

令和元年6月18日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06011

研究課題名(和文) 超高張力鋼板の成形CAEのための材料パラメータ同定と成形限界クライテリオン

研究課題名(英文) Material parameter identification and forming-limit criterion on ultra-high-strength steel sheets for sheet-metal forming simulation CAE

研究代表者

吉田 総仁 (Yoshida, Fusahito)

広島大学・工学研究科・名誉教授

研究者番号：50016797

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)： 超高強度鋼板の大ひずみにおける加工硬化式としてSwift-Voce混合モデルを用いて、その式中の重み係数を板の面内引張り曲げ試験と対応する弾塑性逆解析により決定する方法論を確立した。板の異方性に起因するひずみ局所化とその発展がエッジ割れを支配していることがわかった。異方硬化発展モデルをLS-DYNAに実装して、成形シミュレーションを行った。その結果、異方性発展を考慮することで、成形シミュレーションの予測精度が格段に向上することが確認できた。とくに円筒穴拡げ試験では、大ひずみ異方性とその発展を表現できるモデルを用いた成形シミュレーションの結果は実験を良い精度で予測することがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって、大ひずみにおける加工硬化と異方性を決定する方法論が確立した。その成果を異方硬化発展材料モデルに反映させ、板材成形CAEソフトに実装することにより、板材成形シミュレーションの精度が格段に向上することが確認できた。また、板材成形限界の予測で未解決であったエッジ割れについて、それが異方性によるひずみ局所化とその発展と密接に関連していることもわかった。こうした成果は、自動車産業をはじめとした板材成形産業、とりわけ超高張力鋼板を多用する領域で、生産準備段階の時間とコストの大幅な削減につながり、産業界に大きく貢献できる。

研究成果の概要(英文)： The workhardening behavior of ultra-high-strength steel sheets was determined from a plane-strain stretch-bending test, where a weighting coefficient in the combined Swift-Voce model was determined by an elasto-plasticity inverse approach. The edge fracture was initiated from an anisotropy-induced strain localization band of a sheet. The anisotropy-evolution model was implemented into a sheet-metal forming CAE code, LS-DYNA. By using this, the simulation accuracy was highly improved. Especially for a hole-expansion test with flat-headed punch, the strain localization was accurately predicted by the anisotropy-evolution model.

研究分野：弾塑性工学

キーワード：超高張力鋼板 板材成形 CAE 異方性発展モデル 成形限界

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

自動車の衝突安全性と軽量化のために、最近では強度 980MPa を超える冷間プレス成形用の超高張力鋼板 (Ultra-High Strength Steel: UHSS) が開発されてきている。しかし、その極めて大きなスプリングバック、低靱性 (割れやすい) などの特性は UHSS の産業界への普及を妨げている。UHSS のプレス成形、特にそのための金型設計のためには、CAE (FEM シミュレーション) によりスプリングバックや成形割れを高精度に予測することが不可欠となる。板材の材料モデルと成形限界予測の研究は欧米をはじめとした諸外国でも多くなされているが、UHSS についての研究は、我国を中心によく始まった段階といえる。UHSS(980~1480MPa)は極端な高強度・低靱性で、これまでの HSS (440~780MPa レベル) とは質的に異なる難加工材であり、その冷間プレス技術の確立は自動車産業から強く求められている。CAE はその技術の中核をなすものである。

高張力鋼板(HSS)の大きなスプリングバックを市販 CAE ソフトで定量的に予測できるようになったのには、本申請者らが提案したバウシinger効果を正確に表現する塑性構成モデル (Yoshida-Uemori [Y-U] model, 2002, 2003, 2010) の役割が大きい。現在では、Y-U model は世界の主だった CAE ソフトのほとんどが採用している (PAM-STAMP[仏], LS-DYNA[米], など)。さらに、本申請者らは、HSS の異方性表現のために新たな降伏関数 (6 次多項式降伏関数) を提案し (2013)、最近では異方性が変形とともに発展するモデル (2015) の提案も行っている。成形時の成形限界 (板の割れ) 予測については、非比例変形 FLD (2011) の提案を行っている。

### 2. 研究の目的

本研究は、申請者らのこれまでの研究をさらに発展させ、以下の未解決の課題を明らかにすることを目的としている。

- (1) 塑性構成モデル中の材料パラメータを大ひずみ域で決定するための実験・(逆)解析手法を確立する。単軸引張り試験で得られる応力-ひずみデータは UHSS では 10%程度のひずみまでであり、二軸引張り試験では数%ひずみにとどまっている。これを実際の板成形時のひずみレベル(20~40%程度)に対応したものとして決定するための方法論を確立する。
- (2) 本研究で構築した材料モデル (異方性発展とバウシinger効果の連成) を市販ソフト (LS-DYNA) のユーザーサブルーチンを利用して実装する。UHSS のプレス成形実験結果とシミュレーション結果を比較することによりその精度検証を行う。
- (3) UHSS のエッジ割れ現象を実験と理論の両面から解明し、その予測を可能とする標準試験法とクライテリオンを確立する。
- (4) 材料モデルと破断予測のための包括的材料データベースの枠組みを構築する。

### 3. 研究の方法

- (1) 以下の実験を行い、弾塑性逆問題として大ひずみ異方性 (硬化) 材料パラメータを決定する。①引張り曲げ、②平面ひずみ引張り、③液圧バルジ、④純粋せん断。
- (2) 板成形 CAE ソフト (PAM-STAMP および LS-DYNA) のユーザーサブルーチンを利用して、異方性発展とバウシinger効果の連成させた材料モデルをこれらのソフトに実装する。また、プレス実験でその有効性を検証する。
- (3) UHSS のエッジ割れモードを「穴拡張モード」と「引張り曲げモード」に大別し、実験観察結果をもとに、それぞれのモードについて力学的・材料学的に割れ発生予測理論を確立する。
- (4) UHSS の実験と上記の材料パラメータ同定により、包括的材料データベースを構築する。

### 4. 研究成果

- (1) 大ひずみ異方性硬化パラメータの決定

引張り曲げ限界ひずみは単軸引張り均一伸びよりはるかに大きいので、これを利用して、弾塑性逆問題として大ひずみ領域での加工硬化特性を決定する方法を確立した。板の面内引張り曲げ試験には、Fig. 1 に示す二軸引張り試験機を用いた。材料の加工硬化を Swift(S)と Voce(V)の混合モデル：

$$\sigma = \omega \sigma_s + (1 - \omega) \sigma_v$$

で仮定し、パンチストローク vs. 曲げひずみ応答を最もよくシミュレーションできる重み係数  $\omega$  を決めることにより大ひずみ域の加工硬化特性を決定することができた。板試験片の切り出し方向 ( $\alpha$ ) を種々に変えることにより、大ひずみ異方硬化を求めることができた。また、曲げひずみの最も大きくなるエッジ部板厚の直接観察から大ひずみ  $r$  値 ( $r_\alpha$ ) を求めることができた。これより、単軸引張り試験では均一伸びひずみが 10%以下の UHSS では、面内引張り曲げでは、試験片のくびれがその 3 倍程度まで大きくなることがわかり、大ひずみ加工硬化と異方性発展の定量的決定が可能となった。

また、このようにして得られた大ひずみ加工硬化と異方性パラメータを用いて、異方性発展弾塑性構成モデルが構築できた。このモデルの枠組みは以下のとおりである。微小変形 (A) におけるモデル  $\phi_A(\sigma)$  (降伏関数+バウシinger効果表現のための移動硬化則) と大変形 (B)

におけるそれ  $\phi_B(\sigma)$  を簡単な内挿関数で次のように表す。

$$\phi(\sigma, \bar{\varepsilon}) = \mu(\bar{\varepsilon})\phi_A(\sigma) + (1 - \mu(\bar{\varepsilon}))\phi_B(\sigma)$$

ここで、 $\mu(\bar{\varepsilon}) = 1 \sim 0$  は相当塑性ひずみの簡単なスカラー関数である。

以上は、単軸応力状態での大ひずみ異方硬化パラメータの決定方法であるが、多軸応力状態における異方性パラメータの決定のために、従来の二軸引張り試験に変わり、液圧バルジ試験（等二軸応力状態）および平面ひずみ引張り試験が有効であることを確認できた。

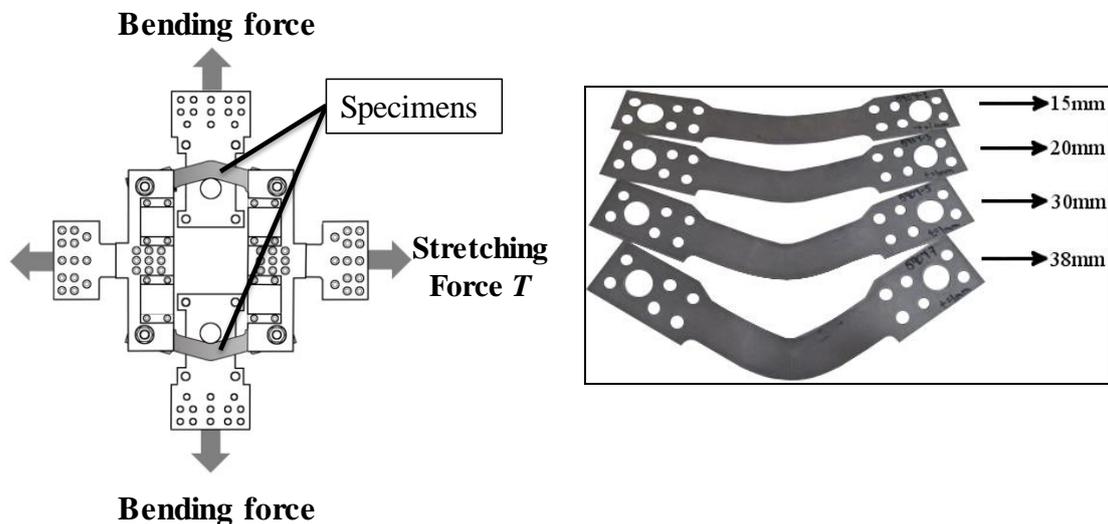


Fig. 1 板材の面内引張り曲げ試験

### (2) 異方性発展モデルの CAE ソフトへの実装

上記(1)の異方性発展モデルを Y-U モデルと組合わせた弾塑性構成モデルを板材成形 CAE ソフト(LS-DYNA)にユーザーサブルーチンを利用して実装した。なお、異方性降伏関数は、本研究申請者らの提案している 6 次応力多項式型を用いた。これによるシミュレーション結果については以下で述べるが、プレス成形シミュレーションには大ひずみ異方性発展モデルとそれを記述する正確な材料モデルの使用が不可欠なことが確認できた。

### (3) エッジ割れのクライテリオンを検討

エッジ割れモードを「穴拡張モード」と「引張り曲げモード」に大別して検討した。実験としては、①平頭パンチを用いた穴拡張試験、②板の面内引張り曲げ試験を行い、それぞれの実験に対応する FEM シミュレーションもを行い、エッジ割れのクライテリオンについて検討した。

① 円筒穴拡張： 円筒穴拡張におけるエッジ割れは、穴をワイヤカットや機械加工で作った場合には、板の異方性に起因するひずみ局所箇所が起点となり、板のくびれが発展することにより割れにつながるということがわかった。その様子は FEM シミュレーションでも再現できたが、その際、板の大ひずみ域での異方性・硬化発展を忠実に再現できるモデル(AH)の使用が不可欠であることが確認できた。Fig. 2 には高張力鋼板の穴縁の板厚ひずみ分布の実験結果とシミュレーション結果の比較を示したものである。なお、項目(1)で述べた方法による大ひずみ異方硬化パラメータを用いた。

② 面内引張り曲げ： 面内引張り曲げにおけるエッジ割れも板のひずみ局所化から出発していることが、DIC 測定結果と FEM シミュレーションの双方から確認ができた。

以上により、エッジ割れはひずみ局所化を起点とすることが確認で、それは板の異方性に大きく影響されていることもわかった。なお、板を打ち抜き加工した場合には板縁に形成される加工硬化層やマイクロクラックの影響も大きいことが確認された。その影響を含むエッジ割れのクライテリオンの確立は今後の重要課題として残された。

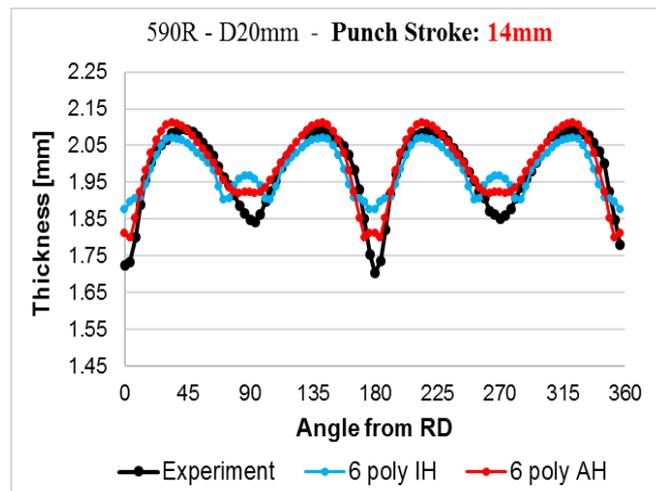


Fig. 2 穴拡げ試験における板縁の板厚ひずみの実験結果と FEM シミュレーション結果の比較

#### (4) 材料データベース

超高張力鋼板 (UHSS) の材料データベースの枠組みを作り, 本研究で得られた材料データを保管した。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- (1) T. Suzuki, K. Okamura, G. Capilla, H. Hamasaki, F. Yoshida, Effect of anisotropy on circular and oval hole expansion behavior of high-strength steel sheets, *International Journal of Mechanical Sciences* 146-147 (2018), 556-570.  
doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.10.038
- (2) N. Saito, M. Fukahori, T. Minote, Y. Funakawa, D. Hisano, H. Hamasaki, F. Yoshida, Elasto-viscoplastic behavior of 980 MPa nano-precipitation strengthened steel sheet at elevated temperatures and springback in warm bending, *International Journal of Mechanical Sciences* 146-147 (2018), 571-582.  
doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.11.044
- (3) G. Capilla, H. Hamasaki, F. Yoshida, Determination of uniaxial large-strain workhardening of high-strength steel sheets from in-plane stretch-bending testing, *Journal of Materials Processing Technology* 243 (2017) 152-169.  
dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.12.002
- (4) F. Yoshida, H. Hamasaki, T. Uemori, Description of closure of cyclic stress-strain loop and ratcheting based on Y-U model, *Key Engineering Materials* 273 (2017), 351-356.  
10.4028/www.scientific.net/KEM.725.677

[学会発表] (計 10 件)

- (1) Fusahito Yoshida, Descriptions of several cyclic plasticity behaviors: non-linear unloading, closure of stress-strain hysteresis loop, tension-compression asymmetry and strain-rate effect, by extended version of Yoshida-Uemori model, *AEPA 2018*, (2018)
  - (2) Fusahito Yoshida, Descriptions of non-linear unloading curve and closure of stress-strain loop based on Y-U model, *NUMISHEET 2018*, (2018)
  - (3) 吉田総仁, 板材成形シミュレーションのための材料モデルと成形限界クライテリオン, 日本鉄鋼協会白石記念講座(2017)
  - (4) 葛川剛士, 面内引張り曲げ試験による高張力鋼板の伸びフランジ成形性調査, 平成 29 年度塑性加工春季講演会(2017)
  - (5) Fusahito Yoshida, Cyclic plasticity model with anisotropy evolution, *NUMIFORM 2016* (2016)
- ほか 5 件

〔その他〕

ホームページ等

広島大学弾塑性工学研究室ホームページ

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/eplabo/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：日野 隆太郎

ローマ字氏名：(HINO, Ryutaro)

所属研究機関名：広島大学

部局名：工学研究科

職名：准教授

研究者番号（8桁）：10283160

研究分担者氏名：濱崎 洋

ローマ字氏名：(HAMASAKI, Hiroshi)

所属研究機関名：広島大学

部局名：工学研究科

職名：助教

研究者番号（8桁）：30437579

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。