

# 極薄ステンレス鋼板の複数曲げにおける

## スプリングバックおよびねじれ解析

箱山 千春

工学部機械工学科 伊藤 毅

カーボンニュートラルの推進により、燃料電池の需要は今後も増大すると考えられる。燃料電池内部の部品であるバッテリーセパレータは、従来カーボンにより製作されていたが、ステンレス鋼を始めとする金属製に切り替えることで、軽量化・生産効率向上が期待できる。セパレータをプレス成形する時に発生するスプリングバックおよびねじれ量の予測は、生産性向上の観点からも重要と考えられる。

本研究では板厚 0.3mm のステンレス鋼板を用い、ステンレス鋼板のスプリングバック量を実験・解析両面から調査した。そして、同時に二方向の曲げが加わった場合、ねじれはどのように現れるかを調査した。

### 1. 緒言

近年、環境負荷軽減および二酸化炭素排出量削減のため、電気自動車が注目を集めている。欧州を中心に、将来的にガソリン車・ディーゼル車の販売規制を行うことが既に発表されている国もあり、その実現性はともかくとして電動化はさらに推進されると考えられる。既に販売されている電気自動車の大きな課題として、燃費ならぬ電費の向上が挙げられる。ガソリン車・ディーゼル車は短時間で給油が可能であるのに対し、電気自動車の充電には一定の時間が必要となる。そのため、電費向上・航行距離の延伸は需要拡大に向けて不可欠であると考えられる。

電費向上に資する要素として、車体本体の軽量化が挙げられる。航行距離延伸の為には大量の燃料電池を搭載する方法があるが、その分車体重量は重くなり、電費は悪くなる。よって、車体本体自体の軽量化と併せ、燃料電池自体の軽量化も重要であると考えられる。

燃料電池の一つに、固体高分子型燃料電池 (PEFC) が挙げられる。現在は主に家庭用燃料電池コジェネレーションシステム (エネファーム) 内部の燃料電池として使用されており、高効率であることが特徴である。自動車への適用も研究されているが、近年は全固体電池への期待が高まっている。PEFC の中で使用される部品にバッテリーセパレータがあり、従来はカーボンによって製造されてきた。この部品をステンレスやチタンといった金属板を使い、プレス成形によって成形することで、部品自体の軽量化と生産効率向上を同時に達成可能である<sup>1)</sup>。

セパレータの形状の特徴として、一枚の板に多数の曲げが加わっていることが挙げられる。この曲げはセパレータの「流路」となり、水素や酸素といったガスを満遍なく行き渡らせる働きをする。そのため、ステンレス板のスプリングバック特性を熟知することが生産向上の鍵となる<sup>2)3)</sup>。

本研究ではステンレス鋼板の中でも板厚 0.3mm 程度の極薄板に着目し、複数の曲げが連続して加わる形状のスプリングバック量について基礎的な研究を行った。実験および解析を通じて、複数の曲げが加わる場合のスプリングバック量を簡便に予測可能であるかを検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1 V 曲げ実験および直交曲げ解析

供試材は公称板厚 0.3mm のフェライト系ステンレス鋼板 SUS403 である。機械的性質を Table 1 に示す。試験用金型として、単純な V 曲げ形状(半径 R=2mm)と、その V 曲げを直交させた形状の金型を準備した。本研究のために作成した金型を Fig. 1 に示す。(a)が V 曲げ用、(b)が直交曲げ用金型である。V 曲げについては、実験時に長手方向を圧延方向と一致させた試験片(RD 試験片)と圧延直角方向に一致させた試験片(TD 試験片)を用意し、それぞれ実験を行った。プレス機の動作速度は全ての条件で共通で 10mm/s とした。

各条件における実験は 10 回ずつ行った。実験後の試験片を Fig. 2 に示す。スプリングバック量は、実験後の試験片形状を紙に転写し、PC 上でピクセル座標を求めた結果から算出した。

直交曲げについては、成形後の試験片のねじれについての測定を行った。測定位置を Fig. 3 に示す。測定にはダイヤルゲージを用い、中心から端までの変位を測定した。

Table 1 Mechanical properties for SUS430

$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_B$ /MPa	elongation /%	Hardness /HV
$\geq 205$	$\geq 420$	$\geq 22$	$\leq 200$

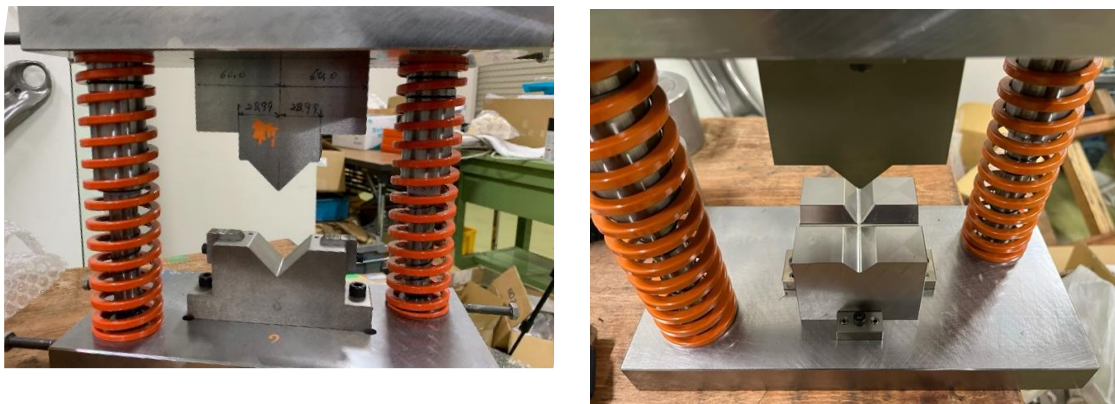


Fig. 1 Die frame for bending, (a) V-bending and (b) Orthogonal bending

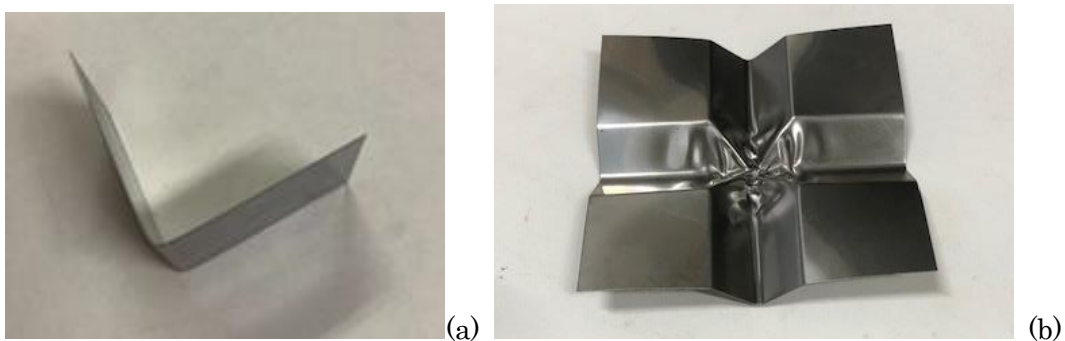


Fig. 2 A specimen after bending, (a) V-bending and (b) Orthogonal bending

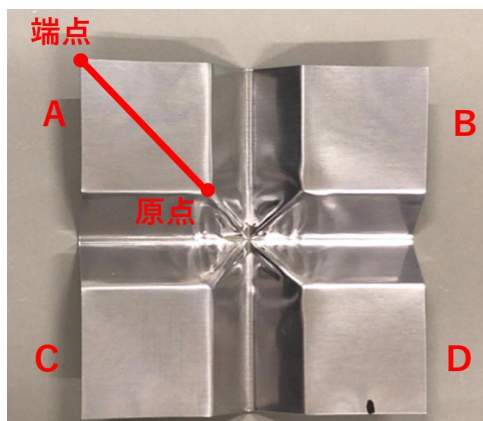


Fig. 3 Measurement points for distortion for orthogonal bending

## 2.2 解析手順

スプリングバック解析には株式会社 JSOL 製 JSTAMP を使用した。JSTAMP はソルバーとして LSTC 社 LS-DYNA を利用したプリポストプロセッサで、塑性加工の中でも特に板材プレス加工に特化した機能を持つ。成形解析では動的陽解法、スプリングバック解析では静的陰解法を用いた。

解析モデルの概要図を Fig. 4 に示す。解析時のブランク板厚は実際に測定した値を基に 0.28mm とした。メッシュサイズは 0.3mm となるように分割した。パンチをダイから 0.3mm 離れた位置まで押し込み、材料を V 字形状に成形した。降伏関数として Yld2000-2d 降伏関数を用い、次数  $M=6$  とした。スプリングバック解析時には全ての金型を解析上で消去し、材料の中心のみを固定した状態として、除荷時の形状を計算した。

直交曲げの解析は、対称性を考慮し材料を 1/4 モデルとした。

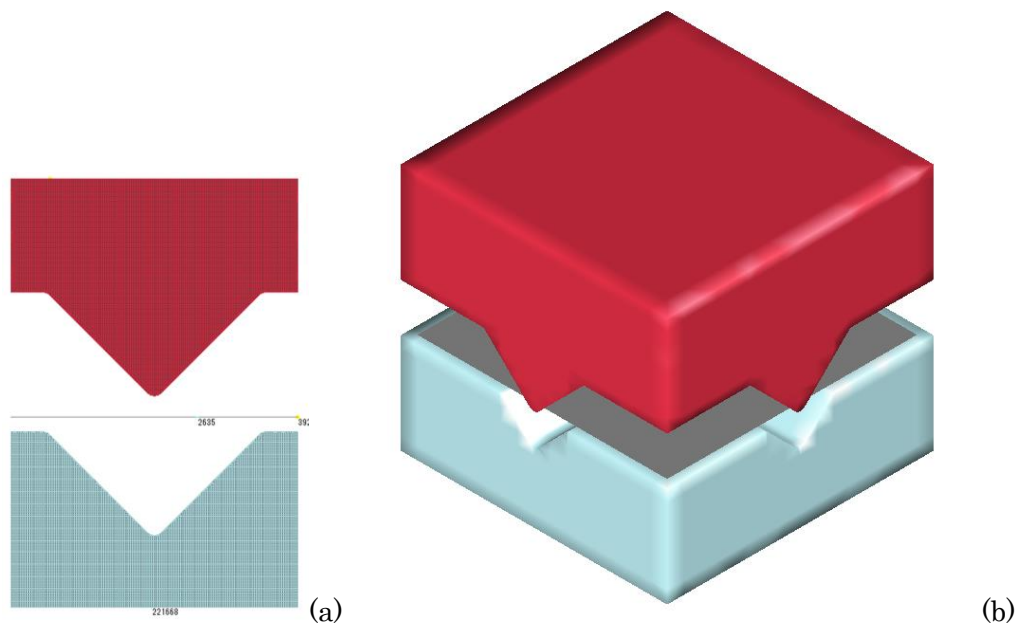


Fig. 4 FEA model for (a) V-bending and (b) Orthogonal bending

### 3. 結果・考察

Fig. 5 に、圧延方向を変えて V 曲げ試験を行った結果を示す。棒グラフは各条件の平均値，エラーバーは 10 回の試験の標準偏差を示す。グラフ中赤線はパンチの角度 (=90°) を示す。RD 試験片の方が TD 試験片よりもスプリングバック量が多くなった。

Fig. 6 に、直交曲げ試験片のスプリングバック量を示す。1 枚の試験片に RD および TD 方向に沿った曲げが発生しているので、その結果を RD・TD として区別して示している。直交曲げの場合でも、RD 方向のスプリングバック量は TD 方向のスプリングバック量よりも大きくなり、単体の V 曲げの結果と一致した。これは材料の圧延履歴の影響による異方性の影響が大きいと考えられる。

直交曲げのねじれ量解析結果を Fig. 7 に示す。1/4 モデルで解析し、中心部の断面を観察したところ、原点から端点までで 0.68mm の変位差があることが分かった。Fig. 8 に、実験で測定されたねじれ量と解析結果の比較を示す。測定点 A のみ、原点から端点までの間に最小値が存在した。それ以外は原点から端点まで単調に増加した。有限要素法による解析は、実験結果を定性的に再現したが、定量的な再現には至らなかった。また、実験では測定点 AC と測定点 BD で異なる変位量となっており、完全な対称形状とはならなかった。試験片形状および測定位置は全て対称のため、この現象が何を原因としているのかは更なる調査が必要であると考えられる。解析結果の精度向上のためには、Y-U モデルや HAH モデルといった、移動硬化を考慮した解析モデルの導入を行う必要があると考えられる。

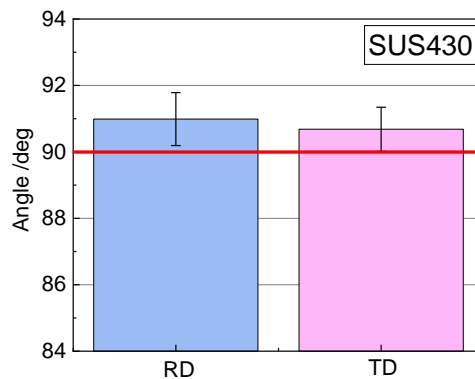


Fig. 5 spring back results for V bending

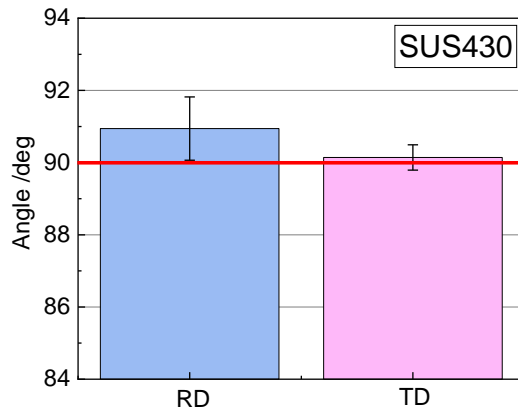


Fig. 6 Spring back results for orthogonal bending

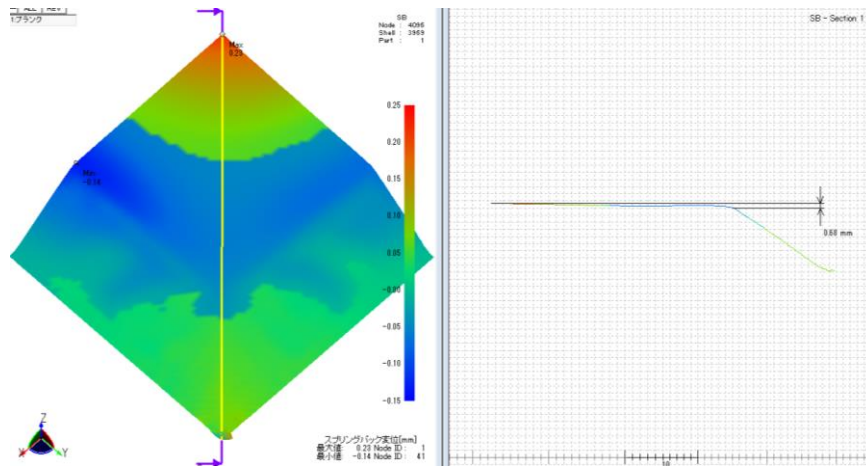


Fig. 7 A FEA result for orthogonal bending

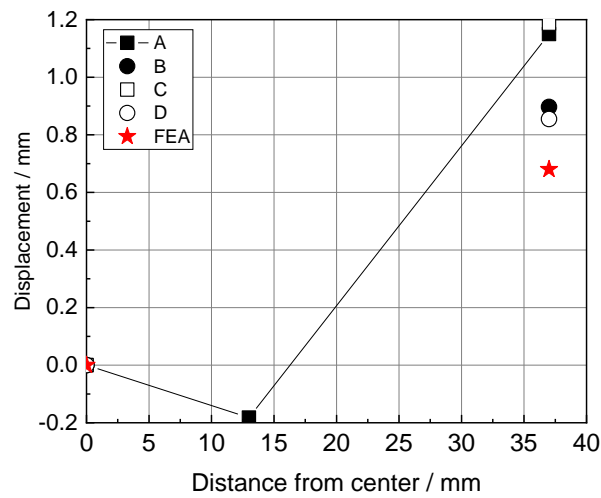


Fig. 8 Distortion for orthogonal bending

#### 4. 結言

本研究では、板厚 0.3mm の極薄ステンレス鋼板 SUS430 を対象とし、V 曲げおよび直交曲げのスプリングバック量を測定した。また、有限要素法を用いた解析を行い、直交曲げにおけるねじれ量を計算した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) ステンレス鋼板のスプリングバックは圧延方向の影響を強く受けるため、異方性を考慮した成形解析が必要である。
- 2) 直交曲げで発生する反りやねじれについては、有限要素解析により定性的に予測可能である。しかし定量的な一致のためには、移動硬化を導入した有限要素解析が必要であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 植田雅巳・橋本 勝・森 陽一・棚瀬繁雄・青井芳史・岩佐美喜男・境 哲男：燃料電池向けメタルセパレータの開発（第1報），クリモト技報，55，2-6.
- 2) 桑原利彦・齋藤怜奈・平野孝明・大橋信昭：電子部品用 SUS304 ステンレス鋼板の引張・圧縮応力の非対称性とその曲げおよびスプリングバック挙動への影響：鉄と鋼，95-11(2009),732-739.
- 3) Chiharu Nagano, Yoshihiro Yaginuma, Toshihiko Kuwabara, Frédéric Barlat, Measurement and Analysis of the Elastic-Plastic Deformation Behavior of an Ultra-thin Austenitic Stainless Steel Sheet Subjected to In-plane Reverse Loading, Procedia Engineering, Volume 207(2017), 1964-1969, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.1101>.