

令和 3 年 5 月 31 日現在

機関番号：32612
 研究種目：基盤研究(C) (一般)
 研究期間：2018～2020
 課題番号：18K03881
 研究課題名(和文) 微視的変形機構を考慮したマルチスケール数値材料試験による一般化材料モデルの構築

研究課題名(英文) Development of Generalized Material Model by Multi-Scale Numerical Material Testing Considering Microscopic Deformation Mechanism

研究代表者
 大家 哲朗(OYA, TETSUO)
 慶應義塾大学・理工学部(矢上)・講師

研究者番号：10410846

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：車体等で近年使用が増加している難成形材のプレス成形の生産性を向上させるために、成形シミュレーションの基礎理論を根本から見直し、精度向上および力学的原理に則った加工プロセスデザイン支援を実現するための研究を行なった。そのため次の2課題、(1)材料微視構造に立脚した一般化材料モデルの構築、(2)一般化材料モデル活用を支援できる数値材料試験法の確立、に取り組んだ。(1)に関しては有限要素多結晶モデルを用いた検証により、構築したモデルが任意の付加経路の加工硬化を表現できることが確認できた。(2)については実材料データを用いた検討により、fccおよびhcp材料に対する提案手法の有効性が確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義
 一般加工硬化モデルの検討のために有限要素多結晶モデルを用いた解析を行い、バックラッシュモデルによるパウシンガー効果、最大林立転位モデルによる交差硬化の表現を実装し、微視的パラメータが及ぼす影響を文献値を用いて検証した。定量的な一致度には検討の余地があるものの、傾向としては材料の特徴をよく捉えており、提案モデルの有効性が示された。数値材料試験に関しては、単軸の材料試験結果を用いて同定されたパラメータを用いたモデルで二軸試験の応力ひずみ曲線を予測したところ良好な合致を示し、提案手法が実験の代替として機能することが確認できた。全体として当初の計画を概ね達成することができ、成形解析の高度化に寄与できた。

研究成果の概要(英文)：To improve the productivity of press forming of difficult-to-form materials, which have been increasingly used in recent years especially for car bodies, we have investigated the basic theory of forming simulation, and conducted research to realize support for forming process design. In order to achieve this, the following two subjects were addressed: (1) development of a generalized material model based on the microscopic structure of materials, and (2) establishment of a numerical material testing method that can support the use of the generalized material model. For (1), it was verified by using a finite element polycrystal model that the developed model can represent work-hardening of an arbitrary additional path. For (2), the effectiveness of the proposed method for fcc and hcp materials was confirmed by using actual material data.

研究分野：塑性力学

キーワード：成形シミュレーション 材料モデル 結晶塑性 数値材料試験 加工硬化

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

持続可能社会達成のためには、自動車・航空機・高速鉄道等の輸送体のエネルギー消費率を減少させることが喫緊の課題であり、軽量化の果たす役割が大きいことは明らかである。そのためには構造部（フレーム、外板等）での重量減が不可欠であり、難成形である高張力鋼板や軽金属合金（Al・Mg・Ti 合金等）の適用による目標達成が試みられている。必要とされる技術的基盤としてシミュレーション（CAE）によるプレス成形時の材料破壊予測や製品品質・形状予測が挙げられるが、実務の観点からは不十分な部分も多く、一層の精度向上が求められている。

金属材料の成形シミュレーションの精度を左右する根幹技術が材料モデリングである。これは、材料の挙動を数理化した現象論的モデルであり、解析効率化のために不可欠なので現在盛んに研究されている。しかし多様化・高強度化が進む先端材料開発と、複雑な加工経路を有する加工プロセスの進化という両側面のために適切なモデル化は非常に困難であり、個別対応が多い（一般性が低い）。具体的には、冷間圧延材のような強い初期異方性を示す材料にも適用可能かつ、被加工材が応力反転負荷を受ける際の降伏応力下降現象（バウシング効果）や引張りからねじりへの急変時に生じる交差硬化のような複雑な加工硬化を表現可能とする必要がある。一方、材料モデルはその高度化に伴って材料パラメータが増加する傾向にあり、要求される材料試験の負担増も解決すべき問題となっている。簡易な材料試験と数値シミュレーションを融合した数値材料試験法の確立が急務である。このように、成形シミュレーションの適用拡大のためにはあらゆる状況を包括的に扱える一般化材料モデルが必要である一方、材料試験負担の低減という、相反する問題を同時に解決する必要がある。

2. 研究の目的

(1) 材料微視構造に立脚した一般化材料モデルの構築

異方性材料、任意加工形態（反転負荷や交差負荷を含む）に対して適用可能かつ十分な精度を有し、材料パラメータが必要最小限かつ明確な力学的意味を有するような一般化材料モデルの構築を目指した検討を行う。

(2) 一般化材料モデル活用を支援できる数値材料試験法の確立

高度な材料モデルを利用する際の材料試験の手間の軽減を主な目的とした数値材料試験法の検討を行う。本研究では、数値材料試験手法の中核として微視的パラメータによって記述される仮想材料を結晶塑性モデルを用いて構築し、遺伝的アルゴリズムや深層学習等に基づく材料パラメータ学習過程を確立する。

3. 研究の方法

(1) 有限要素多結晶モデル（FEPM）^[1]のプログラムにバックラッシモデルと最大林立転位モデルを実装し、それぞれによってバウシング効果と交差硬化を表現可能にする。また、すべり系交代率を導入し、1次負荷と2次負荷の経路切り替わり時に活動化/非活動化するすべり系の割合を定量化できるようにする。また、一般化加工硬化モデルを定義し、FEPMモデルによって表現可能にする。文献値による比較を行い、任意の負荷経路切り替わり後の加工硬化曲線が精度よく表現できるかどうか確認する。

(2) FEPMに基づく仮想材料を構築し、材料パラメータを最適化手法および機械学習によって既知の材料データから決定する手法を構築する。基本的には、面内の材料試験で得られるデータを入力としてパラメータ学習を行い、未学習である面外の材料データが予測可能であるかを検証する。

4. 研究成果

(1) 材料微視構造に立脚した一般化材料モデルの構築

すべり系の活動/非活動を判定可能な逐次累積法を用いたFEPMを利用して、1次負荷として予ひずみ0.1を与えた後、反転負荷、45度方向せん断、直交負荷の3パターンでの2次負荷経路で計算した。例として反転負荷の際の交代率の変化を図1に示す。この大小関係より、すべり系の交代が負荷経路の変化に応じた推移を示しており、事前に予測した通りとなった。ゆえに活動すべり系の切り替わりの観点からは、提案モデル式の物理的妥当性が示された。

本研究ではDC06の材料データを用い、Teodosiu-Hu（TH）モデル^[2]との比較を行った。比較対象としてバックラッシモデルと交差硬化モデルを導入したFEPMを用い、その予測値を提案モデル式に代入した。図2、3、4に各負荷経路におけるモデルの検証結果を示す。いずれの場合も定性的な傾向は参照データをよく表しており、定量的にも近い結果が出ている。更なる検討は必要であるが、提案モデルの有効性は示すことができたと考えられる。

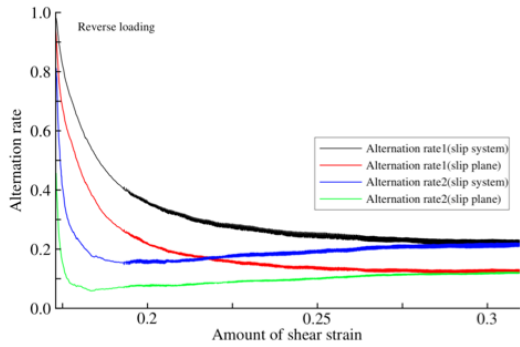


図1 交代率によるすべり系活動/非活動の傾向

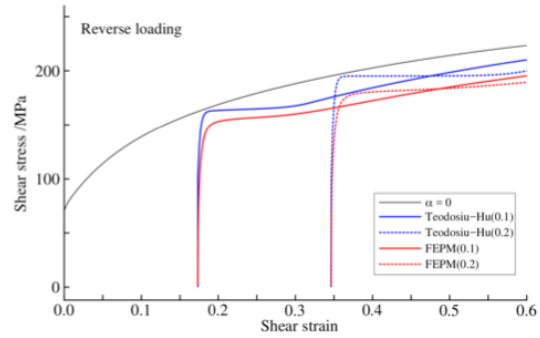


図2 反転負荷時の加工硬化曲線の比較

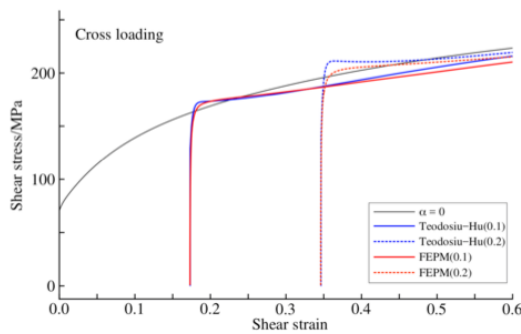


図3 直交負荷時の加工硬化曲線の比較

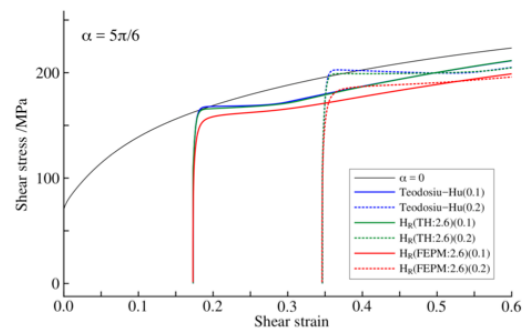


図4 中間負荷時の加工硬化曲線の比較

(2) 一般化材料モデル活用を支援できる数値材料試験法の確立

構築した数値材料試験法の概要を簡潔に説明する。材料の巨視的特性のうち、変形異方性はLankford値によって評価され、応力異方性は圧延方向(Rolling Direction, RD)と圧延横断方向(Transverse Direction, TD)の単軸引張試験における応力-ひずみ関係を用いて評価される。これらはオーダーの全く異なる数値であり、また物理的な意味合いでも一つの式で同時に評価・最適化を行うことは困難である。そこで、変形異方性と応力異方性の同時最適化手法として新たな手法を考案した。すなわち、Lankford値を評価関数として結晶方位の学習を行うプロセスと、応力-ひずみ関係を評価関数としてすべり系硬化則の学習を行うプロセスを用意し、両者を交互に繰り返すことで最終的にすべてのパラメータが最適化されることを狙いとした。最適化過程として様々な手法を検討したが、遺伝的アルゴリズムに基づく手法と進化戦略および深層学習を用いた手法などにおいて効果が認められた。

fcc材料への適用性を検証するため、A1145^[3]およびA6061アルミニウム合金板の仮想材料構築を行なった。例としてA1145について、Lankford値の実験値と計算値の比較を図5に、RD・TDの応力-ひずみ関係の実験値と計算値の比較を図6に示す。いずれについても計算値と実験値がよく一致しており、パラメータ学習の過程によって仮想材料モデルが実材料の二種の異方性を同時に再現できている。次に、決定された学習パラメータを用いて、多軸応力下での塑性変形解析を行なった。図7は等二軸および平面ひずみ状態における実験値とシミュレーション結果を比較したものである。未学習データである等ひずみ引張および平面ひずみ引張のいずれについても、単軸引張試験から得られるデータのみを元に学習した仮想材料モデルが、実験値と近い値を算出していることが確認できる。誤差の主因は硬化則に用いる n 乗則の形式に依存することがわかっているので、今後手法の改善を行う。また、hcp材料としてAZ31Bマグネシウム合金を用いた検討も行なっており、良好な予測結果が得られている。

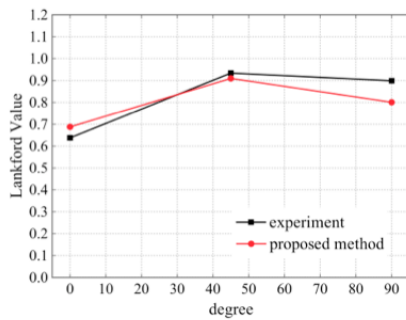


図5 Lankford 値の比較

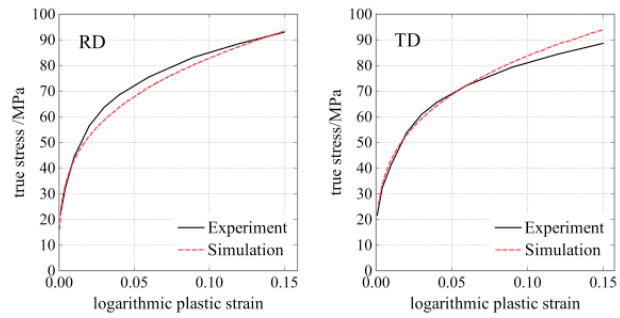


図6 学習に用いた応力ひずみ曲線 (RD および TD) の比較

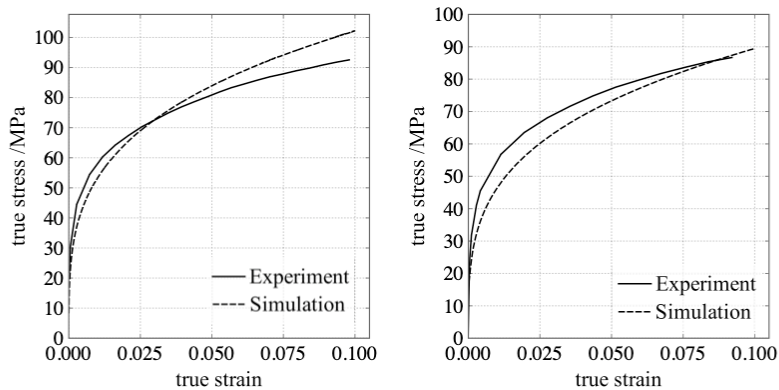


図7 応力ひずみ曲線の予測：(左)等二軸，(右)平面ひずみ

5. まとめと今後の展望

任意の 2 次負荷経路をとる材料の加工硬化を表現できるモデルを構築した。結晶塑性モデルを用いた検討により妥当な予測結果を示したので、提案モデルの有効性が確認された。今後は結晶塑性モデルに転位密度等のパラメータを導入して材料組織情報との関連付けを行うことや、成形シミュレーションにも活用できるような巨視モデルへの導入等の展開が考えられる。また、数値材料試験については、fcc 材料と hcp 材料については実験データを用いた検討により、提案手法の有効性は示されている。一方で、一部の実験的検討が不十分であったため、継続して課題に取り組む必要がある。今後は bcc 材料への適用や、学習効率の向上などの課題に取り組む。このように、当初の計画は概ね達成され、見るべき成果が得られた。さらに、検討すべき重要な課題も複数発見されており、今後進展させる必要がある。

引用文献

- [1] Takahashi H., Motohashi H., Tokuda M., Abe T.: Elastic-plastic finite element polycrystal model, *Int. J. Plast.*, 10(1), (1994) 63-80.
- [2] Haddadi, H., Bouvier, S., Banu, M., Maier, C., and Teodosiu, C.: Towards an accurate description of the anisotropic behavior of sheet metals under large plastic deformations: Modelling, numerical analysis and identification, *Int. J. Plast.*, 22, (2006) 2226-2271.
- [3] Green D. E., Neale K. W., MacEwen S. R., Perrin R.: Experimental investigation of the biaxial behaviour of an aluminum sheet, *Int. J. Plast.*, 20, (2004) 1677-1706.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 T. Oya, J. Yanagimoto, K. Ito, G. Uemura and N. Mori	4. 巻 967
2. 論文標題 Work-hardening behavior prediction model of arbitrary reloading process based on material crystallographic structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 12062
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1757-899X/967/1/012062	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 G. Vago and T. Oya	4. 巻 967
2. 論文標題 Material testing of magnesium alloy AZ31B using a finite element polycrystal method based on a rate independent crystal plasticity model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 12057
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1757-899X/967/1/012057	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 S. Onoshima and T. Oya	4. 巻 15
2. 論文標題 Numerical material testing using finite element polycrystalline model based on successive integration method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Procedia Manufacturing	6. 最初と最後の頁 1833-1840
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.promfg.2018.07.207	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 大家哲朗
2. 発表標題 有限要素多結晶モデルによる任意再負荷過程の加工硬化挙動の予測
3. 学会等名 日本鉄鋼協会第180回秋季講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大家哲朗, 西川慶
2. 発表標題 3D-DICと逆解析による大ひずみ域加工硬化曲線の推定
3. 学会等名 2019年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大家哲朗, 笠井匠, 柳本潤, 伊藤耿一, 植村元, 森尚達
2. 発表標題 材料微視的構造に基づく任意再負荷過程の加工硬化挙動予測モデル
3. 学会等名 2019年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大家哲朗, 小野島慎
2. 発表標題 逐次累積法に基づく有限要素多結晶モデルによる数値材料試験法(第4報)
3. 学会等名 2019年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大家哲朗, 柳本潤, 伊藤耿一, 植村元, 森尚達
2. 発表標題 材料微視的構造に基づく任意再負荷過程の加工硬化挙動予測モデル(第2報)
3. 学会等名 第70回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 G. Vago and T. Oya
2. 発表標題 Mechanical response of a single crystal of magnesium when undergoes a simple tension test
3. 学会等名 The 2nd Asian Pacific Symposium on Technology of Plasticity (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大家哲朗, 柳本潤, 伊藤耿一, 植村元, 森尚達
2. 発表標題 非関連流れ則と材料微視構造の変形機構に基づく塑性構成式
3. 学会等名 平成30年度塑性加工春期講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大家哲朗, 柳本潤, 伊藤耿一, 植村元, 森尚達
2. 発表標題 材料微視的構造に基づく複合異方硬化表現 -パウシンガー効果曲線と交差硬化曲線による任意硬化曲線の内挿-
3. 学会等名 第69回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小野島慎, 大家哲朗
2. 発表標題 逐次累積法に基づく有限要素多結晶モデルによる数値材料試験法 (第3報)
3. 学会等名 第69回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------