

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

張 羽風 細木 仁盛

電気自動車の普及に伴い、燃料電池の需要が増大すると予想される。固体高分子型燃料電池は発電効率が高いことから、自動車への利用を見込んで開発が進められている。その中で使用される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。プレス成形時のスプリングバック量予測は材料の特性・バッテリーセパレータの形状の両方の面から重要であると言える。

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、同一形状が複数個連続して加わる場合について、スプリングバック量を簡便に予測可能であるか検討した。

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。

自動車用燃料電池の中でも、固体高分子型燃料電池（PEFC）は高効率であることから開発が進められている。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¹⁾。

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。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上の鍵となる²⁾³⁾。また、同一形状が複数回繰り返される形状であれば、それを構成する最小単位でのスプリングバック挙動を明らかにすることで全体の形状が予測できる可能性がある。

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曲げ実験および連続曲げ実験

使用した材料は公称板厚 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 3 つ連続させた形状 (以下、連続曲げとする) を用意した。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)が連続曲げ用金型である。フレーム部分は共通であり、パンチ・ダイを付け替えることで異なる試験を行えるようにした。また、パンチ先端部に半径 0.5mm のパンチをさらに追加したコイニング金型を比較のために用意した。コイニング金型の模式図を Fig. 2 に示す。コイニングパンチによって板厚方向に圧縮応力を付与することで、スプリングバック量低減に効果があることが確認されているため⁴⁾、連続曲げでもその効果があるかを確認した。

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. 3 に示す。V 曲げおよび連続曲げ後の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。

Table 1 Mechanical properties for SUS430

$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_B /MPa	elongation /%	Hardness /HV
≥ 205	≥ 420	≥ 22	≤ 200

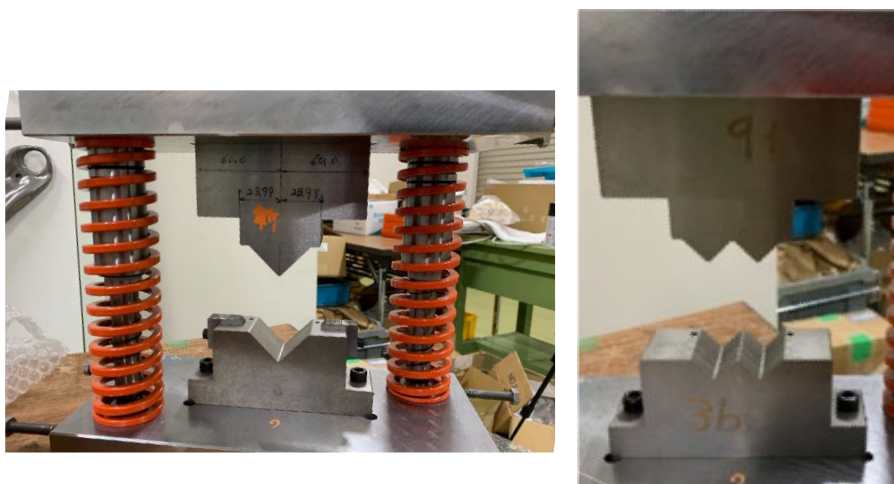


Fig. 1 Die frame for bending, (a) V-bending and (b) wave bending

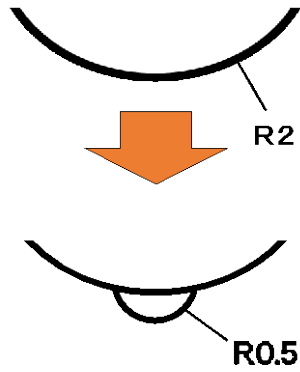


Fig. 2 A schematic drawing of coining punch

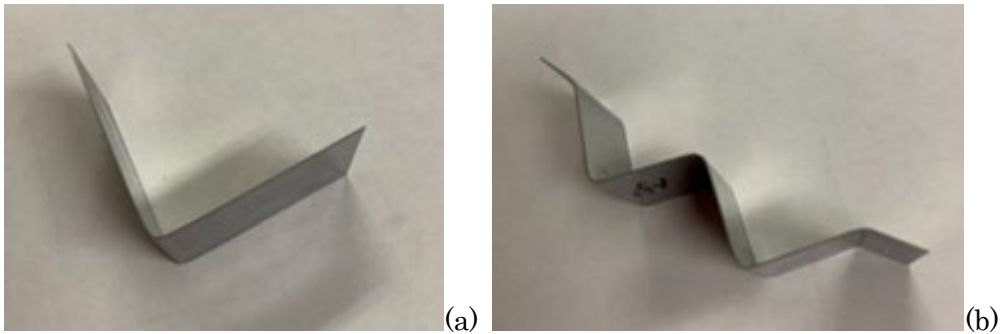


Fig. 3 A specimen after bending, (a) V-bending and (b) wave bending

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。本研究では成形解析で動的陽解法、スプリングバック解析で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。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。

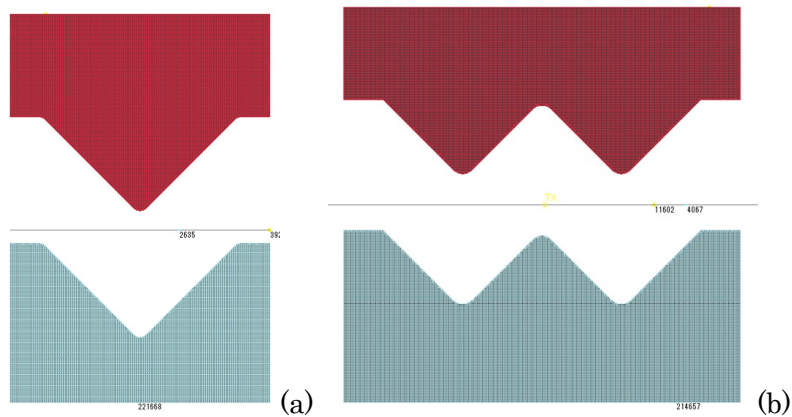


Fig. 4 FEA model for (a) V-bending and (b) wave bending

3. 結果

実験結果と解析結果の比較を Fig. 6~Fig. 8 および Table 2~4 に示す. 連続曲げの結果を表すために, Fig. 5 のように左右を定義した. V 曲げの場合は解析値と実験値が定性的・定量的にほぼ一致した. 連続曲げの場合, 中央のスプリングバック量が大きく, 左右のスプリングバック量は小さくなった. 解析における連続曲げの左右差については検討中である.

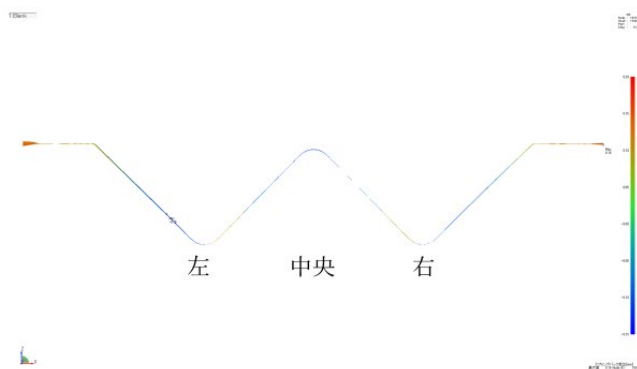


Fig. 5 A wave bending for results

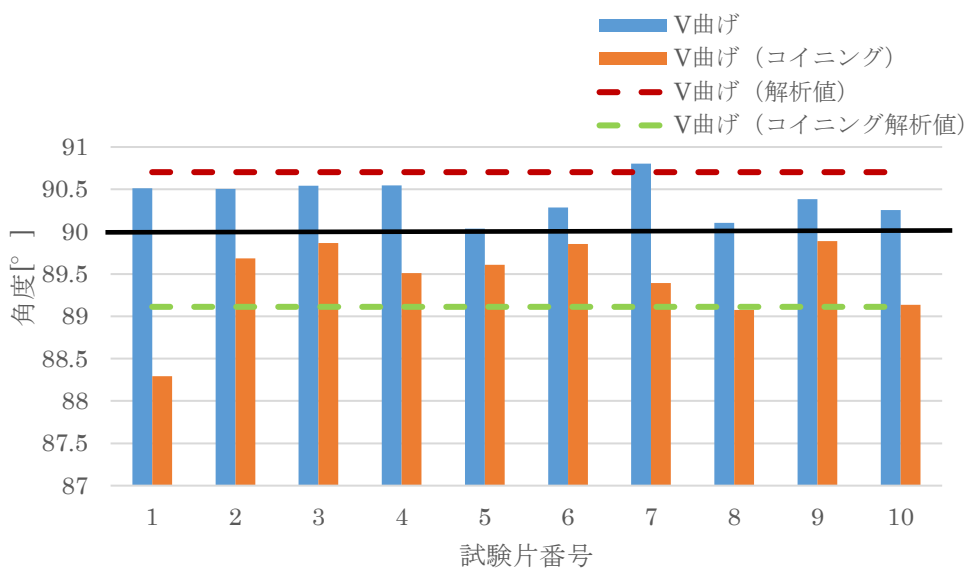


Fig. 6 spring back results for V bending

Table 2. springback results for V bending

	曲げ	曲げ(コイニング)
解析値[°]	90.703	89.112
実測値平均[°]	90.398	89.431

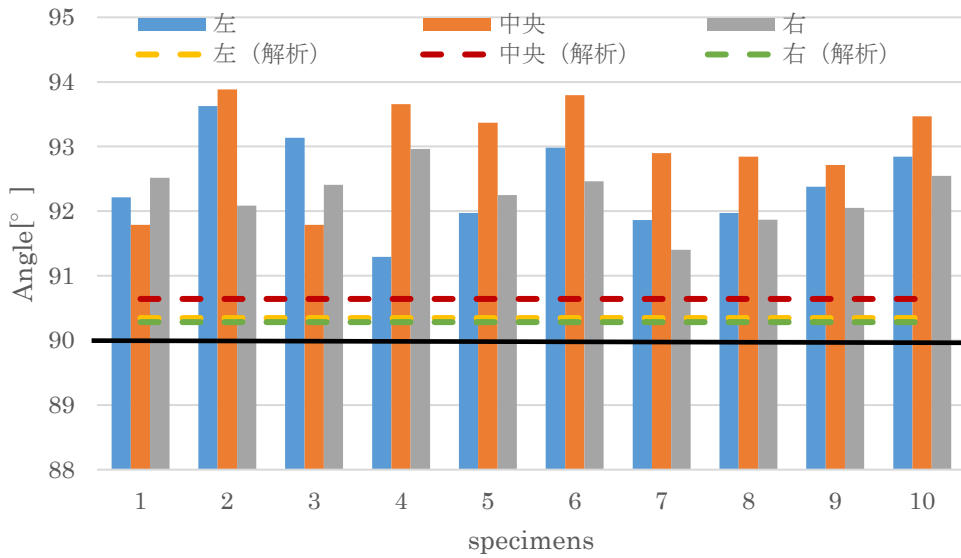


Fig. 7 spring back results for wave bending

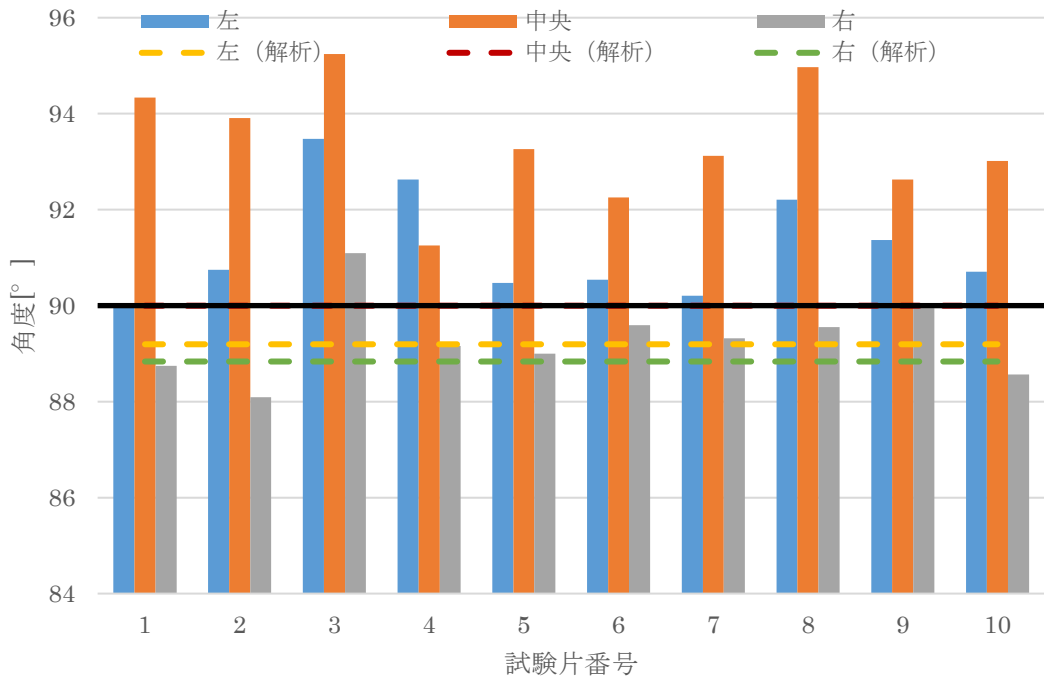


Fig. 8 spring back results for wave bending with coining

Table 3 springback results for wave bending

	左	中央	右
解析から得た角度[°]	90.346	90.642	90.283
実測値平均角度	92.429	93.021	92.255

Fig. 9 spring back results for wave bending with coining

	左	中央	右
解析から得た度[°]	89.195	89.999	88.836
実測値平均角度[°]	91.235	93.399	89.307

4. 結言

スプリングバック量は連続曲げの場合、中央と左右で差異が生じた。よって、V曲げ単体の結果のみでは複数の曲げが加わる場合のスプリングバック量を単純な重ね合わせで評価することは難しい。

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>.
- 4) 小川秀夫：金属板材のコイニング曲げ，天田財団 助成研究成果報告書，17 (2004).