

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656108

研究課題名(和文)板成形CAE高精度化のための大ひずみ域応力-ひずみ関係と異方性の新しい決定法

研究課題名(英文)Determination of stress-strain relationship and anisotropy for accurate CAE of sheet metal forming

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) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：板材成形の高精度なシミュレーションのためには加工硬化、バウシinger効果および異方性を的確に表現できる材料モデルの使用が不可欠である。本研究では、大ひずみにおける材料特性を弾塑性逆問題により決定することを目的としている。大ひずみの硬化特性は、板の面内引張り試験からSwift-Voceの複合型硬化則における重み係数を決めることにより決定した。バウシinger効果についてはYoshida-Uemori移動硬化則における材料パラメータを繰返し三点曲げより決定した。異方性については、6次多項式型の降伏関数を提案し、さらにこのモデルを用いて、異方性が塑性ひずみとともに変化する挙動を表すことができた。

研究成果の概要(英文)：For accurate numerical simulation of sheet metal forming, the use of appropriate material models that describe the workhardening, the Bauschinger effect and the anisotropy of sheet metals is of vital importance.

In the present work, material properties at a large strain were determined by the elasto-plasticity inverse approach. For the large strain workhardening characteristic, the weighting parameter in the combined Swift-Voce model was identified from an in-plane cyclic bending experiment. For the determination of the Bauschinger effect, a set of material parameters of the Yoshida-Uemori kinematic hardening model were identified from a three-point cyclic bending experiment. For the anisotropy, the sixth-order polynomial type yield function was proposed, and based on the model, the description of the evolution of anisotropy with increasing plastic strain was presented.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学, 生産工学・加工学

キーワード：成形加工 弾塑性特性 CAE 大ひずみ 異方性

1. 研究開始当初の背景

金属板プレスでは CAE 技術の発展が目覚しく、成形シミュレーションにより実際のトライを行わずに板の成形割れ、シワの術の発生、スプリングバックなどを予測し、その結果を最適金型設計などにつなげている。成形シミュレーションでは材料特性（板材の加工硬化（応力 - ひずみ関係）、バウシinger 効果、異方性）を適切に反映させる必要がある。

材料パラメータの決定には単軸引張り試験で試験片がくびれるまでのひずみ（10～25%ひずみ程度で、例えば高張力鋼板では10%以下）の実験データしか準備できないため、これ以上の大ひずみ域の特性は応力 - ひずみ式を用いて外挿計算で推定せざるを得ない。しかし、この結果は用いる式の形によって大きく変わってしまう。この問題が材料モデル・成形シミュレーションのさらなる高精度化のための大きな障害、残された最大の課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、実際の板材プレス成形で生じる大ひずみ領域での弾塑性材料特性値（加工硬化特性、バウシinger 効果、異方性）を弾塑性逆解析で求めるための実験方法、パラメータ同定方法を検討する。このことと関連して、大ひずみ硬化式および異方性の高精度表現のための新しい降伏関数についても新たな提案を行う。

3. 研究の方法

(1) 大ひずみ硬化特性

大ひずみ域での応力 - ひずみ曲線を次に示す Swift(S)と Voce(V)の硬化式を組み合わせた硬化式を用いて表現する（図1参照）。

$$\sigma = \mu \sigma_S + (1 - \mu) \sigma_V \quad (1)$$

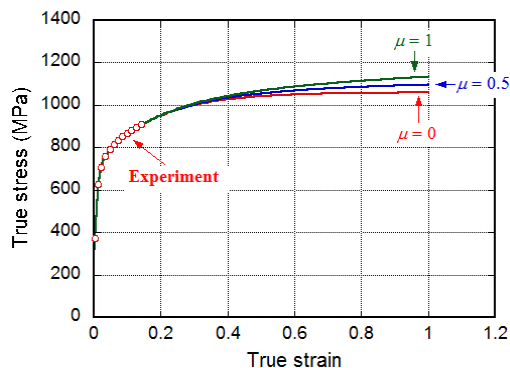


図1 Swift-Voce 複合硬化則

この硬化式を利用いた板材の加工の数値シミュレーション結果と対応する実験結果が最もよく一致するパラメータ μ を決定する

ことにより大ひずみ域での応力 - ひずみ関係を決定する。加工としては、平頭パンチを用いた穴広げと板の引張り曲げを利用する。

(2) バウシinger 効果

バウシinger 効果を精度よく表現する構成式として、研究代表者らが提案している Yoshida-Uemori model (Y-U model) を用いる。繰返し三点曲げにおける荷重 - たわみ曲線の実験結果と計算結果が最もよく一致するような Y-U model パラメータを同定することにより、バウシinger 効果特性を決定する。

(3) 異方性

板材の異方性を高精度に表現する降伏関数を新たに提案し、それを用いて、降伏関数中の材料パラメータを実験から決めることにより異方性を同定する。

4. 研究成果

(1) 大ひずみ硬化特性

平頭パンチ穴広げ実験より得られるパンチ荷重 P と穴広げ率 の関係を用いて大ひずみ領域における加工硬化（応力 - ひずみ関係）を弾塑性逆問題として求める方法について数値シミュレーションにより検討した。しかし、 P - 応答に及ぼす大ひずみ域での応力 - ひずみ関係の影響が十分小さく、逆問題での特性同定が困難であることがわかった。

そこで、それに代わる新たな方法として面内引張り三点曲げを考案し、それについて実験と数値シミュレーション（図2参照）の双方から検討した。高張力鋼板について、本研究で新たに開発した引張り曲げ装置を用いて、板に引張り力を加えながら曲げる実験を実施した（図3参照）。また、大ひずみ域で加工硬化が継続する Swift 則と硬化が一定値に収束する Voce 則を用いて、面内三点曲げにおける荷重 - たわみ挙動および試験片変形状が硬化則によってどのように異なるかについて検討した。

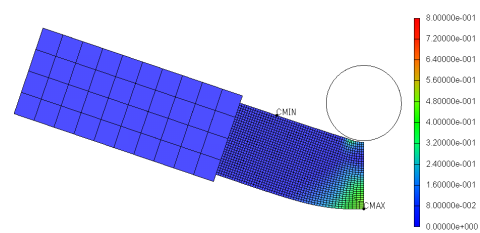


図2 引張り曲げの数値シミュレーション



図3 引張り曲げ試験後の試験片

その結果、荷重 - たわみ挙動については、大きなたわみ領域では硬化則による違いが見られるが、実験ではそのような大きな変形を与えることが難しいことがわかった。そこで、荷重点直下の引張り側におけるひずみ集中に着目したところ、これは硬化則によって大きく異なることがわかった。Swift-Voce 複合硬化則 (式(1)) を用いて、実験結果から μ 値を決定したところ、590R 高張力鋼板については $\mu=0.5$ が得られた (図 4 参照)。

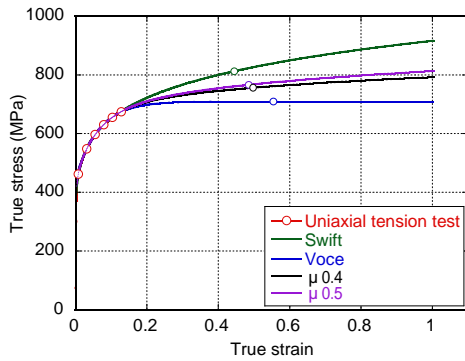


図 4 曲げ直下の板外表面における応力ひずみ関係

(2) バウシinger 効果

バウシinger 効果を繰返し三点曲げから得られる荷重 P とたわみ h の関係を用いて求める方法について検討した。そのためのスキームは次のとおりである。

繰返し荷重 - たわみ半サイクルごと ($\alpha=1, \dots, L$) に S_α 個の実験データ ($P_s^\alpha - \lambda_s^\alpha$, $s=1, \dots, S_\alpha$) があるとする。構成式に含まれるは N 個の材料パラメータ $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} = \{Y, C, m, \dots\}$ が与えられると、たわみの実験データ λ_s^α に対応する応力はこの構成式より $P_{cal}(\mathbf{x}, \lambda_s^\alpha)$ のように計算される。材料パラメータ \mathbf{x} は応力の計算結果と実験結果 $P_{exp}(\lambda_s^\alpha)$ の差が最小となるものとして決定される。すなわち、目的関数

$$F(\mathbf{x}) = \sum_{\alpha=1}^L w_\alpha F_\alpha(\mathbf{x})$$

$$F_\alpha(\mathbf{x}) = \sum_{s=1}^{S_\alpha} \frac{\{P_{exp}(\lambda_s^\alpha) - P_{cal}(\mathbf{x}, \lambda_s^\alpha)\}^2}{P_{exp}(\lambda_s^\alpha)^2} \quad (2)$$

を最小とするようなパラメータ \mathbf{x} を逆問題として求める。この求解には(2)最適化法が用いた。繰返し三点曲げ装置を本研究で新たに開発し、高張力鋼板、アルミニウム、銅合金などの板材について実験を行い、本方法によりバウシinger 効果の特性を決めることができることを確認した。

(3) 異方性

板材の異方性を高精度に表現できる 6 次の応力多項式型の降伏関数 (式(3)) を新しく提案した。

$$\begin{aligned} \phi^{(6)} = & C_1 \sigma_x^6 - 3C_2 \sigma_x^5 \sigma_y + 6C_3 \sigma_x^4 \sigma_y^2 - 7C_3 \sigma_x^3 \sigma_y^3 \\ & + 6C_5 \sigma_x^2 \sigma_y^4 - 3C_6 \sigma_x \sigma_y^5 + C_7 \sigma_y^6 \\ & + 9(C_8 \sigma_x^4 - 2C_9 \sigma_x^3 \sigma_y + 3C_{10} \sigma_x^2 \sigma_y^2 \\ & - 2C_{11} \sigma_x \sigma_y^3 + C_{12} \sigma_y^4) \tau_{xy}^2 \\ & + 27(C_{13} \sigma_x^4 - C_{14} \sigma_x \sigma_y^3 + C_{15} \sigma_y^2) \tau_{xy}^4 \\ & + 27C_{16} \tau_{xy}^6 \end{aligned} \quad (3)$$

この降伏関数に含まれる材料パラメータ $C_k, k=1, 2, \dots, 16$ を実験的に決めるために、板 3 方向引張りから得られる流動応力 ($\sigma_0, \sigma_{45}, \sigma_{90}$)、と r 値 (r_0, r_{45}, r_{90}) さらに等二軸応力 (σ_b)、平面ひずみ近傍の応力 (σ_a, σ_c) が必要である。とくに大ひずみでは、等二軸応力は液圧パルジ試験、平面ひずみ近傍の応力測定には切欠き板の引張りが適していることがわかった。

また、大ひずみ領域では流動応力の板方向依存性や r 値はひずみとともに変化する場合があるが、この場合のモデル化を以下のように行った。

相当塑性ひずみ $\bar{\varepsilon}_A$ と $\bar{\varepsilon}_B$ における降伏関数をそれぞれ $\phi_A(\sigma)$ 、 $\phi_B(\sigma)$ とおくと、 $\bar{\varepsilon}$ ($\bar{\varepsilon}_A \leq \bar{\varepsilon} \leq \bar{\varepsilon}_B$) における降伏関数 $\phi(\sigma, \bar{\varepsilon})$ は相当塑性ひずみのスカラー関数である内挿関数 $\mu(\bar{\varepsilon})$ を使って次式のように書く。

$$\phi(\sigma, \bar{\varepsilon}) = \mu(\bar{\varepsilon}) \phi_A(\sigma) + (1 - \mu(\bar{\varepsilon})) \phi_B(\sigma) \quad (4)$$

ここで、 $\phi_A(\sigma)$ と $\phi_B(\sigma)$ が凸面性を満足する降伏関数であれば、その線形結合で表されている $\phi(\sigma, \bar{\varepsilon})$ も必ず凸面性を満足する。とくに m 次多項式降伏関数 (例えば式(3)では $m=6$)

$$f = \phi^{(m)} - \sigma_0^m = 0 \quad (4)$$

については、

$$\phi^{(m)} = \mu(\bar{\varepsilon}) \phi_A^{(m)} + (1 - \mu(\bar{\varepsilon})) \phi_B^{(m)} \quad (5)$$

とおくと、材料パラメータ $C_k, k=1, 2, \dots, 16$ は $\phi_A^{(m)}$ における係数 $C_{k(A)}$ と $\phi_B^{(m)}$ における係数 $C_{k(B)}$ を用いて次式のように表現できる。

$$C_k = \mu(\bar{\varepsilon}) C_{k(A)} + (1 - \mu(\bar{\varepsilon})) C_{k(B)} \quad (6)$$

図 5 は、このようにして計算したステンレス鋼板の流動応力の方向依存性であり、これが塑性ひずみの進行に伴って変化している様子を実験結果と比較しながら示している。これらの結果からわかるように、塑性ひずみ全域にわたる異方性の発展が精度良く記述できていることがわかる。

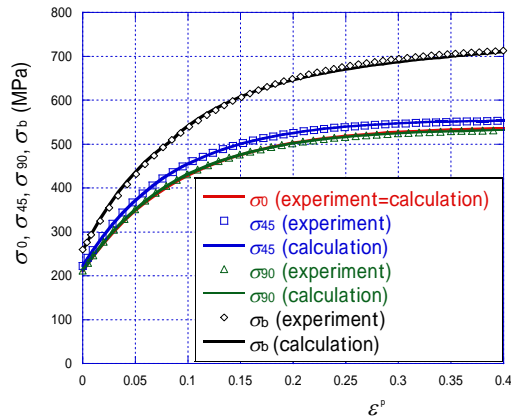


図5 ステンレス鋼板の流動応力の方向依存性の塑性ひずみによる変化（実験結果と計算結果の比較）

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6件）

1. F. Yoshida, H. Hamasaki, T. Uemori:
A user-friendly 3D yield function to describe anisotropy of steel sheets International Journal of Plasticity, Vol.45 (2013) pp.119-139 査読有り
DOI: 10.1016/j.ijplas.2013.01.010
2. Y. Hattori, K. Furukawa, F. Yoshida:
Experimental and Calculated Cyclic Elasto-Plastic Deformations of Copper-Based Spring Materials, IEICE Transactions on Electronics, Vol. E96C, Issue: 99 (2013), pp.1157-1164 査読有り
DOI: 10.1587/transele.E96.C.1157
3. N. Saito, M. Fukahori, D. Hisano, Y. Ichikawa, H. Hamasaki, F. Yoshida:
Elasto-Plastic Property of High Strength Steel at Warm Temperature and Its Springback, Key Engineering Materials, Vols. 535-536 (2013) pp. 385-388. 査読有り
DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.535-536.385
4. T. Uemori, S. Sumikawa, S. Tamura, F. Yoshida:
Constitutive equations of stress- strain responses of aluminum sheet under stress path change. Key Engineering Materials, Vols. 535-536 (2013) pp. 385-388. 査読有り
DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.535-536.101

5. K. Kitayama, T. Kobayashi, F. Yoshida:
Elasto-plasticity behavior of IF steel sheet with planar anisotropy and its macro-meso modeling, ISIJ International, Vol. 52 (2012) pp. 735-742. 査読有り

外1編

〔学会発表〕（計11件）

1. 神原大輔：金属材料の大ひずみ域における応力 - ひずみ曲線の決定，日本機械学会中国四国支部第52期総会・講演会（2014年3月5日），鳥取大
2. Fusahito Yoshida: Modeling of Anisotropic Hardening of Sheet Metals, The 9th International Conference and Workshop (NUMISHEET2014) 【招待講演】（2014.01.06 ~ 2014.01.10），Melbourne, Australia.
3. Fusahito Yoshida: Description of Anisotropy and Bauschinger Effect on Various Types of Steel Sheets, The 11th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes (NUMIFORM 2013), (2013.07.06 日 ~ 2013.07.10)【招待講演】，Shenyang, China
4. Fusahito Yoshida: A 3D Yield Function for Anisotropic Sheets, 18th International Symposium on Plasticity & Its Current Applications (Plasticity2012) 【招待講演】，(2012.01.05-09)，San Juan, Puerto Rico, USA

外7編

〔その他〕

ホームページ：

<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