

SD効果を考慮した移動硬化材料モデルによる板材成形解析の高精度化

Improving Accuracy of Sheet Forming Simulation by Considering Strength Differential Effect and Kinematic Hardening

[Autoform Japan] オートフォームジャパン(株) 具本 榮*
今井 洋徳**

1. はじめに

昨今、軽量化の要求に伴いアルミ合金板と高強度鋼板の使用が増加しておりより高い解析予測精度が必要になっている。解析精度向上のために、高精度な材料モデルのソフトウェアへの実装は避けて通ることのできない課題である。本研究ではSD (Strength Differential) 効果と移動硬化 (KH : Kinematic Hardening) を考慮して引張圧縮に対する非対称型に改良した Hill48_SDE および YLD2000-2D_SDE 降伏関数を、ユーザーサブルーチンを用いて試験的に実装し、高強度鋼板 (DP980) とアルミ合金板 (AA2008-T4 材および AA2090-T3 材) について、解析精度への影響を調査し、議論するものである。

2. 数学的モデリング

材料のSD効果を導入するため、Stoughtonら¹⁾が提案した降伏関数モデルを利用し、AutoForm 移動硬化モデル²⁾と合わせてソフトウェアに実装した。Stoughtonらのモデルでは平面異方性降伏応力 $\bar{\sigma}_{sym}(\sigma)$ に対して平面応力状態で次のように金属の圧力感度を考慮する。

$$\phi = h_x \sigma_{xx} + h_y \sigma_{yy} + \bar{\sigma}_{sym}(\sigma) = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}^p) \quad (1)$$

ここで、 h_x と h_y は圧力感度を表現する材料パラメータである。引張圧縮に対称型である Hill48 降伏関数³⁾と YLD2000-2D 降伏関数⁴⁾をSD効果の検証対象として使用する。

$$\bar{\sigma}_{Hill48}(\sigma) = [(G+H)\sigma_1^2 + (F+H)\sigma_2^2 - 2H\sigma_1\sigma_2]^{1/2} \quad (2)$$

$$\bar{\sigma}_{YLD2000-2D}(\sigma) =$$

$$\left\{ \frac{1}{2} (|X'_1 - X'_2|^r + |X''_1 + 2X''_2|^r + |2X''_1 + X''_2|^r) \right\}^{1/r} \quad (3)$$

2つの降伏関数は、 h_x と h_y を含めてパラメータを同定することで、圧力感度を考慮することができる。また Hill48 降伏関数ではもともと考慮されないなど、2軸応力の試験結果も結果として考慮したパラメータとすることができる。初期降伏曲面の表現に加えて、材料の荷重除去挙動を正確にモデル化することはスプリングバック予測精度を向上させるために不可欠である。本研究では降伏曲面の進展を表現するため、早期再降伏、非線形弾性、遷移軟化、加工硬化の停滞を含む AutoForm 移動硬化モデルを利用している。

3. 降伏曲面の検証

式 (1)、式 (2) にて提案された Hill48_SDE 降伏関数を DP980 高強度鋼板材⁵⁾に適用した。文献に示された、圧延方向とその直交方向の引張り、圧縮と、等2軸張出状態の試験結果を用いて、Hill48_SDE 降伏関数の材料パラメータを同定した結果を図1左に示す。引張領域ではSD効果の影響はなく降伏曲面が一致しているのに対して、圧縮領域ではSD効果の影響で降伏曲面が大きく異なっている。SD効果を考慮することで、降伏曲面が圧縮引張りに対して非対称となり、SD効果を含む降伏曲面のみ圧縮側の実験値をほぼ通る形の降伏曲面となる。

式(1)、式(3)にて提案された YLD2000-2D_SDE 降伏関数のパラメータは Louら⁶⁾が取得したものを利用した。また、文献に示された材料試験データを利用して、Hill48_SDE 降伏関数の材料パラメータも同定した。図1中央と右に YLD2000-2D_SDE、YLD2000-2D、Hill48_SDE の降伏曲面を比較した。アルミ合金板の場合でも、DP980と同様SD効果を考慮した場合のみすべての実験値をほぼ通過する曲面となる。また、AA2090-T3の場合、Hill48_SDEと YLD2000-2D_SDE では特に平面ひずみ領域における差異が大きく、この種の材料挙動を表現するためには、適切な材料モデルの利用が必要であることがわか

*Bonyoung Ghoo : シニアエンジニア
**Hironori Imai : 技術部長
〒105-0021 東京都港区東新橋 2-3-17

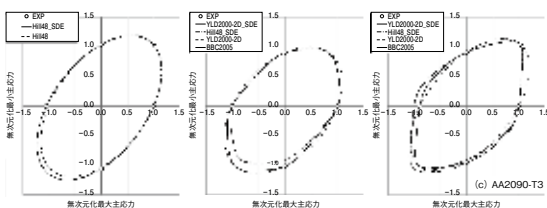


図1 降伏曲面比較

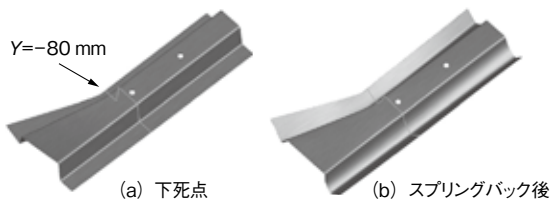


図2 NUMISHEET2022 ベンチマーク2
(断面：Y=-80 mm)

る。

4. 成形解析

ハット断面のドロワー成形である NUMISHEET2022 ベンチマーク2モデル(図2)に対して成形解析を行った。移動硬化あり・なし、SD効果あり・なしの4つの組合せについて、DP980では成形下死点における断面内側表面の応力状態と最終スプリングバック結果(図3)を、AA2008-T4/AA2090-T3ではスプリングバック結果(図4)を比較した。断面中央から-130 mm付近に位置する壁部において応力に差があることが確認できる。この部位周辺は曲げもしくは曲げ戻していずれも圧縮を受ける領域である。ただし、応力、スプリングバックともに、今回の成形様式ではSD効果を考慮するとスプリングバック量は増加する傾向にあるが、SD効果より移動硬化の影響の方がスプリングバック量に及ぼす影響は大きい結果となった。

5. まとめ

本研究はSD効果と移動硬化が成形解析の精度に及ぼす影響を検討した。その結果として以下の知見を得た。

- ① 対称型降伏関数に圧力感度項を導入して材料のSD効果を考慮した。Hill48_SDEとYLD2000-2D_SDE対称型降伏関数は、SD効果の考慮により高強度鋼板材とアルミ合金板材の圧縮状態をより良く表現した。
- ② 平面異方性の大きい板材の場合でも、圧縮領域で実験値に近い結果を得ることができるが、Hill48_SDEの適用には特に平面ひずみ領域の再現において注意を払う必要がある。
- ③ 成形解析の結果から、今回の成形様式ではSD効果よりも移動硬化の考慮が材料のスプリングバックに大きな影響を与えることが明らかとなった。
- ④ 超高強度鋼板や異なる成形様式でもSD効果を考慮した材料が予測精度向上に寄与するかを確認すること、YLD2000-2D_SDE向けにもパラ

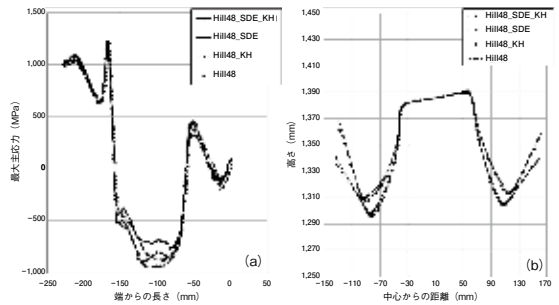


図3 (a) 断面内側表面の下死点主応力分布、(b) 断面のスプリングバック形状 (DP980)

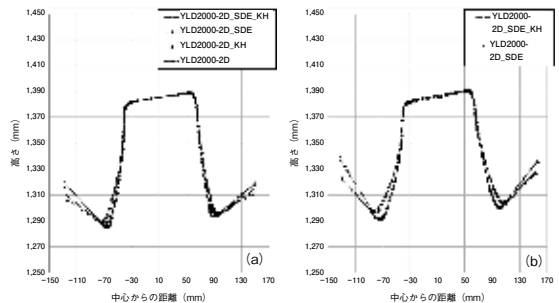


図4 断面のスプリングバック形状
(a) AA2080-T4、(b) AA2090-T3

メータ同定を可能にすることなどが今後の課題として挙げられる。

参考文献

- 1) Stoughton, et al.: A pressure-sensitive yield criterion under anon-associated flow rule for sheet metal forming. Int. J. Plast., 20 (2004), 705-31
- 2) Kubli, et al.: Advanced modelling of reverse loading effects for sheet metal forming processes, Proceedings of Numisheet 2008 (2008), 479-484
- 3) R. Hill: A. theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences 193 (1948), 281-297
- 4) Barlat, et al.: Plane stress yield function for aluminum alloy sheets—part 1: theory, Int. J. Plast., 19 (2003), 1297-1319
- 5) Hou, et al.: Non-associated and Non-quadratic Characteristics in Plastic Anisotropy of Automotive Lightweight Sheet Metals, Automot. Innov., 6 (2023), 364-378
- 6) Lou, et al.: Consideration of strength differential effect in sheet metals with symmetric yield functions, IJMS 66 (2013), 214-223