

機関番号：34406

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760088

研究課題名(和文) 熱・結晶塑性マルチスケール連成解析による  
最適多段圧延プロセスメタラジー研究課題名(英文) Optimization of multi-stage rolling process metallurgy by  
thermal-crystal plasticity multi-scale coupling analysis

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

研究成果の概要(和文)：

自動車車体用アルミニウム合金板材について、結晶均質化・熱・弾/結晶粘塑性マルチスケール解析法に基づく高成形能の材料創製のためのプロセスメタラジー手法を開発した。温間異周速圧延による集合組織発展の解析を行うことにより、 $\langle 111 \rangle // ND$  方位への集積を目的とした多段圧延プロセス最適化(多目的離散最適化)を行った結果、従来材料に比べ1.6倍を超えるランクフォード値(r値)を得ることがわかった。

研究成果の概要(英文)：

In this study, the asymmetric rolling process was applied to aluminum alloy sheet metal generation, because the  $\langle 111 \rangle // ND$  texture acts the high-formability. Microscopic texture evolution during macroscopic plastic deformation in multi-stage warm rolling processes of the aluminum alloy sheet and was analyzed and optimized by using crystallographic homogenized thermal-elasto/viscoplastic multi-scale finite element method. It was confirmed that 1.6 times higher Lankford value of the optimized sheet improved by 2-stage asymmetric rolling process compared with the commercial A6022-T43 sheet metal.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,500,000	450,000	1,950,000

研究分野：計算力学

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：材料設計・プロセス・物性・評価

## 1. 研究開始当初の背景

自動車車体用高成形能アルミニウム板材の開発を目指し、板材の微視結晶集合組織を制御する圧延プロセスの開発が進められている。アルミニウム板材においては、上下ロールの周速度が異なる異周速圧延により板材にせん断集合組織( $\{111\}\langle 110 \rangle$ ,  $\{111\}\langle 112 \rangle$ ,  $\{001\}\langle 110 \rangle$ )を導入し、このうち結晶の $\{111\}$

面が板面内に沿う $\{111\}$ 結晶方位( $\langle 111 \rangle // ND$ )の集積により、ランクフォード値(r値)が向上することが知られている。

これまで著者らは、動的陽解法・結晶均質化弾/結晶塑性有限要素法に基づくマルチスケール解析法を開発し、金属板材料の微視結晶形態に起因する板材の巨視的な塑性異方性と、塑性変形誘起の結晶方位回転(変形集

合組織の形成)を予測可能な数値シミュレーション手法を確立してきた。

そこで本研究においては、動的陽解法・結晶均質化弾/結晶塑性有限要素法に基づくマルチスケール異周速圧延解析と離散最適化手法とを組み合わせることにより、アルミニウム合金 A6022 の  $r$  値向上のための最適圧延プロセス条件の導出を行った。

## 2. 研究の目的

圧延プロセスを支配する条件には、圧下率、異周速比のほか、圧延温度、ロール摩擦、多段パス工程など多数あり、さらに圧延後の調質のための熱処理によっても板材の集合組織は大きく変化する。本研究では、A6022 板材のマルチスケール異周速圧延解析により、圧延温度、ロール摩擦、および多段パス工程の圧延塑性変形にともなう集合組織発展への影響を検討する。さらに、多段圧延工程を想定し、多段工程の多目的プロセス最適化をはかる。

## 3. 研究の方法

### (1) 結晶均質化マルチスケール有限要素法の概要

巨視連続体としての板材は、Fig. 1 に示すように、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) により構成されると仮定する。巨視連続体ならびに微視結晶体に対してそれぞれ仮想仕事率の原理式より有限要素法を導出し、巨視連続体における速度勾配をスケールダウンすることで RVE の周期境界条件を規定する。以上の解析プロセスにより、板材の塑性変形に伴う多結晶体の非均質な変形および応力を求めることができ、さらに微視結晶体における塑性変形誘起の集合組織発展を記述することができる。

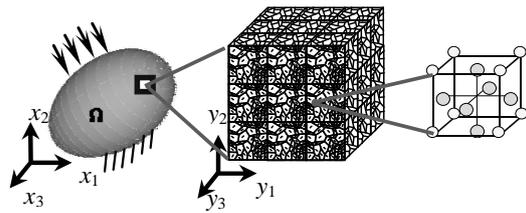


Fig. 1 Macro-continuum and micro-polycrystal structure for two-scale finite element analysis.

### (2) 構成式と材料パラメータ同定

本研究では、熱間等周速圧延された厚さ 6mm のアルミニウム合金 A6022 を初期板材として採用した。巨視連続体に対しては圧延温度  $\theta$  を考慮した Norton 則を採用し、Fig. 2 に示すように、初期板材の室温および 250°C における単軸引張試験により得られた応力-ひずみ関係に基づいて、次のように材料特性パラメータを同定した。

$$\sigma = F(\theta) \cdot \varepsilon^n \cdot \dot{\varepsilon}^m$$

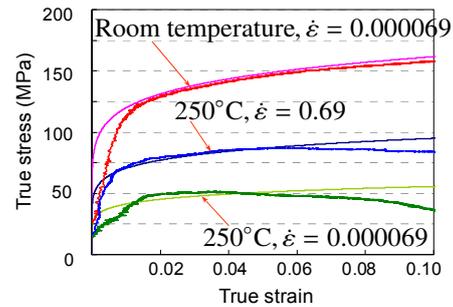
$$= \begin{cases} 373\varepsilon^{0.13} \dot{\varepsilon}^{0.058} & : \text{Room temperature} \\ 119\varepsilon^{0.084} \dot{\varepsilon}^{0.058} & : 250^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1)$$

微視結晶体に対しては、せん断ひずみ速度依存型の弾/結晶粘塑性構成式を採用した。硬化発展式を以下に示す。

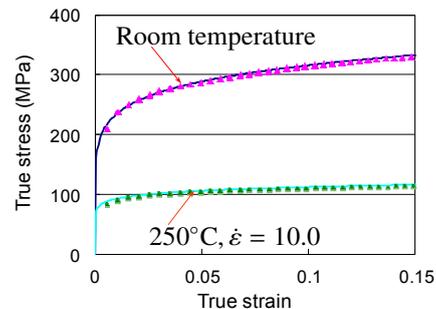
$$\tau(\gamma) = \tau_0 + h_0 \{C(\gamma_0 + \gamma)\}^n \quad (2)$$

$$h(\gamma) = \frac{d\tau(\gamma)}{d\gamma} = h_0 n C \{C(\gamma_0 + \gamma)\}^{n-1} \quad (3)$$

ここで、 $\tau_0$  は臨界分解せん断応力、 $h_0$  は初期硬化係数、 $C$  は硬化係数、 $n$  は硬化指数である。Table 1 に室温および 250°C における材料特性パラメータの同定結果を示す。有限要素は 8 節点アイソパラメトリック選択低減積分要素を採用した。RVE は 3×3×3 要素に分割し、要素内のガウス数値積分点 (計 216 点) に初期板材の SEM-EBSD (scanning electron microscope, electron backscatter diffraction) 計測に基づく 3 次元結晶方位分布を導入した。



(a) macroscopic Norton's law



(b) crystal plasticity

Fig. 2 Stress-strain curves of the initial A6022 6mm sheet metal for parameters identification.

Table 1 Crystal plasticity parameters of  $n$ th power equation for micro analysis.

	$\tau_0$ [MPa]	$h_0$ [MPa]	$n$	$C$	$\gamma_0$ [MPa]
Room temperature	67.3	28.7	0.26	6.0	0.044
250°C	26.9	6.5	0.26	6.0	0.044

#### 4. 研究成果

##### (1) 圧延温度の影響

厚さ 6mm の初期板材を異周速比 2.0, 圧下率 50%, 圧延温度 250°C で 3mm まで異周速圧延するときの概要を Fig. 3 に示す. このとき板材には Fig. 4 に示すように, 板厚内部までせん断変形が導入できることがわかる.

圧延温度を 250°C および室温に設定した場合の板材中央層のひずみ経路を比較して Fig. 5 に示す. これより, 圧延温度によらず圧延初期段階では圧縮変形が生じ, その後, 上下ロールの周速差によりせん断ひずみが導入されていることがわかる. このとき, Fig. 6 (a) に示す初期板材の結晶方位分布は, 圧延後, 同図(b), (c)に示すように変化した. 圧延温度によらず板材のひずみ経路はほぼ同様であるものの, 集合組織発展には大きな差が生じることがわかる. これは, 微視結晶体に対する硬化発展パラメータの差によるものと考えられる. 圧延後の結晶方位分布 Fig. 6 (b), (c)を RVE に与え, 単軸引張荷重を与えるマルチスケール解析を実施し, 平均ランクフォード値 (r 値) を算出した結果, 室温は 0.40 に対し 250°C では 0.55 となり, 250°C の温間圧延が効果的であることを確認した.

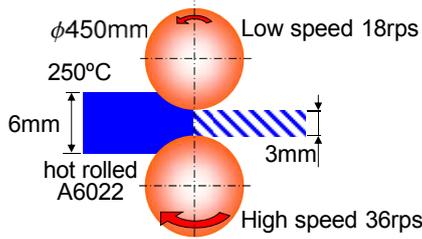


Fig. 3 Schematic diagram of asymmetric rolling process.

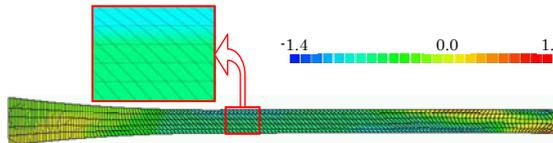


Fig. 4 Shear strain distribution on asymmetrically rolled sheet metal.

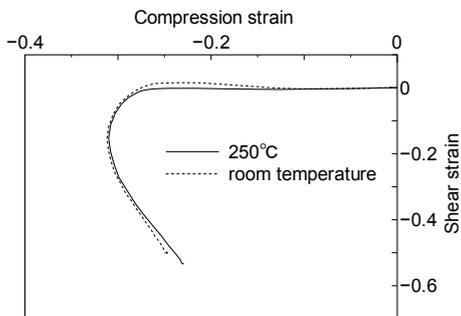


Fig. 5 Strain paths of asymmetric rolling deformation at center layer of sheet metal.

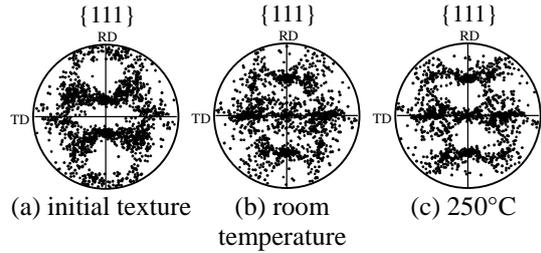


Fig. 6 Crystal orientation distribution on {111} pole figure before and after deformations.

##### (2) ロール摩擦の影響

圧延温度 250°C において, 上下ロールと板材との摩擦係数  $\mu$  を変化させると, Fig. 7 に示すように, ひずみ経路に大きな差が生じた. 摩擦係数が 0.5 以上において, 十分なせん断ひずみを導入され, Fig. 8 に示すように {111} 集合組織が十分発展した.

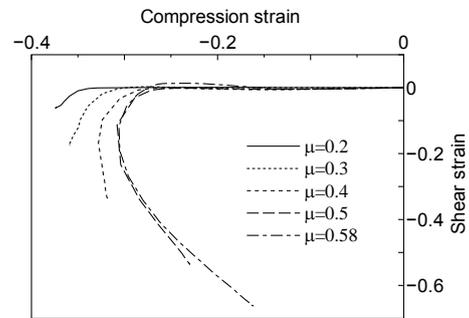


Fig. 7 Comparison of strain paths at center layer of sheet metal among various friction coefficient  $\mu$  between roll and sheet metal.

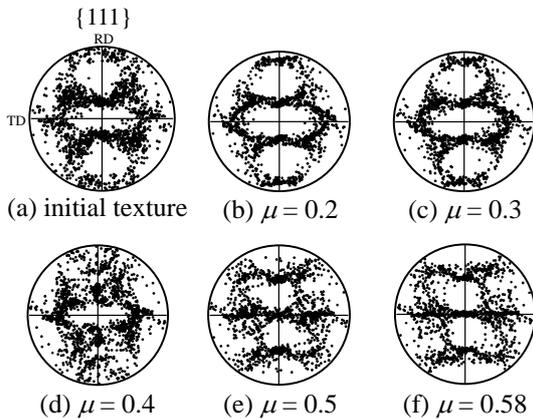


Fig. 8 Comparison of texture evolutions at center layer of sheet metal on {111} pole figures among various friction coefficient  $\mu$  between roll and sheet metal.

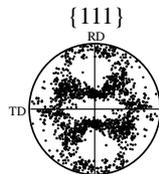
##### (3) 多段異周速圧延プロセスによる集合組織発展

2 段圧延を想定し, いずれも圧延温度は 250°C, 圧下率を 50% として, 初期板材を 1.5mm まで 2 段異周速圧延の解析を行った.

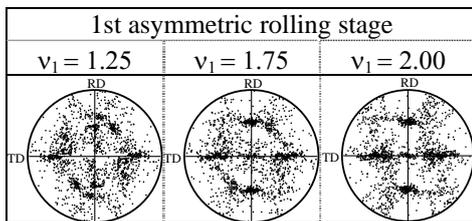
解析は、1 段目の圧延解析によって得られた板中心層における結晶方位分布を 2 段目の初期方位分布として与えた。ロール摩擦は、1 段目、2 段目ともを 0.5 とした。1、2 段目の異周速比  $v_1$ 、 $v_2$  をそれぞれ 1.00~2.00 まで変化させたときの 2 段圧延後の結晶方位分布を Fig. 9 に示す。実際には、 $v_1$ 、 $v_2$  についてそれぞれ 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00 の計 25 ケースについて解析を実施したが、ここでは紙面の都合によりそのうちの 9 ケースのみを示す。得られた結晶方位分布について、結晶方位分布関数

$$f(\varphi_1, \Phi, \varphi_2) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l \sum_{n=-l}^l C_l^{mn} T_l^{mn}(\varphi_1, \Phi, \varphi_2) \quad (4)$$

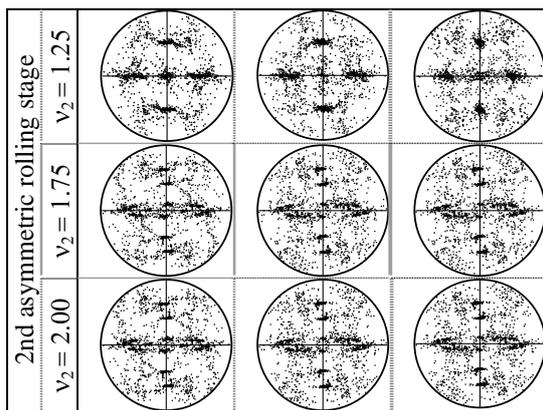
により  $\{111\}\langle 110\rangle$  および  $\{111\}\langle 112\rangle$  方位への集積密度を求めた結果、1 段目の異周速比は小さく設定するほうが  $\langle 111\rangle//ND$  方位への集積が増加することがわかった。



(a) Initial texture

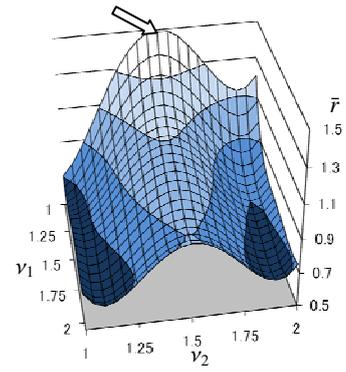


(b) after 1st stage asymmetric rolling



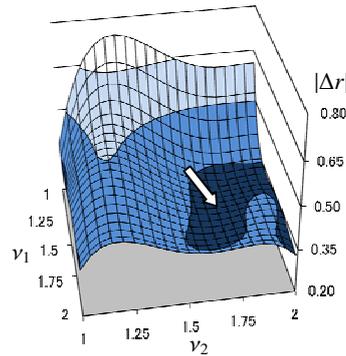
(c) after 2-stage asymmetric rolling

Fig. 9 Comparison of texture evolutions at center layer of sheet metal on  $\{111\}$  pole figures by 2-stage asymmetric rolling process which were generated by the combinations of asymmetric speed ratio  $v_1$  and  $v_2$ .



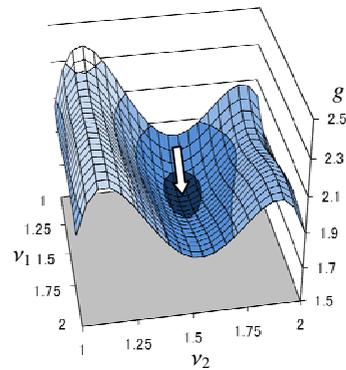
$v_1 = 1.0, v_2 = 1.5, \bar{r}_{\max} = 1.51, |\Delta r| = 0.73$

(a) the maximum  $\bar{r}$



$v_1 = 1.45, v_2 = 1.75, \bar{r} = 0.82, |\Delta r_{\max}| = 0.33$

(b) the minimum  $|\Delta r|$



$v_1 = 1.25, v_2 = 1.65, \bar{r} = 1.10, |\Delta r| = 0.38$

(c) the minimum multi-objective function  $g$

Fig. 10 Response surfaces to find the optimum condition in the coordinates of the 1st stage asymmetric ratio  $v_1$  and the 2nd stage asymmetric ratio  $v_2$

(4) 成形性評価に基づく多段異周速圧延パラメータ最適化

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  $\varepsilon_w$  と板厚ひずみ  $\varepsilon_t$  との比に

より算出した。次式により、平均  $r$  値  $\bar{r}$  とその偏差（面内異方性） $\Delta r$  について評価した。

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}, \quad (5)$$

$$\Delta r = \frac{r_0 + r_{90}}{2} - r_{45} \quad (6)$$

ここで、 $r_0, r_{45}, r_{90}$  はそれぞれ圧延方向(RD)から  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  方向に板材を切り出したときの  $r$  値である。

1 段目、2 段目の異周速比  $v_1, v_2$  を設計変数とし、圧延後の板材の平均  $r$  値  $\bar{r}$  および偏差の絶対値  $|\Delta r|$  を目的関数とする応答局面を Fig. 10 (a) および (b) に示す。高成形能板材においては、平均  $r$  値  $\bar{r}$  は高く、その偏差（面内異方性） $|\Delta r|$  は小さい板材が望ましいが、同図に示すように、最大  $\bar{r}$ 、最小  $|\Delta r|$  となる異周速比は異なることがわかった。

そこで、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。

$$g = C_1(2.0 - \bar{r}) + C_2|\Delta r| \quad (7)$$

その結果、多目的関数  $g$  を最小にする条件として、Fig. 10 (c) 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  $v_1 = 1.25, v_2 = 1.65$  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。以上により、本研究の有効性が確認されたと考える。

## 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 Yuki Ikeya, Hiroyuki Kuramae, Hideo Morimoto, Hidetoshi Sakamoto, Tsutao Katayama and Eiji Nakamachi, “Development of New Hardening Evolution Equation based on Crystallographic Misorientation Theory for Multi-scale Finite Element Analysis”, Proc. of 2nd International Conference on Computer Technology and Development, 査読有, pp. 121-125, (2010).
- ② Hiroyuki Kuramae, Yuki Ikeya, Hidetoshi Sakamoto, Hideo Morimoto and Eiji Nakamachi, “Multi-Scale Parallel Finite Element Analyses of LDH Sheet Formability Tests Based on Crystallographic

Homogenization Method”, International Journal of Mechanical Sciences, 査読有, Vol. 52-2, pp. 183-197, (2010).

- ③ Eiji Nakamachi, Hiroyuki Kuramae, Hidetoshi Sakamoto and Hideo Morimoto, “Process Metallurgy Design of Aluminum Alloy Sheet Rolling by Using Two-Scale Finite Element Analysis and Optimization Algorithm”, International Journal of Mechanical Sciences, 査読有, Vol. 52-2, pp. 146-157, (2010).
- ④ Hiroyuki Kuramae, Hidetoshi Sakamoto, Yasunori Nakamura, Hideo Morimoto and Eiji Nakamachi, “Microstructure Design for High Formability Aluminum Alloy Sheet Metal Based on Crystallographic Homogenized Multi-Scale Analysis”, Computational Plasticity X, E. Onate, D.R.J. Owen and B.Suarez eds. CIMNE Barcelona, 査読有, (2009). (CD-ROM).
- ⑤ Yuki Ikeya, Hiroyuki Kuramae, Hideo Morimoto, Hidetoshi Sakamoto, Eiji Nakamachi and Tsutao Katayama, “Multi-Scale Finite Element Analysis of LDH Tests Based on Crystallographic Homogenization Method”, Computational Plasticity X, E. Onate, D.R.J. Owen and B.Suarez eds. CIMNE Barcelona, 査読有, (2009). (CD-ROM).
- ⑥ Hidetoshi Sakamoto, Hiroyuki Kuramae, Eiji Nakamachi and Hideo Morimoto, “Multi-scale FE Analyses of Sheet Formability based on SEM-EBSD Crystal Texture Measurement”, WIT Transactions on Modeling and Simulation, 査読有, Vol. 48, pp. 61-69, (2009).
- ⑦ 倉前宏行, 高橋聖治, 仲町英治, Nguyen Ngoc Tam, 田中和人, 片山傳生, 森本秀夫, 「結晶塑性マルチスケール解析による異周速圧延プロセス設計」, 塑性と加工, 査読有, Vol. 50, No. 578, pp. 242-248, (2009).

〔学会発表〕（計 15 件）

- ① 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.
- ② 鄒榕, 大畑富相, 中村康範, 倉前宏行, 森本秀夫, 仲町英治, 「マルチスケール有限要素法を用いたアルミ板材の異周速 2 段圧延における最適圧延条件の探索」, 日本機械学会関西支部第 86 期定時総会講演会, 京都工芸繊維大学(京都市), 2011 年 3 月 20 日.

- ③ 池谷友規, 倉前宏行, 森本秀夫, 坂本英俊, 片山傳生, 仲町英治, 「マルチスケール有限要素解析のための結晶方位差理論に基づく新硬化発展式の開発」, 日本塑性加工学会 第 61 回塑性加工連合講演会, 山形大学工学部(山形県米沢市), 2010 年 10 月 17 日.
- ④ 倉前宏行, 大畑富相, 坂本英俊, 仲町英治, 森本秀夫, 「結晶塑性マルチスケール FEM に基づく Al 合金板材の異周速圧延プロセスメタラジー」, 日本塑性加工学会 第 61 回塑性加工連合講演会, 山形大学工学部(山形県米沢市), 2010 年 10 月 16 日.
- ⑤ Hiroyuki Kuramae, Hideo Morimoto and Eiji Nakamachi, “Multi-stage Warm Rolling Process Optimization for High-Formability Aluminum Alloy Sheet Metal Generation Based on Two-scale FEA”, 9th World Congress on Computational Mechanics and 4th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics, Sydney, Australia, July 22, 2010.
- ⑥ Yuki Ikeya, Hiroyuki Kuramae, Hideo Morimoto, Hidetoshi Sakamoto, Tsutao Katayama and Eiji Nakamachi, “Multi-scale Finite Element Analysis of Crystallographic Misorientation Evolution”, 9th World Congress on Computational Mechanics and 4th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics, Sydney, Australia, July 22, 2010.
- ⑦ 倉前宏行, 「結晶塑性マルチスケール FEM に基づく Al 合金板材の異周速圧延プロセス設計」, 第 6 回 NCP フォーラム・機械の強度と形態研究懇話会(日本機械学会関西支部), おごと温泉・湯の宿木もれび(滋賀県大津市), 2010 年 3 月 29 日.
- ⑧ 池谷友規, 倉前宏行, 森本秀夫, 坂本英俊, 片山傳生, 仲町英治, 「結晶均質化法マルチスケール有限要素解析による板材のミクロ・マクロ変形特性評価」, 日本機械学会関西支部第 85 期定時総会講演会, 神戸大学工学部キャンパス(神戸市灘区), 2010 年 3 月 17 日.
- ⑨ 鄒榕, 大畑富相, 中村康範, 倉前宏行, 森本秀夫, 仲町英治, 「マルチスケール有限要素法による高成形能アルミ板材の 2 段圧延解析」, 日本機械学会関西支部第 85 期定時総会講演会, 神戸大学工学部キャンパス(神戸市灘区), 2010 年 3 月 17 日.
- ⑩ 大西孝士郎, 坂本英俊, 倉前宏行, 仲町英治, 森本秀夫, 「結晶塑性マルチスケール有限要素法による冷間・温間異周速圧延解析」, 日本機械学会 第 22 回計算力学講演会, 金沢大学角間キャンパス (金沢市), 2009 年 10 月 12 日.
- ⑪ 倉前宏行, 「結晶塑性マルチスケール解析による異周速圧延プロセス設計」, 日本材料学会 塑性工学部門委員会 第 57 回 材料データベース研究分科会, 日本材料学会 (京都市), 2009 年 10 月 5 日.
- ⑫ Hiroyuki Kuramae, Hideo Morimoto and Eiji Nakamachi, “Rolling Process Design for High Formability Aluminum Alloy Sheet Metal Based on Crystallographic Homogenized Multi-scale Finite Element Method”, 10th US National Congress on Computational Mechanics, Columbus, Ohio, USA, July 17, 2009.
- ⑬ 仲町英治, 倉前宏行, 片山傳生, 森本秀夫, 「結晶塑性マルチスケール解析手法と離散最適化手法を用いた圧延プロセス最適設計」, 日本塑性加工学会 平成 21 年度(第 40 回)塑性加工春季講演会, 京都大学吉田キャンパス (京都市), 2009 年 5 月 31 日.
- ⑭ 池谷友規, 倉前宏行, 坂本英俊, 森本秀夫, 片山傳生, 仲町英治, 「結晶均質化マルチスケール有限要素法による LDH 解析」, 日本塑性加工学会 平成 21 年度(第 40 回)塑性加工春季講演会, 京都大学吉田キャンパス (京都市), 2009 年 5 月 31 日.
- ⑮ 倉前宏行, 森本秀夫, 仲町英治, 「結晶均質化マルチスケール有限要素法に基づく Al 合金板材の微視結晶集合組織設計」, 日本計算工学会 第 14 回計算工学講演会, 東京大学生産技術研究所 (東京都目黒区), 2009 年 5 月 13 日.

## 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