

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26420029

研究課題名（和文）ミスオリエンテーション結晶塑性有限要素法に基づくプロセスメタラジー最適化

研究課題名（英文）Optimization of process metallurgy based on crystal plasticity finite element method using misorientation theory

研究代表者

倉前 宏行 (Kuramae, Hiroyuki)

大阪工業大学・工学部・准教授

研究者番号：90298802

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：FCC金属板材の成形性向上を目的として、ミスオリエンテーション理論に基づくマルチスケール有限要素解析手法を用い板材創製過程における圧延や調質条件を設計変数（パラメータ）とする最適化計算を実施した。本研究においては、アルミニウム合金板材A6022および銅合金Cu-2.3Ni-0.65Si、Cu-8.0Sn-P板材の曲げ加工性について、異周速圧延条件および焼鈍時間の最適化を行った結果、高曲げ性かつ低スプリングバック性を兼ね備えた板材創製が可能であることが示唆された。

研究成果の概要（英文）：In this study, improvement and optimization of formability of FCC sheet metals was analyzed by multiscale finite element method based on misorientation theory. Bendability of an aluminum alloy A6022 and Copper alloys Cu-2.30Ni-0.65Si, Cu-8.0Sn-P was optimized by asymmetric rolling parameter and annealing time. The crystal texture was obtained for high-bendability and low-springback sheet metal by the optimized process parameters.

研究分野：計算力学

キーワード：結晶塑性 有限要素法 ミスオリエンテーション 結晶方位 並列計算

1. 研究開始当初の背景

金属板材をはじめとする材料の機械的特性は、その微視的な多結晶構造、特に優先方位や結晶粒径に大きく依存する。よって、微視結晶構造制御に基づく高機能材料の創製のためには、結晶集合組織形態を考慮可能な非線形マルチスケール解析手法と最適化手法の確立が必要である。

これまで代表者は、「板材料創製・成形シミュレーションのための、動的陽解法・結晶均質化弾/結晶粘塑性マルチスケール有限要素解析コードの開発」を行い、結晶塑性均質化理論とミスオリエンテーション理論に基づくマルチスケール解析コードを MPI (Message Passing Interface) 並列化することにより、SEM/EBSD (Scanning Electron Microscope / Electron Back Scatter Diffraction) 実験計測に基づく3次元結晶方位分布を導入した大規模計算を実現し、板成形時の結晶集合組織に起因する塑性異方性を再現するとともに、塑性変形誘起の結晶集合組織発展予測を可能にしてきた。これにより、結晶塑性理論における従来の古典的な Taylor モデル、Sachs モデルのような、結晶におけるひずみ一定、応力一定といった仮定を除去することができ、結晶方位のみならず、結晶配置や結晶粒径といった微視結晶形態の3次元空間情報も導入可能なマルチスケール解析手法を開発してきた。さらに、本手法をアルミニウム合金板材の温間異周速圧延問題へ適用し、板材の圧延創製時にせん断集合組織 ($\{111\}\langle 110 \rangle$, $\{111\}\langle 112 \rangle$, $\{001\}\langle 110 \rangle$) を導入することにより、このうち $\{111\}/ND$ 方位の集積によって高 r 値板材の創製が可能であることを明らかにした。さらに、EBSD 計測に基づく結晶方位の3次元空間分布より、隣接する結晶粒相互の方位差や粒界を硬化発展に積極的に考慮するため、ミスオリエンテーション理論に基づく新しい硬化発展方程式を提案し、その有効性を明らかにした。

一方、板材の創製プロセスは、熱間・冷間圧延のほか均熱・焼き鈍し・調質などの種々の熱処理を含む多数の工程により構成され、それぞれの工程において板材の微視結晶集合組織形態に大きな影響を及ぼす。すなわち、巨視的な板材料の機械的特性は、その微視結晶形態によって制御可能であるものの、機能発現のための最適化には、熱的効果も考慮した多段製造プロセスの高精度解析と最適化手法の融合が大きな技術課題となっている。

2. 研究の目的

本研究課題においては、主に自動車車体用 (ボディパネル用) アルミニウム合金、および電極用銅合金について、高強度と高成形性能を兼ね備えた新規板材創製のためのプロセスメタラジー手法を開発する。特に、板材創製過程の熱処理を含めた多段圧延行程において、アルミニウム合金の成形性向上、および銅合金の曲げ性向上とスプリングバツ

ク性低下を目標に、微視結晶形態制御を行う。このため、微視多結晶体における隣接結晶粒の方位差 (ミスオリエンテーション) 理論を組み込んだ非線形・連成マルチスケール有限要素解析手法を適用し、離散最適化手法と組み合わせることにより、板材創製プロセスにおける多数の条件パラメータ最適化を目指す。

3. 研究の方法

巨視連続体としての板材は、微視的には結晶方位分布に関して周期性を満足する代表体積要素 (Representative Volume Element; RVE) の規則的集合により構成されると仮定する。巨視連続体に対して仮想仕事率の原理式

$$\int_{\Omega} \rho \ddot{U}_i(\mathbf{x}) \delta \dot{U}_i(\mathbf{x}) d\Omega + \int_{\Omega} \nu \dot{U}_i(\mathbf{x}) \delta \dot{U}_i(\mathbf{x}) d\Omega = \int_{\Omega} \bar{f}_i \delta \dot{U}_i(\mathbf{x}) d\Omega + \int_{\Gamma_o} \bar{T}_i \delta \dot{U}_i(\mathbf{x}) d\Gamma - \int_{\Omega} \sigma_{ij}^H(\mathbf{x}) \frac{\partial \delta \dot{U}_i(\mathbf{x})}{\partial x_j} d\Omega \quad (1)$$

より有限要素式を導出する。

これを解いて求まる巨視連続体の速度勾配をスケールダウンし、これを微視結晶体の RVE の周期境界条件として規定する。RVE に対する仮想仕事率の原理式

$$\int_Y \rho \ddot{u}_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \delta \dot{u}_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}) dY + \int_Y \nu \dot{u}_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \delta \dot{u}_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}) dY = - \int_Y \sigma_{ij} \delta \dot{u}_{i,j}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) dY \quad (2)$$

について、弾/結晶粘塑性構成式

$$\dot{\gamma}^{(a)} = \dot{\gamma}_0^{(a)} \left[\frac{\tau^{(a)}}{g^{(a)}} \right] \left[\left| \frac{\tau^{(a)}}{g^{(a)}} \right| \right]^{(1/m)-1} \quad (3)$$

$$g^{(a)} = g^{(a)}(\gamma), \quad \gamma = \sum_{a=1}^N |\gamma^{(a)}| \quad (4)$$

$$\dot{g}^{(a)} = \sum_{(b)} h_{ab} |\dot{\gamma}^{(b)}| \quad (5)$$

$$h_{ab} = q_{ab} h + (1 - q_{ab}) h \delta_{ab} \quad (6)$$

$$\tau(\gamma) = \tau_0 + h_0 \{C(\gamma_0 + \gamma)\}^n \quad (7)$$

$$h(\gamma) = h_0 n C \{C(\gamma_0 + \gamma)\}^{n-1} \quad (8)$$

を適用して得られる有限要素式を解くことにより、多結晶 RVE における巨視的な塑性変形にともなう微視的な応力やひずみ分布を得る。

均質化法の手続きにもとづき、RVE 有限要素モデルの各ガウス数値積分点において得られる Cauchy 応力の分布を体積平均し、均質化応力

$$\sigma_{ij}^H = \sum_{e=1}^{N_e} \left(\sum_{G=1}^{N_G} |J_G| \sigma_{ij}^G \right) / \sum_{e=1}^{N_e} |J_e| \quad (9)$$

として巨視連続体の仮想仕事率の原理式へフィードバックする。このように、結晶均質

化法は、RVEにおける応力の平均値を均質化応力と考え、巨視連続体における応力値に割り当てることにより、多結晶体の非均質な変形および応力分布に起因する巨視連続体の塑性異方性が記述可能となり、さらに微視解析によって結晶塑性モデルにもとづく塑性変形誘起の集合組織発展を求めることができる。

主に板材の塑性加工解析を実現するため、非線形有限要素解析手法として動的陽解法を採用し、巨視連続体の有限要素モデルにおける各ガウス数値積分点に対して RVE 有限要素モデルを割り当ててマルチスケール解析を行う。この解析には多大な計算量を必要とすることから、PC クラスタを用いた領域分割法に基づく並列計算手法を導入した。

4. 研究成果

自動車ボディ用 A6022 板材の、へム曲げ加工時における曲げ割れ、形状凍結不良などの問題から高曲げ加工性・高スプリングバック特性を同時に満たす板材の開発を想定した。板材創製プロセスとして、異周速比 ν (上下ロールの周速比) を 5 条件 ($\nu=1.00, 1.25, 1.50, 1.75$ and 2.00) および焼鈍時間 T を 5 条件 ($T=0.0, 22.5, 45.0, 67.5$ and 90.0 min.) の計 25 条件を設定した。図 1 に 25 条件の集合組織発展予測結果を示す。圧延条件および焼鈍時間によって板材の集合組織が大きく変化することがわかる。

全 25 種類の集合組織を用いた結晶均質化曲げ・スプリングバック有限要素解析を行った。せん断ひずみ集中係数 $K\varepsilon_{23}$ およびスプリングバック角 $\Delta\theta$ を用いて以下に示す多目的関数 g を設定した。

$$g = C_1 K\varepsilon_{23} + C_2 \frac{\Delta\theta}{\theta} \quad C_1 = 0.6, C_2 = 41 \quad (10)$$

$$K\varepsilon_{23} = \frac{\varepsilon_{23\max}}{\bar{\varepsilon}_{23}} \quad (11)$$

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 \quad (12)$$

ここで、 $\varepsilon_{23\max}$ は、板材表面におけるせん断ひずみの最大値、 $\bar{\varepsilon}_{23}$ は板材全体におけるせん断ひずみの平均値、 θ_1 および θ_2 は、除荷前および除荷後の曲げ角、 θ は狙った曲げ角 (90°) である。以上より、数理的最適化問題を以下のように設定した。

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } g \\ & \text{Subject to } 1.00 < \nu < 2.00 \text{ and} \\ & \quad \quad \quad 0.0 \text{ min.} < T < 90.0 \text{ min.} \end{aligned}$$

図 2 に解析の結果得られた $K\varepsilon_{23}$ および $\Delta\theta$ の値より得られた 5 次応答曲面を示す。応答曲面から高曲げ加工性・高スプリングバック特性の最適加工条件 $\nu = 1.16, T = 13.5$ min. を得た。この条件は、高曲げ加工性である $\{001\}<110>$ 方位の発展と低スプリングバック特性である Cube 方位が成長しすぎないことが予測できる。よって高曲げ加工性・高スプリングバック特性の両立を可能とする条

件であるといえる。

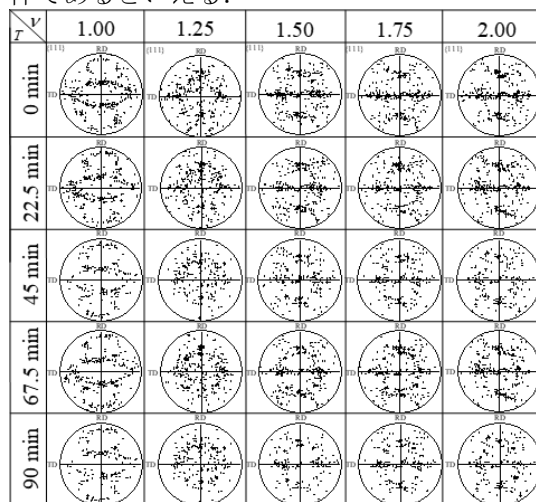


図 1 25 条件による集合組織発展結果

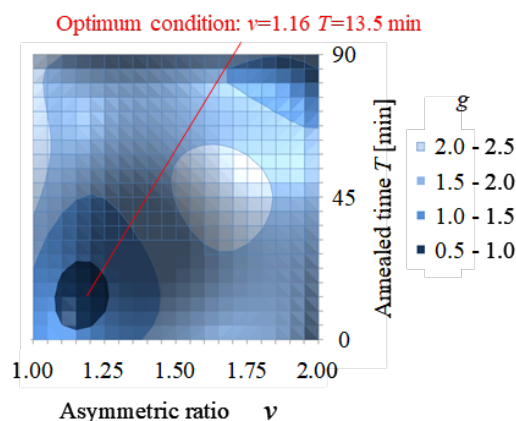


図 2 応答曲面

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 7 件)

- ① Yasutomo Uetsuji, Tetsuya Hata, Tatsuya Oka, Hiroyuki Kuramae and Kazuyoshi Tsuchiya, "Multiscale Simulation of Domain Switching Behavior in Polycrystalline Ferroelectric Materials", Computational Material Science, Vol. 106, pp. 100-110, (2015). 査読有 DOI: 10.1016/j.commatsci.2015.03.035
- ② Yasutomo Uetsuji, Tetsuya Hata, Hiroyuki Kuramae and Kazuyoshi Tsuchiya, "Homogenization Modeling of Domain Switching in Ferroelectric Materials", Acta Mechanica, Vol. 225, Issue 10, pp. 2969-2986, (2014). 査読有 DOI: 10.1007/s00707-014-1199-9
- ③ Tomosumi Kamimura, Yuta Kuroki, Takuya Kiriya, Hiroki Muraoka, Takashi Nishiyama, Yoshiyuki Harada, Hiroyuki Kuramae and Hideo Horibe, "Scanning Removal of Iron-implanted Novolak Resist by using a Laser Irradiation", Journal of

- Photopolymer Science and Technology, Vol. 27, No. 2, pp. 237-241, (2014). 査読有 DOI: 10.2494/photopolymer.27.237
- ④ Eiji Nakamachi, Takeshi Honda, Hiroyuki Kuramae, Yusuke Morita and Hideo Morimoto, "Process Metallurgy Analyses to Design a High-Bendability and High-Springback Property Sheet by Using Two-Scale Finite Element Method", *International Journal of Mechanical Sciences*, (2014). 査読有, DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.06.001
- ⑤ 倉前宏行, 仲町英治, 「塑性加工解析に必要な FEM ③結晶塑性」, 塑性と加工, 第 55 巻, 第 640 号, pp. 416-420, (2014). 査読有, DOI: 10.9773/sosei.55.416
- ⑥ 倉前宏行, 「高成形能 Al 合金板材創製のための多段圧延工程・微視結晶最適設計」, 天田財団 FORM TECH REVIEW 2013, Vol. 23, No. 1, pp. 45-50, (2014). 査読無, https://www.amada-f.or.jp/r_report/ptr/2013/2013-0202.pdf
- ⑦ Eiji Nakamachi, Takeshi Honda, Hiroyuki Kuramae, Yusuke Morita, Tomiso Ohata and Hideo Morimoto, "Two-scale Finite Element Analysis for Bendability and Springback Evaluation based on Crystallographic Homogenization Method", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 80, pp. 109-121, (2014). 査読有, DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.01.011
- [学会発表] (計 13 件)
- ① 倉前宏行, 二保知也, 楠本陸, 山田純也, 堀江知義, 「微視接触電気抵抗解析に基づく抵抗スポット溶接のマルチスケール連成シミュレーション」, 日本機械学会 第 28 回計算力学講演会, 横浜国立大学(神奈川県・横浜市), 2015 年 10 月 10 日.
- ② 楠本陸, 二保知也, 倉前宏行, 堀江知義, 「微視接触電気抵抗解析による温度・圧力・表面形状の接触電気抵抗への影響の検討」, 日本機械学会 第 28 回計算力学講演会, 横浜国立大学(神奈川県・横浜市), 2015 年 10 月 10 日.
- ③ Hiroyuki Kuramae, Riku Kusumoto, Junya Yamada, Tomoya Niho and Tomoyoshi Horie, "Multiscale Analysis of Electrical Contact Resistance for Resistance Spot Welding Simulation", 13th US National Congress on Computational Mechanics (USNCCM13), San Diego, USA, July 27, 2015.
- ④ Yu Goto, Kouhei Oyabu, Toshihiko Yamaguchi, Hiroyuki Kuramae, Yoshihiro Tomita, Yusuke Morita and Eiji Nakamachi, "Two-scale Thermomechanical Finite Element Analysis of Texture Evolution in the Rolling Process", Coupled Problems 2015, San Servolo Island, Venice, Italy, May 18, 2015.
- ⑤ 和田剛, 上辻靖智, 倉前宏行, 槌谷和義, 「マルチスケール解析による多結晶マルチフェロイック複合材料の機械的特性評価」, 日本機械学会 関西学生会平成 26 年度学生員卒業研究発表講演会, 京都大学 桂キャンパス(京都府・京都市), 2015 年 3 月 14 日.
- ⑥ 倉前宏行, 楠本陸, 二保知也, 堀江知義, 「マルチスケール接触電気抵抗解析に基づく抵抗スポット溶接シミュレーション」, 日本機械学会 第 27 回計算力学講演会, 岩手大学工学部(岩手県・盛岡市), 2014 年 11 月 23 日.
- ⑦ Tatsuya Oka, Yasutomo Uetsuji, Hiroyuki Kuramae and Kazuyoshi Tsuchiya, "Multiscale Nonlinear Analysis of Ferroelectric Materials at Morphotropic Phase Boundary", The Fourth Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures, October 12 2014, Nara, Japan.
- ⑧ Yuta Kuroki, Takuya Kiriyama, Hirokoi Muraoka, Keita Kawasaki, Takuma Murakami, Hiroyuki Kuramae, Hideo Horibe, Tomosumi Kamimura, "Mechanisms of laser resist stripping without occurring the laser damage to Si wafer", XLVI Annual Symposium on Optical Materials for High-Power Lasers (2014 Laser Damage), National Institute of Standards and Technology (NIST), Boulder, Colorado, USA, 14-17 September 2014.
- ⑨ Hiroyuki Kuramae, Tomoya Niho and Tomoyoshi Horie, "3-D Micro-FE Analysis of Electrical Contact Resistance for Resistance Spot Welding", 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI), July 21, 2014, Barcelona, Spain.
- ⑩ 倉前宏行, 「高成形能 Al 合金板材創製のための多段圧延工程・微視結晶最適設計」, 第 12 回天田財団助成研究成果発表会<日本塑性加工学会 平成 26 年度 塑性加工春季講演会に併設>, つくば国際会議場(茨城県・つくば市), 2014 年 6 月 6 日.
- ⑪ Hiroyuki Kuramae, Takeshi Honda, Hideo Morimoto, Yusuke Morita and Eiji Nakamachi, "Process Metallurgy Analyses for High Bendability and Springback Property Sheet Design by Using Multi-scale Finite Element Method", 10th International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering (ICCMSE 2014), April 4 2014, Athens, Greece.
- ⑫ Toshihiko Yamaguchi, Kohei Oyabu, Hiroyuki Kuramae, Hideo Morimoto, Yusuke Morita and Eiji Nakamachi,

"Process Metallurgy Analyses of Sheet Rolling by Multi-Scale Finite Element Method based on Thermal Elastic Crystalplasticity Theory", 10th International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering (ICCMSE 2014), April 4 2014, Athens, Greece.

- ⑬ Eiji Nakamachi, Takashi Yoshida, Hiroyuki Kuramae, Hideo Morimoto, Toshihiko Yamaguchi and Yusuke Morita, "Process Metallurgy Simulation for Metal Drawing Process Optimization by Using Two-Scale Finite Element Method", 10th International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering (ICCMSE 2014), April 4 2014, Athens, Greece.

[その他]

ホームページ等：大阪工業大学工学部ロボット工学科ロボティクスシミュレーション研究室 Web サイト

<http://www.oit.ac.jp/dim/kuramae/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

倉前 宏行 (KURAMAE, Hiroyuki)

大阪工業大学・工学部・准教授

研究者番号： 90298802