

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560106

研究課題名(和文) ミスオリエンテーション理論に基づく新規 Al 合金板材創製のためのプロセスメタラジー

研究課題名(英文) Process Metallurgy Analyses for New Al Alloy Sheet Metal Generation based on 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) 2,100,000 円、(間接経費) 630,000 円

研究成果の概要(和文)：アルミニウム合金板材の成形性向上を目的として、結晶集合組織制御のための板材創製プロセス条件最適化を行った。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開発し、微視結晶形態に起因する板材の塑性異方性と塑性変形誘起の微視集合組織発展を解析した。ランクフォード値(r値)向上と面内異方性低下を目指し、2段圧延の最適パラメータを求めた。その結果、従来のA6022-T43板材に比べr値が1.6倍向上し、面内異方性は1.78倍減少することが確認された。曲げ加工性についても、圧延条件および熱処理時間の最適化を行い、高曲げ加工性かつ低スプリングバック性の材料創製が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：In this study, to improve formability of aluminum (Al) alloy sheet metal, micro-polycrystal texture control and optimization of process conditions were performed. We develop a multi-scale finite element procedure based on misorientation theory, both plastic anisotropy of sheet metal by micro-crystal morphology and plastic deformation-induced micro-texture evolution were analyzed. In order to improve the Lankford value (r-value) with small planar anisotropy of sheet metal, parameters of 2-path rolling processes were optimized. As the results, it was confirmed that the optimum texture has 1.6 times higher r-value and 1.78 times lower planar anisotropy compared with conventional A6022-T43 sheet metal. In the bendability and springback property of Al sheet metal, parameters of asymmetric rolling ratio and heat annealing time were optimized.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：有限要素法 マルチスケール解析 プロセスメタラジー 結晶成長 アルミニウム合金 成形性 塑性加工 計算力学

1. 研究開始当初の背景

アルミニウム合金などの難加工材について、プレス成形加工の高度化を目指した材料結晶集合組織制御を行うためには、微視結晶集合組織形態に起因する塑性異方性および硬化発展特性を考慮可能な非線形マルチスケールシミュレーション手法の実用化が望まれている。アルミニウム合金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、微視結晶形態によって制御可能であるものの、その最適化のためには、熱的効果も考慮した多段プロセスの高精度解析の確立が大きな技術課題となっている。

2. 研究の目的

主に自動車車体用(ボディパネル用)薄板材について、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、アルミニウム合金などの難加工材について、成形性(主に深絞り性や曲げ加工性)の向上を目標に、板材料創製過程の熱処理を含めた多段圧延において微視結晶形態制御を行う。このため、結晶の方位差(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開発し、離散最適化手法と組み合わせた数値シミュレーションに基づく板材創製プロセスの多数のパラメータ最適化を実現する。

3. 研究の方法

本研究においては、巨視的な材料の塑性変形と微視的な多結晶構造との連成問題について、均質化法にもとづく2スケールのマルチスケール有限要素解析を行った。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。

巨視連続体ならびにRVEに対してそれぞれ仮想仕事率の原理式から有限要素運動方程式を導出し、RVEに対する微視解析には弾/結晶粘塑性構成式を適用して多結晶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応力分布を体積平均し、均質化応力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を記述可能となり、さらに微視解析によって結晶塑

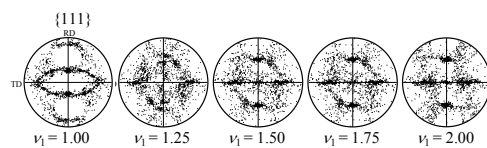
性モデルにもとづく塑性変形誘起の集合組織発展を求めることができる。

4. 研究成果

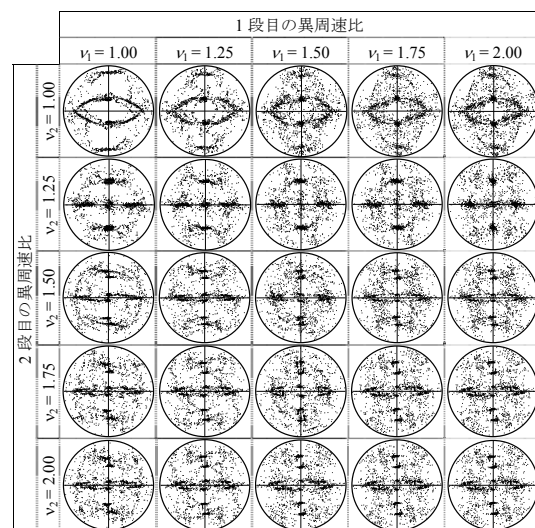
(1) 高r値板材創製のための多段異周速圧延プロセス最適化

2段圧延を想定し、いずれも圧延温度は250℃、圧下率を50%として、初期板材を1.5mmまで異周速圧延する。巨視連続体の有限要素モデルは、1段目圧延の終了後にリメッシングを行い、2段目の解析を引き続き行った。RVE有限要素モデルを用いたマイクロ解析は、1段目の圧延解析によって得られた板中心層における結晶方位分布を2段目の初期方位分布として与えて実施した。

1段目、2段目の異周速比 $v_1$ 、 $v_2$ をそれぞれ1.00~2.00まで変化させたときの2段圧延後の結晶方位分布を図1に示す。同図(a)には1段目圧延後の結晶方位分布、すなわち2段目圧延に対する初期方位分布を示した。同図(b)において $v_1=v_2=1.00$ の場合は、2段とも等周速圧延に相当し、典型的な圧延集合組織(Copper方位 $\{112\}\langle 111 \rangle$ 、Brass方位 $\{110\}\langle 112 \rangle$ 、S方位 $\{123\}\langle 634 \rangle$ )が確認される。1段目の異周速圧延において、異周速比 $v_1$ が大きくなると $\langle 111 \rangle$ /ND集合組織への集積が多くなるものの、2段目の異周速圧延によりその残存性は大きく変化している。



(a) 1段圧延後の結晶方位分布



(b) 2段圧延後の結晶方位分布

図1 2段異周速圧延による集合組織の変化

2段圧延後の板材について、ランクフォード値(r値)に基づく成形性評価を行った。r値は、単軸引張り問題のマルチスケール解析を行い板幅ひずみと板厚ひずみとの比により算出した。次の関数を定義することにより、

最大 $\bar{r}$ , 最小 $|\Delta r|$ を同時に満足する多目的最適化(最小化)問題の定式化を行った。

$$g = C_1(2.0 - \bar{r}) + C_2|\Delta r|, \quad C_1 = 1.0, C_2 = 2.0 \quad (1)$$

その結果, 多目的関数 $g$ を最小にする条件として, 図2に示すように, 異周速比 $v_1 = 1.25$ ,  $v_2 = 1.65$ を見いだした。

多段圧延の最適パラメータの妥当性を確認するため, 最適異周速比によって得られる集合組織を用いて $r$ 値を評価した結果, 従来の通常圧延材 A6022-T43 の $\bar{r} = 0.68$ ,  $|\Delta r| = 0.94$ に対して, 最適材では $\bar{r} = 1.10$ ,  $|\Delta r| = 0.38$ と平均 $r$ 値は1.6倍向上し, 面内異方性は1.78倍以上低下させることが確認された。

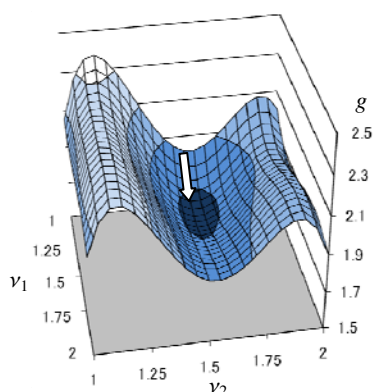


図2 応答局面法による最適条件の導出

(2) 曲げ加工性・スプリングバック特性向上のための異周速圧延および熱処理プロセス最適化

1段目の異周速圧延後のA6022板材(板厚3mm)に対して焼鈍処理を行うことを想定し, Johnson-Mehl-Avramiの式を用いて焼鈍により成長するCube方位{001}<100>の体積集積割合を求めた。本研究においては, 異周速比 $v_1 = 1.75$ による1段目の異周速圧延終了後の板厚3mmの板材について, 焼鈍時間を0, 45, 90, 180 min.の4条件を設定してそれぞれ熱処理を施し, 各試料に対してSEM-EBSD計測を行うことにより, 焼鈍時間に対するCube方位の体積集積割合を測定した。

1段目の異周速圧延における異周速比 $v$ を1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00とし, さらにその後の焼鈍時間 $T$ を0.0, 22.5, 45.0, 67.5, 90.0min.と設定し, 図3に示す計25種の微視結晶集合組織を得た。同図中, 1行目の $T = 0.0$ min.に対応する集合組織は異周速圧延後のものに対応し, それ以外の $T > 0$ min.については, Johnson-Mehl-Avramiの式による同定結果に基づき, 圧延後の集合組織においてCube方位に近いものからCube方位に方位回転したものとして集合組織を生成した。これら計25種の集合組織についてV曲げ解析を行い, 曲げ加工性(せん断ひずみ集中係数), およびスプリングバック特性(スプリングバック角)を評価する。

せん断ひずみ集中係数 $K_{\epsilon 23}$ およびスプリ

ングバック角 $\Delta\theta$ の双方を最小化するため, 多目的関数 $g$ を以下のように定義した。

$$g = C_1 K_{\epsilon 23} + C_2 \frac{\Delta\theta}{\theta}, \quad C_1 = 0.6, C_2 = 41 \quad (2)$$

ここで,  $\theta$ はV曲げ角度 $90^\circ$ である。

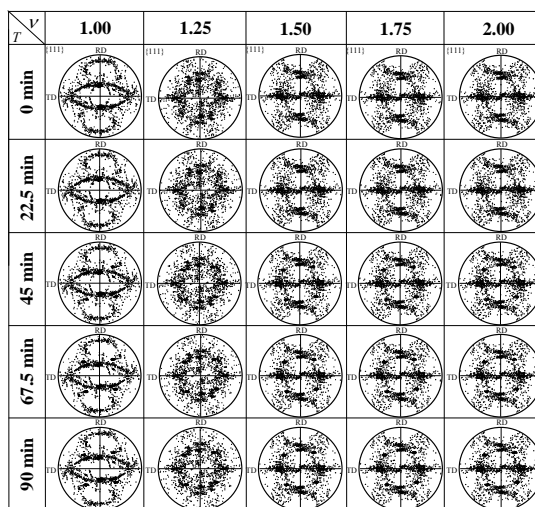


図3 異周速比 $v$ と焼鈍時間 $T$ による集合組織変化

図4に異周速比 $v$ と焼鈍時間 $T$ による多目的関数 $g$ の変化の様子を5次の応答曲面により示す。これより, せん断ひずみ集中係数 $K_{\epsilon 23}$ とスプリングバック角 $\Delta\theta$ の両方が最小となる最適プロセス条件として,  $v = 1.16$ ,  $T = 13.5$  min.を得た。

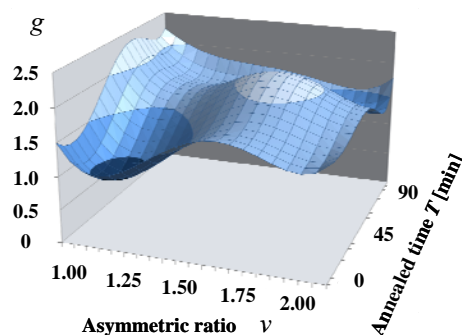


図4 応答曲面法による異周速比 $v$ と焼鈍時間 $T$ の最適化

結晶均質化マルチスケール有限要素法と応答曲面法に基づく分散最適化手法を用い, アルミニウム合金A6022の成形性向上を目的としたプロセス最適化を行った。その結果, 2段異周速圧延を想定した解析において, 最適な異周速比 $v_1 = 1.25$ ,  $v_2 = 1.65$ を見いだした。これにより従来の通常圧延材と比較して, 平均 $r$ 値は1.6倍向上し, 面内異方性を1.78倍以上低下させること可能であることを示した。さらに曲げ性, スプリングバック特性向上を目指した異周速圧延と熱処理パラメータ最適化においては, 異周速比 $v = 1.16$ , 焼鈍時間 $T = 13.5$  min.を得た。以上により, 本手法は高成形性材料の創製に利用可能なプロセ

スメタラジー手法として有用であると考え  
る。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 14 件)

- ① 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). 掲載決定・印刷中, 査読有, DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.06.001
- ② 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
- ③ 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](https://www.amada-f.or.jp/r_report/ptr/2013/2013-0202.pdf)
- ④ 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
- ⑤ 森本秀夫, 坂本英俊, 倉前宏行, 仲町英治, 「結晶塑性有限要素解析手法とその適用事例」, 塑性と加工, 第 54 巻, 第 625 号, pp. 132-136, (2013). 査読有, DOI: 10.9773/sosei.54.132
- ⑥ 倉前宏行, 上辻靖智, 「3 次元 EBSD 計測モデルに基づく結晶均質化有限要素解析による圧電セラミックス材料の特性評価」, 日本機械学会論文集(A 編), 79 巻 801 号, pp. 633-643, (2013). 査読有, DOI: 10.1299/kikaia.79.633
- ⑦ Eiji Nakamachi, Yasutomo Uetsuji, Hiroyuki Kuramae, Kazuyoshi Tsuchiya and Hwisim Hwang, "Process Crystallographic Simulation for Biocompatible Piezoelectric Material Design and Generation", *Archives of Computational Methods in Engineering*, Vol. 20, Issue 2, pp. 155-183, (2013). 査読有, DOI: 10.1007/s11831-013-9084-6
- ⑧ Yasutomo Uetsuji, Hiroyuki Kuramae, Kazuyoshi Tsuchiya and Marc Kamlah, "Electron Backscatter Diffraction Crystal Morphology Analysis and Multiscale Simulation of Piezoelectric Materials", *International Journal of Computational*

*Methods and Experimental Measurements*, Vol. 1, No. 2, pp. 199-211, (2013). 査読有, DOI: 10.2495/CMEM-V1-N2-1-14

- ⑨ Yasutomo Uetsuji, Shusuke Kimura, Hiroyuki Kuramae, Kazuyoshi Tsuchiya and Marc Kamlah, "Multiscale Finite Element Simulations of Piezoelectric Materials based on Two- and Three-Dimensional EBSD-measured Microstructures", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 23, pp. 563-573, (2012). 査読有, DOI: 10.1177/1045389X12436740
- ⑩ 仲町英治, 倉前宏行, 「マルチスケール有限要素法による板圧延プロセスメタラジー解析」, 軽金属, 第 62 巻, 第 1 号, pp. 25-31, (2012). 査読有, DOI: 10.2464/jilm.62.25
- ⑪ Hidetoshi Sakamoto, Yoshifumi Ohbuchi, Hiroyuki Kuramae and Jian Shi, "Deep Drawing Formability Analysis of AZ3 Mg-alloy", *Advanced Materials Research*, Vol. 337, pp. 701-704, (2011). 査読有, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.337.701
- ⑫ 倉前宏行, 池谷友規, 森本秀夫, 坂本英俊, 片山傳生, 仲町英治, 「結晶方位差理論に基づく結晶塑性構成式の提案」, 日本機械学会論文集(A 編), 77 巻 779 号, pp. 1081-1090, (2011). 査読有, DOI: 10.1299/kikaia.77.1081
- ⑬ Hiroyuki Kuramae, Hidetoshi Sakamoto, Hideo Morimoto and Eiji Nakamachi, "Process Metallurgy Design for High-Formability Aluminum Alloy Sheet Metal Generation by Using Two-Scale FEM", *Procedia Engineering*, Vol. 10, pp. 2250-2255, (2011). 査読有, DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.372
- ⑭ Yasutomo Uetsuji, Hiroyuki Kuramae, Kazuyoshi Tsuchiya and Marc Kamlah, "A Multiscale Finite Element Simulation of Piezoelectric Materials Using Realistic Crystal Morphology", *WIT Transactions on Modeling and Simulation*, Vol. 51, pp. 601-611, (2011). 査読有, DOI: 10.2495/CMEM110531

〔学会発表〕(計 22 件)

- ① 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.
- ② 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.
- ③ 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.
- ④ 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.
- ⑤ 倉前宏行, 石川翔太, 二保知也, 堀江知義, 「抵抗スポット溶接のための3次元マイクロ接触電気抵抗解析」, 日本機械学会 第26回計算力学講演会, 佐賀大学 (佐賀市), 2013年11月4日.
- ⑥ 倉前宏行, 上辻靖智, 「多結晶圧電セラミックスの3次元EBSD計測代表体積要素サイズの同定」, 日本機械学会 第26回計算力学講演会, 佐賀大学 (佐賀市), 2013年11月4日.
- ⑦ 本田武志, 倉前宏行, 大畑富相, 森本秀夫, 森田有亮, 仲町英治, 「曲げ加工性・スプリングバック特性最適化のためのマルチスケール・プロセスメタラジー解析手法の開発」, 日本機械学会 第26回計算力学講演会, 佐賀大学 (佐賀市), 2013年11月2日.
- ⑧ Takashi Yoshida, Hiroyuki Kuramae, Hideo Morimoto, Toshio Yamaguchi, Tomiso Ohata, Eiji Nakamachi, "Crystal texture evolution analyses in metal drawing processes by using two-scale finite element method", XII International Conference on Computational Plasticity (COMPLAS XII), September 5, 2013, Barcelona, Spain.
- ⑨ Kohei Ohyabu, Takeshi Honda, Hiroyuki Kuramae, Hideo Morimoto, Hidetoshi Sakamoto, Yusuke Morita, Eiji Nakamachi, "Process metallurgy analyses of sheet rolling by thermal elastic plastic multi-scale finite element method", XII International Conference on Computational Plasticity (COMPLAS XII), September 4, 2013, Barcelona, Spain.
- ⑩ Takeshi Honda, Hiroyuki Kuramae, Hideo Morimoto, Yusuke Morita, Yasunori Nakamura, Tomiso Ohata, Eiji Nakamachi, "Bending and springback prediction method based on multi-scale finite element analyses for high bendability and low springback sheet generation", XII International Conference on Computational Plasticity (COMPLAS XII), September 4, 2013, Barcelona, Spain.
- ⑪ Eiji Nakamachi, Takeshi Honda, Hiroyuki Kuramae, Hidetoshi Sakamoto and Hideo Morimoto, "Process Metallurgy Design of High Formability Sheet Metal by Using Two-Scale Finite Element Analysis and Optimization Algorithm", International Conference on Material Processing Technology 2013, June 27-28, 2013, Bangkok, Thailand.
- ⑫ Hiroyuki Kuramae, Hidetoshi Sakamoto and Yasutomo Uetsuji, "Multiscale Analysis of Piezoelectric Material by using EBSD-Measured Realistic Model", V International Conference on Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering (COUPLED PROBLEM 2013), June 19, 2013, Ibiza, Spain.
- ⑬ 大藪皓平, 本田武志, 倉前宏行, 仲町英治, 森田有亮, 「熱弾塑性マルチスケール有限要素法による圧延プロセスメタラジー解析」, 日本機械学会 関西学生会平成24年度学生員卒業研究発表講演会, 大阪工業大学 大宮キャンパス (大阪市旭区), 2013年3月15日.
- ⑭ 本田武志, 倉前宏行, 大畑富相, 森本秀夫, 森田有亮, 「マルチスケール有限要素解析による集合組織が曲げ加工性に及ぼす影響の評価」, 日本機械学会 第25回計算力学講演会, 神戸ポートアイランド南地区 (神戸市), 2012年10月7日.
- ⑮ Hiroyuki Kuramae, Hidetoshi Sakamoto and Yasutomo Uetsuji, "3D-RVE modeling and multiscale analysis of polycrystal piezoelectric material based on EBSD measurement", 6th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2012), September 13, 2012, Vienna, Austria.
- ⑯ Hiroyuki Kuramae, Hideo Morimoto and Eiji Nakamachi, "Crystal Plasticity Constitutive Equation Based on Misorientation Theory", 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM X), July 10, 2012, Sao Paulo, Brazil.
- ⑰ Takeshi Honda, Hiroyuki Kuramae, Hideo Morimoto, Tomiso Ohata and Tsutao Katayama, "Bentability Evaluation of Copper Alloy Sheet Metal by Multi-scale Finite Element Analyses", 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM X), July 10, 2012, Sao Paulo,

Brazil.

- ⑱ Hidetoshi Sakamoto, Hiroyuki Kuramae, Yasunori Nakamura, Hideo Morimoto and Eiji Nakamachi, "Numerical Verification of Asymmetric Rolling Formability by a Crystal Plasticity Multi-scale Finite Element Analysis Based on the Crystallographic Homogenization Method", 10th World Congress on Computational Mechanics (WCCM X), July 10, 2012, Sao Paulo, Brazil.
- ⑲ 本田武志, 倉前宏行, 森本秀夫, 森田有亮, 仲町英治, 「マルチスケール有限要素解析による銅合金板材の曲げ加工性評価」, 日本機械学会 関西学生会平成 23 年度学生員卒業研究発表講演会, 関西大学 (大阪府吹田市), 2012 年 3 月 15 日.
- ⑳ 倉前宏行, 本田武志, 坂本英俊, 森本秀夫, 仲町英治, 「ミスオリエンテーション理論に基づく結晶塑性マルチスケール有限要素解析」, 日本機械学会 第 24 回計算力学講演会, 岡山大学津島キャンパス (岡山市), 2011 年 10 月 9 日.
- ㉑ Hiroyuki Kuramae, Yasunori Nakamura, Hidetoshi Sakamoto, Hideo Morimoto and Eiji Nakamachi, "A New Crystal Plasticity Constitutive Equation Based on Crystallographic Misorientation Theory", XI International Conference on Computational Plasticity (COMPLAS XI), September 7-9, 2011, Barcelona, Spain.
- ㉒ 倉前宏行, 森本秀夫, 仲町英治, 「結晶方位差理論に基づく結晶塑性構成式を用いたマルチスケール解析」, 日本計算工学会 第 16 回計算工学講演会, 東京大学柏キャンパス総合研究棟 (千葉県柏市), 2011 年 5 月 25 日.

[その他]

ホームページ等：大阪工業大学工学部計算工学研究室 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