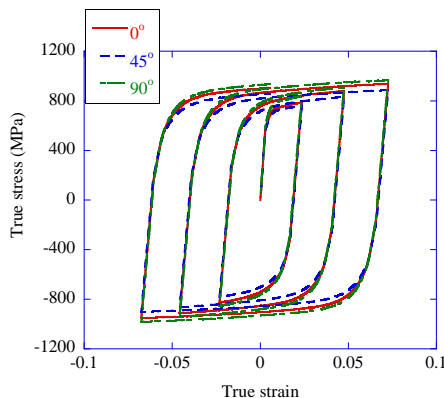
$$\phi(\sigma, \bar{\varepsilon}) = \mu(\bar{\varepsilon})\phi_i(\sigma) + (1 - \mu(\bar{\varepsilon}))\phi_{i+1}(\sigma)$$

$$\mu = 1 - \left\{ \frac{(\bar{\varepsilon} - \bar{\varepsilon}_i)}{(\bar{\varepsilon}_{i+1} - \bar{\varepsilon}_i)} \right\}^p$$

ここで、 $\phi_i(\sigma)$, $\phi_{i+1}(\sigma)$ は相当塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}_i$, $\bar{\varepsilon}_{i+1}$ に対応する降伏関数である。この表現の利点は、多くの異方性パラメータそのものを近似式で表すという必要がなく、降伏関数の凸面性は必ず保証され、 $\bar{\varepsilon}_i \leq \bar{\varepsilon} \leq \bar{\varepsilon}_{i+1}$ における異方性の発展は $\mu(\bar{\varepsilon})$ のみで表現できることである。



(a) 実験結果



(b) シミュレーション

Fig. 6 780MPa 高張力鋼板の繰返し塑性変形挙動が試験片の切出し方向（引張り・圧縮応力作用方向）によって異なる様子

さらに、バウシinger効果の表現のために、移動硬化と異方硬化を同時に表現する理論的な枠組みを提案した。これによれば、移動硬化パラメータ（例えばY-Uモデルパラメータ）と異方性およびその発展パラメータをそれぞれ独立に決めることができる。

Fig. 6は、一例として、780MPa高張力鋼板の繰返し塑性変形挙動が試験片の切出し方向（引張り・圧縮応力作用方向）によって異なる様子（(a)実験結果、(b)本モデルによるシミュレーション結果）を示している。これより、本モデルが、バウシinger効果と異方性の発展を同時に表現できていることがわかる。

4.4 複雑形状の金型の最適化

本研究では、スプリングバックの解消の目的のための新しい工法の考案とその最適プロセス・金型設計に力点が置かれたため、2次元形状の金型を用いた。しかし、この考え方をさらに複雑な3次元形状の問題に適用するために、トポロジー最適化理論を用いた金型設計についても研究を行い、従来よりも軽量で高剛性の金型形状を決めることができた。

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17件）

- (1) L. Komgrit, H. Hamasaki, R. Hino, F. Yoshida: Elimination of springback of high-strength steel sheet by using additional bending with counter punch, *Journal of Materials Processing Technology*, 229 (2016), pp.199-206. (査読有り)
DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.08.029
- (2) F. Yoshida, H. Hamasaki, T. Uemori: Modelling of anisotropic hardening of sheet metals including description of the Bauschinger effect, *International Journal of Plasticity*, 75 (2015), pp.170-188. (査読有り)
DOI: 10.1016/j.ijplas.2015.02.004
- (3) F. Yoshida, H. Hamasaki, T. Uemori: A user-friendly 3D yield function to describe anisotropy of steel, sheets, *International Journal of Plasticity*, 45 (2013), pp.119-139.
DOI: 10.1016/j.ijplas.2013.01.010
- (4) 濱崎洋, Vassili Toropov: メタモデルを使用した最適化手法とその応用、塑性と加

- 工, 53 (2012), pp.312-316. (査読有り)
- (5) 日野隆太郎: 塑性加工プロセスの数値最適化 板材プレス成形を中心に, 塑性と加工, 53 (2012), pp.307-311. (査読有り) ほか 1 2 編 .

〔学会発表〕(計 1 5 件)

- (1) F. Yoshida: Constitutive modeling for various cyclic plasticity behaviors of anisotropic sheets, at Plasticity 2016, on Jan 5, 2016, Hawii, USA. (招待講演)
- (2) F. Yoshida: Modeling of plasticity for anisotropic sheet metals and its applications to forming simulation, at 21st International Conference on Mechanical Engineering, Mexican Society of Mechanical Engineering, on Sept 23, 2015, Veracruz, Mexco. (招待講演)
- (3) F. Yosida: Description of anisotropy evolution of sheet metals, at 12nd Asia-Pacific Conference on Engineering Plasticity and Its Applications, on Sept 2, 2014, Kaohsiung, Taiwan. (招待講演)
- (4) F. Yoshida: Description of anisotropy and Bauschinger effect on various types of steel sheets, at NUMISFORM 2013, on July 7, 2013, Shenyang, China. (招待講演)
- (5) H. Hamasaki: Stiffness improvement of stamping die by means of topology optimization, 16th Int. Conf. on Advances in Materials & Processing Technologies (AMPT 2013), Sept 22, 2013, Taipei, Taiwan.

ほか 1 0 件

〔図書〕(計 1 件)

F. Yoshida and T. Uemori: Cyclic plasticity model for accurate simulation of springback of sheet metals, in 60 Excellent Inventions in Metal Forming (E. Tekkaya, ed.), Springer, 2015, ISBN978-3-662-46311-6.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ:

[http://home.hiroshima-u.ac.jp/eplabo/In
side/](http://home.hiroshima-u.ac.jp/eplabo/Inside/)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 総仁 (YOSHIDA FUSAHITO)
広島大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号: 50016797

(2) 研究分担者

日野 隆太郎 (HINO RYUTARO)
広島大学・大学院工学研究院・准教授
研究者番号: 10283160

濱崎 洋 (HAMASAKI HIROSHI)
広島大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 30437579

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