

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月10日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2011

課題番号：20360070

研究課題名（和文）高機能難加工板材の冷・熱間成形 CAE のための高精度材料モデルと成形限界予測

研究課題名（英文）Accurate material models and prediction of forming limits on high performance difficult-to-form sheet metals for cold and hot forming CAE

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

研究成果の概要（和文）：

種々の金属板材（高張力鋼板，ステンレス，アルミニウム，マグネシウム，チタン）の様々な温度における弾粘塑性挙動について実験的に調査した。これらの実験結果をもとに，マクロ構成モデルを提案し，これらを CAE コード LS-DYNA に組込んだ。また，異方性に及ぼす集合組織の影響を検討するために，結晶塑性メゾモデルを構築した。さらに，張出し，引張り曲げ，穴広げなどにおける成形限界について検討し，これらについてのクライテリオンを新たに提案した。これらの材料モデルと成形限界クライテリオンを成形シミュレーションにより検証した。

研究成果の概要（英文）：

Elasto-viscoplastic material behaviors of several types of sheet metals, such as high strength steel, stainless steel, aluminum, magnesium and titanium sheets, at various temperatures were experimentally investigated. Based on the experimental observations, macro constitutive models for these metals were proposed and they have been installed into CAE code LS-DYNA. Meso-plasticity models based on the crystal plasticity theory were also proposed to discuss the effect of the texture on the anisotropy of sheet metals. Furthermore, forming limits under stretch forming, stretch bending and hole expansion were investigated, and new criteria of forming limits were newly proposed. The validity of the proposed material models and the forming limit criteria have been verified by performing sheet metal forming simulations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2009年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2010年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2011年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
総計	15,100,000	4,530,000	19,630,000

研究分野：弾塑性工学，塑性加工

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，高機能難加工板材，弾塑性構成モデル，成形限界，熱間加工，CAE

1. 研究開始当初の背景

本申請者らが提案した異方性大ひずみ繰返し塑性モデル (Yoshida-Uemori model) はスプリングバック解析の高精度化に効果が大きいとして板成形汎用FEMコード (PAM STAMP (仏) およびLS-DYNA(米)) に採用されるなど高く評価されている。このモデルを種々の難加工材の固有の変形メカニズム (例えば応力誘起変態, 双晶変形など) にも対応できるように, 改良することが求められる。さらに, 材料組織とマクロ挙動の関係を明らかにするための研究も重要である。

超高張力鋼板, マグネシウム, アルミニウムなどではホットプレスが行われることもあり, 温度・速度依存型塑性構成モデルへの要望も強い。

板成形には大別して, 絞り, 張出し, 曲げ, 穴抜き (縁割れ) のモードがあるが, それぞれのモードにおける成形限界値と材料ミクロ組織の関連が難加工性材については十分整理されていない。

2. 研究の目的

様々な高機能難加工金属板材に対して, 材料モデル (室温から高温における弾塑性構成式) と成形限界予測モデルを実験と理論の両面から検討する。これらを板成形 CAE ソフトに組み込み実用に供することを目的とする。また, 材料ミクロ組織や変形の素過程を考慮した物理モデル (メゾ・ミクロモデル) を構築し, 材料開発のための指針を得る。

3. 研究の方法

(1) 冷間 (室温) 加工硬化, 繰返し硬化, バウシinger効果, 異方性, 応力-ひずみ応答の速度依存性などの重要な弾塑性挙動を調査する。

(2) 熱間プレスへの対応のため, 高温における材料特性と成形限界を調査する。

(3) 材料の弾 (粘) 塑性挙動を精度良く記述できる材料モデル (構成式) を確立する。

(4) 様々な成形モードにおける成形限界のクライテリオンを確立する。

(5) 上記 (3), (4) で確立した材料モデルと成形限界クライテリオンを板成形 CAE ソフトに組み込んで, 成形シミュレーションが可能となる枠組みを構築する。

(6) 材料のミクロ組織と材料のマクロ挙動

との関係を明らかにし, 加工性の良い材料開発の指針を作る。

4. 研究成果

(1) 種々の金属材板材 (高張力鋼板, ステンレス鋼, アルミニウム合金など) について, 冷間 (室温) における様々な材料試験 (単軸引張り, 二軸引張り, 繰返し塑性実験, ひずみ経路急変試験など) を実施し, 加工硬化, 繰返し硬化, バウシinger効果, 交差硬化, 異方性, 応力-ひずみ応答の速度依存性などの重要な弾塑性挙動を調査した。

(2) 熱間プレスへの対応のため, ボロン鋼, アルミニウム合金, チタンおよびその合金, マグネシウム合金について, 高温での材料実験を行った。

(3) これらの実験結果をもとに, 弾 (粘) 塑性変形挙動を記述する構成モデルについて検討した。これには室温における速度非依存型ものと, 主に高温で顕著となる速度依存型ものの二つについて考えた。前者については既に提案している Yoshida-Uemori model の次の枠組みを使いながら, 異方性降伏関数を組込んだものとする。

初期降伏条件が $f = \phi(\sigma) - Y = 0$ で与えられるとき,

$$\text{降伏曲面: } f = \phi(\sigma - \alpha) - Y = 0$$

$$\text{限界曲面: } F = \phi(\sigma - \beta) - (B + R) = 0$$

$$\text{関連流動則: } \mathbf{D}^p = \frac{\partial \phi}{\partial \sigma} \dot{\lambda}$$

ここで, Y : 降伏曲面の大きさ (初期降伏強さ), α : 降伏曲面の中心 (背応力), B : 限界曲面の初期の大きさ, R : 限界曲面の等方硬化, β : 限界曲面の中心である。

従来の高精度異方性降伏関数は極めて多数の材料パラメータを必要としていることは実用上問題であるので, この点については, 次式で示す応力の6次多項式型の降伏関数を考案した。

応力テンソル σ に次のような線形変換 L (異方性マトリクス) を施し, 材料の異方性表現を含む偏差応力テンソル \tilde{S} を新たに定義する。

$$\tilde{S} = L \sigma$$

この偏差応力テンソル \tilde{S} の第2不変量 \tilde{J}_2 , 第3不変量 \tilde{J}_3 を使って, 次のような異方性降伏関数を提案する。

$$\phi = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \phi^{(i)} = \frac{1}{n} (\phi^{(1)} + \phi^{(2)} + \dots + \phi^{(n)})$$

$$\phi^{(i)} = 27 (\tilde{J}_2^{(i)3} - \xi \tilde{J}_3^{(i)2})$$

Fig. 1 は、一例として、アルミニウム合金 AA2090-T3 の種々の方向の r 値 (r_α) の実験結果と本提案の降伏関数(Yoshida)による計算、また参考として Hill48, Gotoh, Barlatら (Yld2000-2d) による計算値を比較して示している。この結果から、本モデルではこの材料の r 値の面内異方性を極めて良い精度で再現していることがわかる。

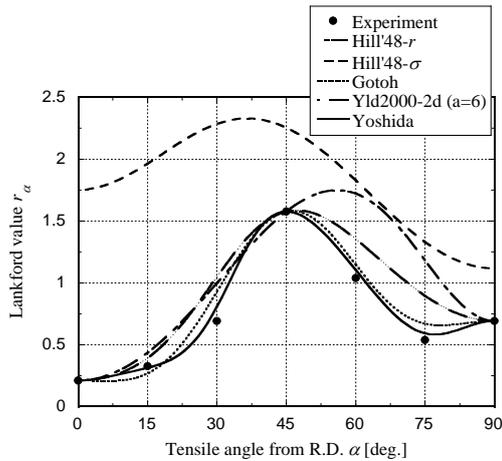


Fig. 1 R-values of AA2090-T3 sheet and its predictions by the present model (Yoshida), Hill48, Barlat et al.'s (Yld2000-2d) and Gotoh's 4th-order yield function.

ステンレス鋼の TRIP 現象のモデルを新たに提案した。高温での弾粘塑性変形については、それぞれの材料に特徴的な変形メカニズム (例えば AZ31 における双晶・双晶解消など、チタンにおける降伏点現象など) があるので、それらを考慮したモデル化を行った。

(4) 主に高張力鋼板について、種々の変形モードに対応する成形限界クライテリオンを検討した。本研究では、非比例変形における成形限界線 (FLC) を簡単に予測する方法について新たな提案を行った。Fig. 2 には、590MPa 級の高張力鋼板の非比例変形における FLC を予測した例を示す。

さらに、穴広げ性および引張り曲げ破断限界について実験的に調べ、その成形限界クライテリオンについて、いくつかの新しい提案を行った。

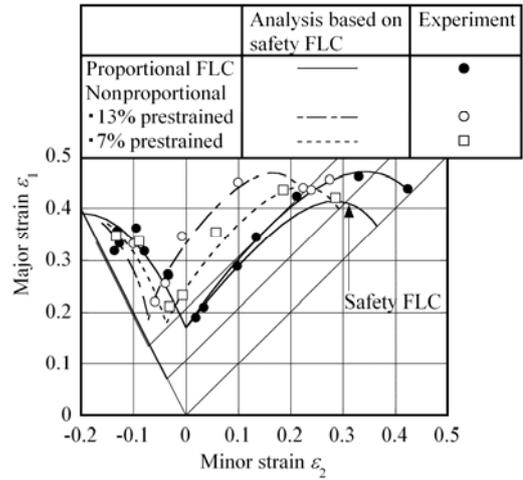


Fig. 2 Non-proportional FLC for 590MPa high strength steel sheet.

(5) 材料モデル (異方性降伏関数 + Yoshida-Uemori 移動硬化則) を FEM コード (LS-DYNA) のユーザーサブルーチンに組み込み、成形シミュレーションを行った。スプリングバックや穴広げ試験などの成形シミュレーションを行って、対応する実験結果と比較することにより、その有効性を確認した。Fig. 3 には、一例として、590MPa 高張力鋼板の穴広げ試験における板厚分布の実験結果と本モデル (Yoshida) および Hill48-r, Barlat Yld2000-2d による計算結果を比較して示している。この結果から本モデルによる計算が最も高精度であることが確かめられた。

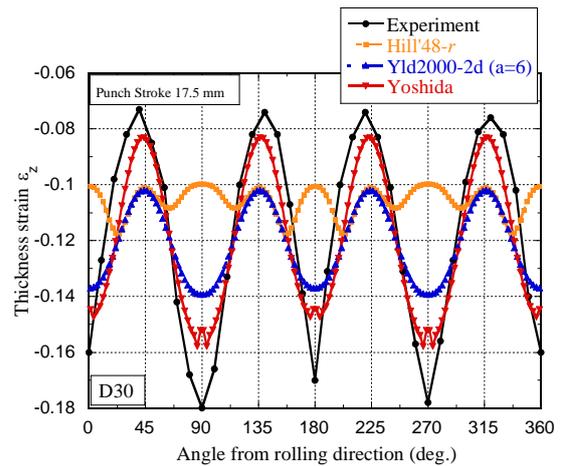


Fig. 3 Predictions of sheet thickness distribution in hole expansion experiment of 590MPa high strength steel sheet by the present model (Yoshida), Hill48-r and Barlat et al.'s (Yld2000-2d) models.

(6) 結晶塑性理論をベースとして集合組織が r 値や流動応力、降伏曲面形状に及ぼす影響を調べた。Bcc(鉄鋼), fcc (アルミニウム) および hcp (マグネシウム) について、変形挙動に及ぼす集合組織の影響を検討した。また、hcp の双晶・双晶解消挙動のモデルを構築した。Fig. 4 は、IF 鋼板の r 値異方性を集合組織を用いて結晶塑性理論 (Taylor モデル および結晶塑性有限要素法 CPFEM) により予測したものである。

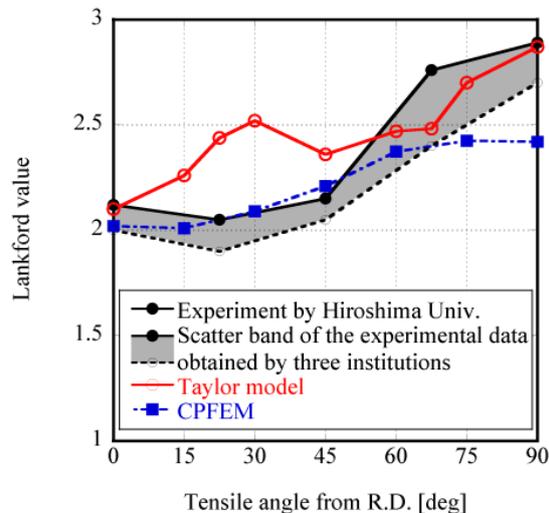


Fig. 4 Predictions of r -value anisotropy of IF steel sheet by two types of crystal plasticity models: Taylor model and CPFEM.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 21 件)

1. 北山功志郎, 小林匠, 上森武, 吉田総仁: 面内異方性を持つIF鋼板の弾塑性特性とそのマクロメゾモデリング, 鉄と鋼, 97 (2011), pp. 221-229. 査読有
2. 平原篤, 藤井裕, 日野隆太郎, 吉田総仁: 高張力鋼板のひずみ経路変化を含む張出し成形限界, 塑性と加工, 52 (2011), pp. 821-827. 査読有
3. 森下勇樹, 安部重毅, 坂元康泰, 吉田総仁: 複動ポンチを用いたドローバンド成形における高張力鋼板の形状凍結性, 塑性と加工, 52 (2011), pp. 806-810. 査読有
4. 田村 翔平, 澄川 智史, 上森 武, 濱崎 洋, 吉田 総仁: 5000系および6000系アルミニウム合金板における弾塑性挙動の実験観察, 軽金属, 61 (2011), pp.255-261. 査読有

5. S. Tamura, S. Sumikawa, T. Uemori, H. Hamasaki, F. Yoshida: Experimental observation of elasto-plasticity behavior of type 5000 and 60000 aluminum alloy sheets, Materials Transaction, 52 (2011), pp. 868-875. 査読有

6. T. Uemori, S. Sumikawa, S. Tamura, H. Hamasaki, T. Naka, R. Hino, F. Yoshida: Constitutive Equations of Bauschinger Effect under Stress Path Change, Steel Research International, Special Issue on 10th ICTP (2011), pp. 819-823. 査読有

7. T. Kobayashi, K. Kitayama, T. Uemori, F. Yoshida: Description of planar anisotropy and cyclic plasticity behavior of aluminum sheet based on crystal plasticity, Applied Mechanics and Materials, 117-119 (2011), pp. 1397-1401. 査読有

8. Takeshi Uemori, Tohru Kuramitsu, Yuji Mito, Ryutaro Hino, Tetsuo Naka and Fusahito Yoshida: Elasto-Plasticity Behavior of High Strength Steel Sheet in Biaxial Stress Path Change, Materials Transactions, 51-10 (2010), pp.1814-1818. 査読有

9. Ryutaro Hino, Naoaki Nagaishi, Yuki Yamamoto, Tetsuo Naka and Fusahito Yoshida: Incremental forming with local heating for aluminum-magnesium alloy sheet, Steel Research International, 81-9 (2010), pp. 946-949. 査読有

10. Tetsuo Naka, Takanori Kurose, Takeshi Uemori, Ryutaro Hino and Fusahito Yoshida: Prediction of fracture for high strength steel sheets under stretch bending, Steel Research International, 81-9 (2010), pp.841-844. 査読有

11. X. T. Wang, H. Hamasaki, M. Yamamura, R. Yamauchi, T. Maeda, Y. Shirai and F. Yoshida: Yield-Point Phenomena of Ti-20V-4Al-1Sn at 1073 K and Its Constitutive Modelling, Materials Transactions, 50-6 (2009), pp. 1576-1578. 査読有

12. R. Hino, F. Yoshida, N. Nagaishi and T. Naka: Incremental Sheet Forming with Local Heating for Lightweight Hard-to-form Material, International Journal of Modern Physics B, 22-31/32 (2008), pp. 6082-6087. 査読有

[学会発表] (計 43 件)

1. Fusahito Yoshida: A 3D Yield Function for Anisotropic Sheets, 18th International Symposium on Plasticity & Its Current Applications (Plasticity2012), 2012.01.08, San Juan, Puerto Rico, USA, 招待基調講演

2. Fusahito Yoshida: A User-friendly 3D Yield Function for Steel Sheets and Its Application, 8th International Conference on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes (NUMISHE ET2011) 2011.08.23, Seoul, Korea, 招待基調講演

3. R. Hino, H. Fujii, A. Hirahara, F. Yoshida : Forming limit of high strength steel sheets under non-proportional deformation, 8th Int. Conference on Technology of Plasticity (ICTP2011) 2011.09.28, Aachen, Germany

4. Fusahito Yoshida: Material models for accurate simulation of sheet metal forming and springback, 10th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes (NUMIFORM 2010), (2010.6.16), Postech, Korea 招待基調講演.

.5. Fusahito Yoshida: A model of large-strain plasticity and its numerical applications to springback prediction, Forming Technology Forum 2009 (FTF09), (2009.5.5), Zurich, Switzerland 招待基調講演

6. Fusahito Yoshida: A Model of Large-strain Cyclic Plasticity and Its Numerical Simulation Applications to Springback Prediction and Compensation, 7th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes (Numisheet 2008), (2008.9.3). Interlarken, Switzerland 招待基調講演

[その他]

ホームページ

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

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

上森 武 (UEMORI TAKESHI)

近畿大学・工学部・講師

研究者番号 : 70335701

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

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :