

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04098

研究課題名（和文）動的再結晶マルチスケール有限要素法に基づくAl合金板材のプロセスマタラジー

研究課題名（英文）Process Metallurgy Analyses of Aluminum Sheet Metal based on Dynamic Recrystallographical Multiscale Finite Element Method

研究代表者

倉前 宏行 (Kuramae, Hiroyuki)

大阪工業大学・ロボティクス&デザイン工学部・教授

研究者番号：90298802

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究においては、塑性変形誘起の集合組織発展に加え、熱的負荷による動的再結晶をシミュレート可能なマルチスケール熱・結晶塑性有限要素解析コードを開発し、離散最適化手法を組み合わせ、Al合金板材A6022の熱間異周速圧延の最適条件を求めた。圧延後の板材の成形性（深絞り性）向上を目的に、応答曲面法を用いて、Lankford値（r値）が最大かつ面内異方性を最小とする圧延温度および異周速比を求めた。最適圧延条件における集合組織発展についても議論した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

主に自動車車体用（ボディパネル用）アルミニウム合金について、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、非線形熱・弾/結晶粘塑性マルチスケール有限要素法に基づくプロセスマタラジー手法を開発した。特に、板材創製過程の熱間圧延において、塑性変形と熱負荷が同時に発生するときに生じる動的再結晶を積極的に利用し、材料機能発現のための微視結晶形態制御を行う手法をコンピュータシミュレーションに基づいて開発した。これにより、数値解析法と離散最適化手法と組み合わせることにより、板材創製過程における加工プロセス条件のパラメータ最適化を行うことができた。

研究成果の概要（英文）：In the hot rolling process of Al alloy sheet metal, plastic deformation-induced texture evolution and recrystallization due to thermal loading occur simultaneously. In this study, an optimization condition for hot rolling of A6022 sheet is obtained by using two-scale finite element (FE) analysis code based on the thermo-coupled elastic-crystalline plasticity constitutive law and the dynamic-explicit FE procedure. To improve the formability that maximizes the Lankford value (r-value), the rolling temperature and the rolling speed ratio are obtained by the response surface method.

研究分野：計算力学

キーワード：板圧延 組織発展 アルミニウム合金 プロセスマタラジー解析 マルチスケール解析 有限要素法 結晶集合組最適化

1. 研究開始当初の背景

金属材料の機械的特性は、材料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。この結晶形態は材料の加工過程における塑性変形と熱負荷によって形成されることから、これまで熱間加工時の温度、ひずみ、ひずみ速度などに対する優先方位形成に関する実験的観測が盛んに行われてきた。しかし、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、熱的影響を含む結晶集合組織発展を表現可能な非線形解析手法と加工プロセスパラメータの最適化の確立が必要である。

アルミニウム合金板材の創製プロセスは、多数の加工・処理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。しかし、各プロセス因子に対する結晶集合組織変化の定量的な解明は、理論的にも実験的にも困難である。したがって、最終的な材料機能発現のためには、コンピュータシミュレーションに基づく微視的な結晶集合組織発展と巨視的な材料創製プロセスの双方を記述可能なマルチスケール解析手法と最適化手法との融合による材料創製プロセス条件の決定が大きな技術課題となっている。

2. 研究の目的

本研究においては、塑性変形誘起の集合組織発展に加え、熱的負荷による動的再結晶をシミュレート可能なマルチスケール熱・結晶塑性有限要素解析コードを開発し、この解析コードと離散最適化手法を組み合わせ、Al 合金板材 A6022 の熱間異周速圧延の最適条件を求める。圧延後の板材の成形性（深絞り性）向上を目的に、応答曲面法を用いて、Lankford 値（ r 値）が最大かつ面内異方性を最小とする圧延温度および異周速比を求める。最適圧延条件における集合組織発展についても議論する。

3. 研究の方法

弾/結晶粘塑性構成式として、微視結晶体のすべり系(a)におけるせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}^{(a)}$ は、分解せん断応力 $\tau^{(a)}$ 、基準分解せん断応力 $g^{(a)}$ を用いて次のように表される。

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

ここで $\dot{\gamma}_0^{(a)}$ は基準せん断ひずみ速度、 m は速度感度指数である。基準分解せん断応力 $g^{(a)}$ は、せん断ひずみ γ と温度 T に依存するものとし、

$$g^{(a)}(\gamma, T) = \tau_0(T) + h_0(T) \{ C(\gamma_0 + \gamma) \}^{n_2(T)} \quad (2)$$

とする。ここで、 C は硬化係数であり、臨界分解せん断応力 $\tau_0^{(a)}(T)$ 、初期硬化率 $h_0(T)$ 、加工硬化指数 $n_2(T)$ は、それぞれ温度のシグモイド関数として実験結果をもとにカーブフィッティングする。

塑性加工中に生じる動的再結晶は、融点の 50 % 以上の温度と隣接結晶方位差が 15° 以下の小傾角粒界として生じる。また、ひずみ速度にも依存する。塑性発熱を考慮するため、巨視連続体および微視結晶体における塑性発熱温度速度 $\dot{T}^{\text{macro}}, \dot{T}^{\text{micro}}$ をそれぞれ次のように表す。

$$\dot{T}^{\text{macro}} = \frac{\sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}^p}{\rho c}, \quad \dot{T}^{\text{micro}} = \frac{\sum_{a=1}^{12} \tau^{(a)} \dot{\gamma}^{(a)}}{\rho c} \quad (3)$$

ここで、 $\rho, c, \sigma_{ij}, \dot{\epsilon}_{ij}^p$ は密度、比熱、相当応力、相当塑性ひずみ速度である。巨視連続体において塑性発熱項を考慮した非定常熱伝導方程式を解いて温度分布を求め、微視結晶体の温度を設定する。

本研究においては、再結晶が生じる際の結晶粒のペアに関して、各結晶粒のエネルギーを再結晶後の結晶方位の指標とする。結晶粒のエネルギー W は、

$$W = \sum_{a=1}^{12} \tau^{(a)} \dot{\gamma}^{(a)} \Delta t \quad (4)$$

と表す。ここで Δt は時間増分である。このエネルギーを再結晶候補の各結晶について大小を比較する。動的再結晶により転位密度を減少させることで転位が開放される。塑性仕事量が多い結晶が再結晶を生じ転位速度を減少させ、転位密度のより小さい隣接結晶粒に融合される。つまり、塑性仕事量の小さい結晶に吸収されると軟化が生じる。よって小さなエネルギーを有する結晶に方位を合わせることで、動的再結晶による集合組織発展とする。

4. 研究成果

圧下率（板厚減少率）を 50 % とし，ロール直径 350 mm の板圧延によって板厚 6 mm から 3 mm まで板厚減少させる．板材料のマクロ有限要素モデルは図 1(a) に示すように，長さ 40 mm × 板厚 6 mm の初期板材を 8 節点ソリッド要素により $160 \times 5 = 800$ 要素に分割し，TD 方向には 1 要素として完全平面ひずみ拘束を設定した．上下ロールの周速比 $v = 1.00$ の等周速圧延に加え $v = 1.25, 1.50, 1.75, 2.00$ の異周速圧延，圧延温度 $T = 250, 300, 350, 400$ °C を組み合わせた計 20 通りのマルチスケール解析を行う．ミクロ有限要素モデルは，A6022 の熱間粗圧延後の厚さ 6 mm の板材を SEM/EBSD (scanning electron microscope/electron backscatter diffraction) 計測し，3 次元代表体積要素 RVE (representative volume element) として図 1(b) に示す $6 \times 6 \times 6$ の計 216 点の結晶方位分布を微視結晶体の $3 \times 3 \times 3$ 要素分割の有限要素モデルの積分点に与える．

典型的な温間 $T = 250$ °C，熱間 $T = 400$ °C，等周速圧延 $v = 1.0$ ，異周速圧延 $v = 1.0$ の 4 通りについて，圧延後の板断面のせん断ひずみ分布を図 2 に示す．等周速圧延は板上下表面においてせん断支配，板厚中央において圧縮変形支配であるのに対し，異周速圧延においては板厚方向全体にわたり強いせん断ひずみが導入されていることがわかる．圧延温度 $T = 250$ °C において，板材中心層が受けるひずみ経路を図 3 に示す．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ってせん断ひずみが導入される．異周速比が大きいほど大きなせん断ひずみとなっていることがわかる．

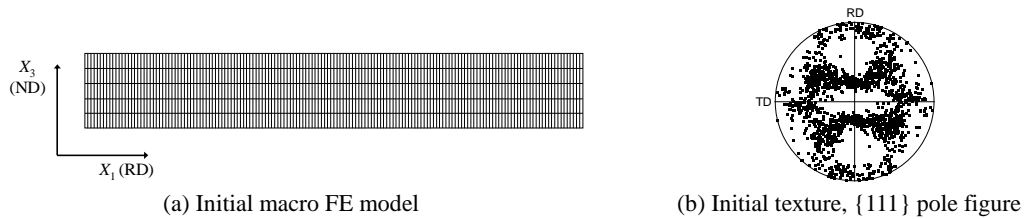


Fig. 1 Initial macro FE model and micro polycrystal orientation distribution.

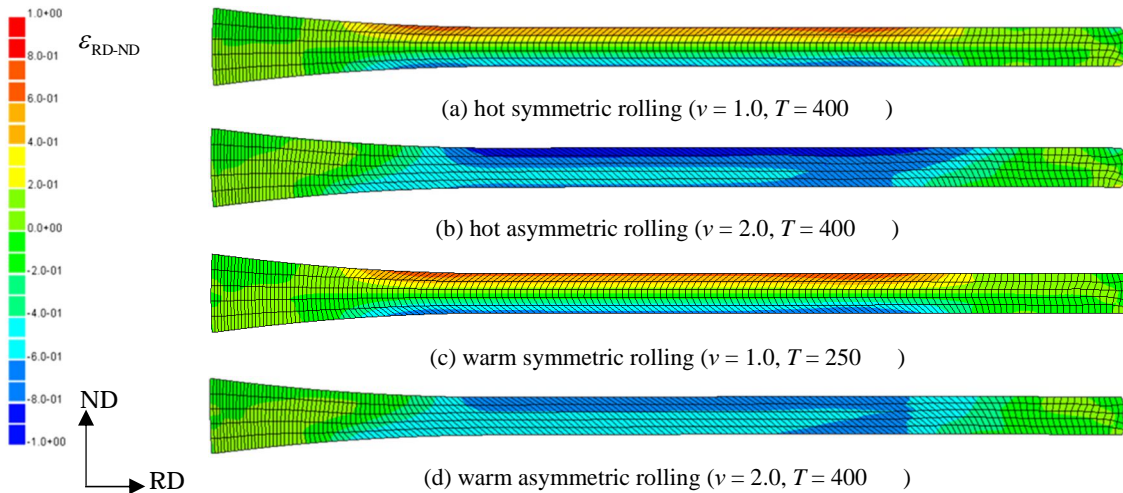


Fig. 2 Shear strain distribution of rolling analysis.

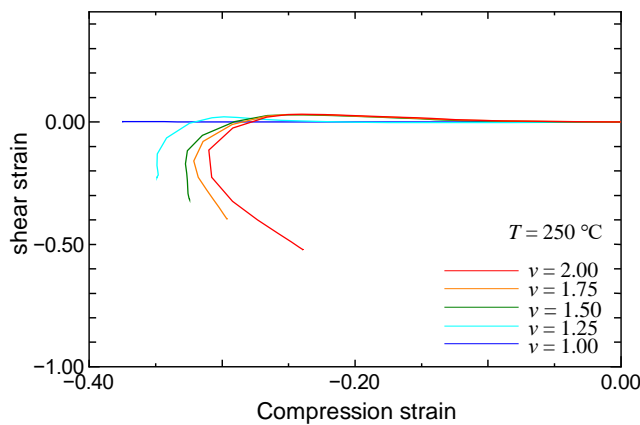


Fig. 3 Strain path of asymmetric rolling deformation at center layer of the sheet metal.

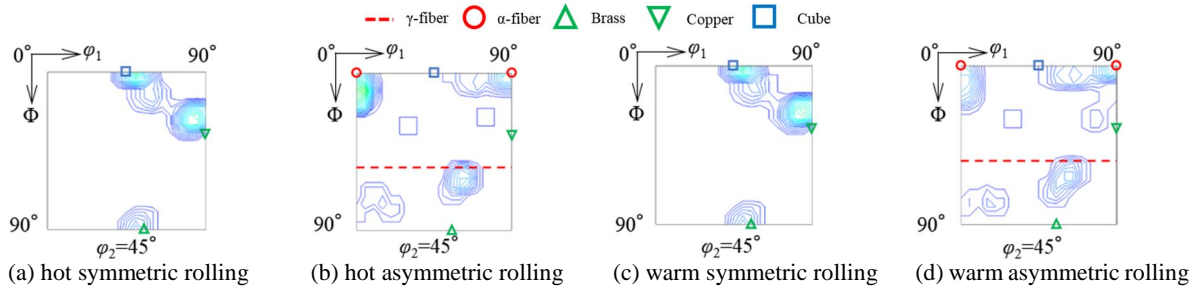


Fig. 4 ODF analysis results of rolled sheet.

圧延後の中層部における集合組織を ODF (orientation distribution function) 解析し, オイラー角空間 ($\varphi_1, \Phi, \varphi_2$) の $\varphi_2 = 45^\circ$ 面の結晶方位分布を図 4 に示す. 圧延条件 (圧延温度および異周速比) により異なる集合組織発展が確認される. 熱間および温間等周速圧延においては, Cube 方位 $\{001\}\langle 100\rangle$, Copper 方位 $\{112\}\langle 111\rangle$ および Brass 方位 $\{110\}\langle 112\rangle$ の集積が確認され, 熱間および温間異周速圧延においては γ -fiber $\{111\}\langle 110\rangle \sim \{111\}\langle 112\rangle$ および α -fiber $\{001\}\langle 110\rangle$ の発達を確認される. 特に熱間異周速圧延においては, α -fiber $\{001\}\langle 110\rangle$ が強く発達している.

圧延後の板材の成形性 (深絞り性) を評価するため, 圧延後の中層部における集合組織を初期方位として, 直径 100 mm の球頭ポンチによる深絞り解析を行った. 加工温度は室温とした. パンチ高さが 80 mm に達したときの真上から見たときの変形形状と板厚ひずみ分布を図 5 に示す. 変形形状より最小半径 R_{\min} に対する半径 R の差より耳率 e を

$$e = \frac{R - R_{\min}}{R_{\min}} \times 100\% \quad (5)$$

とする. さらに, 圧延後の結晶方位分布から Schmid 因子に基づき Lankford 値 (r 値, 一様伸びを与えた際の幅ひずみ r_w と板厚ひずみ r_t の比 $r = r_w / r_t$) を推定し, 平均 r 値 および面内異方性 Δr を

$$\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}, \quad \Delta r = \frac{r_0 + r_{90}}{2} - r_{45} \quad (6)$$

によりそれぞれ求めた結果を図 6 に示す. ここで, r_0, r_{45}, r_{90} は圧延方向から 0° 方向 (RD), 45° 方向, 90° 方向 (TD) のそれぞれの r 値である.

等周速圧延後と異周速圧延後を比較すると, 耳が発生する角度および r 値分布が異なり, 塑性異方性の差が確認できる. 平均 r 値 \bar{r} は, 等周速圧延に比べ異周速圧延が高くなるが, 熱間異周速圧延の面内異方性 も大きい. これは, 異周速圧延により γ -fiber $\{111\}\langle 110\rangle \sim \{111\}\langle 112\rangle$ の集積により r 値は向上するものの, 熱間異周速圧延では同時に α -fiber $\{001\}\langle 110\rangle$ が強く発達するためであると考えられる.

温度と異周速比を変えた計 20 通りのマルチスケール解析結果に基づき, 応答曲面法による最適圧延条件探索を行った. 圧延条件による結晶集合組織発展を比較して図 7 に示す. 異周速比が大きいほど $\{111\}\langle 110\rangle, \{111\}\langle 112\rangle$ 方位への集積が現れ, 圧延温度が高くなるにしたがい α -fiber $\{001\}\langle 110\rangle$ が強く発達していることがわかる.

平均 r 値 \bar{r} が高く面内異方性 Δr が低いほど成形性は良好であることから, 異周速比 v と圧延温度 T に対する多目的関数 $f(v, T)$ を

$$f(v, T) = C_1(2.0 - \bar{r}) + C_2|\Delta r| \quad (7)$$

と設定し, これを最小化する. 重み係数を $C_1 = 1.0, C_2 = 10.0$ とし, 異周速比 v と圧延温度 T に対する目的関数 $f(v, T)$ の 4 次の応答曲面を図 8 に示す. これより, 最適条件として $v = 1.484, T = 250^\circ\text{C}$ を得た.

最適条件を用いてマルチスケール解析を行った結果, 図 9 に示す集合組織を得た. このときの平均 r 値 \bar{r} および面内異方性 Δr はそれぞれ $\bar{r} = 0.914, |\Delta r| = 0.067$ であった.

以上のとおり本研究においては, 動的再結晶を考慮したマルチスケール結晶塑性有限要素解析コードを開発し, 熱間・温間の圧延解析を行った結果, 塑性変形誘起および動的再結晶による集合組織発展を確認した. さらに離散最適化法を組み合わせた AI 板材の熱間異周速圧延におけるプロセスメタラジー解析を行い最適な圧延条件を見いだすことができた.

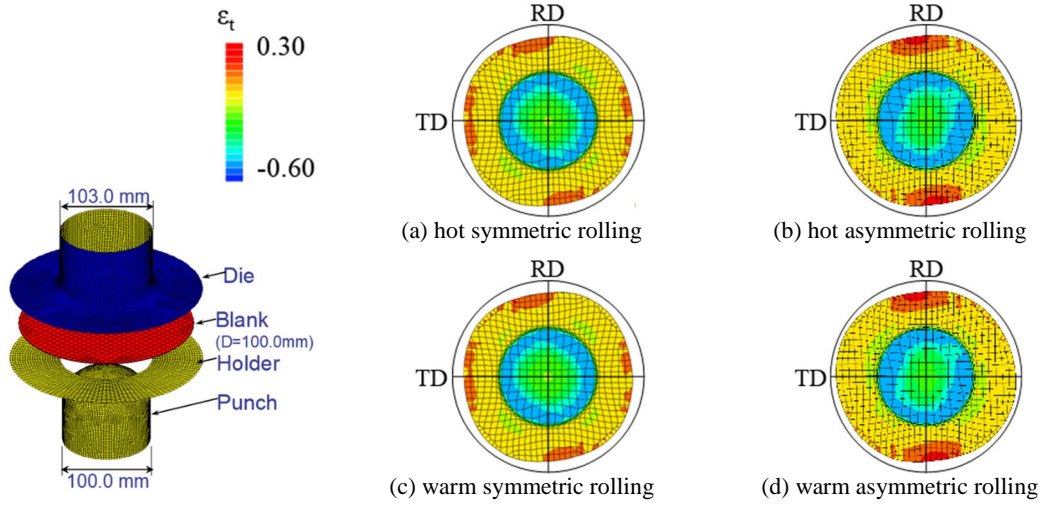


Fig. 5 Thickness strain distribution of hemispherical cup deep drawing analysis.

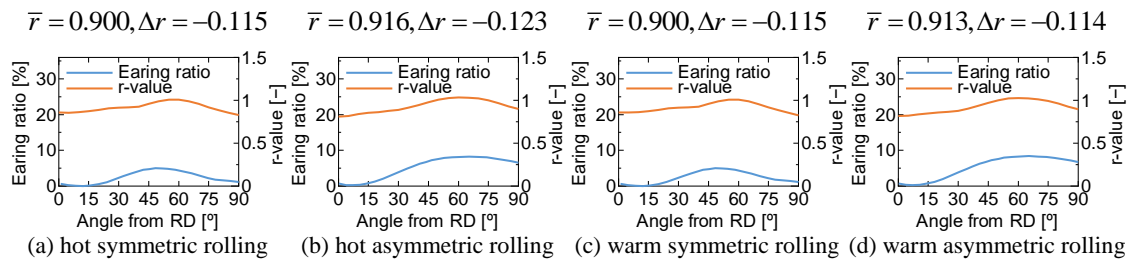


Fig. 6 Earing ratio of hemispherical cup deep drawing analysis and r -value.

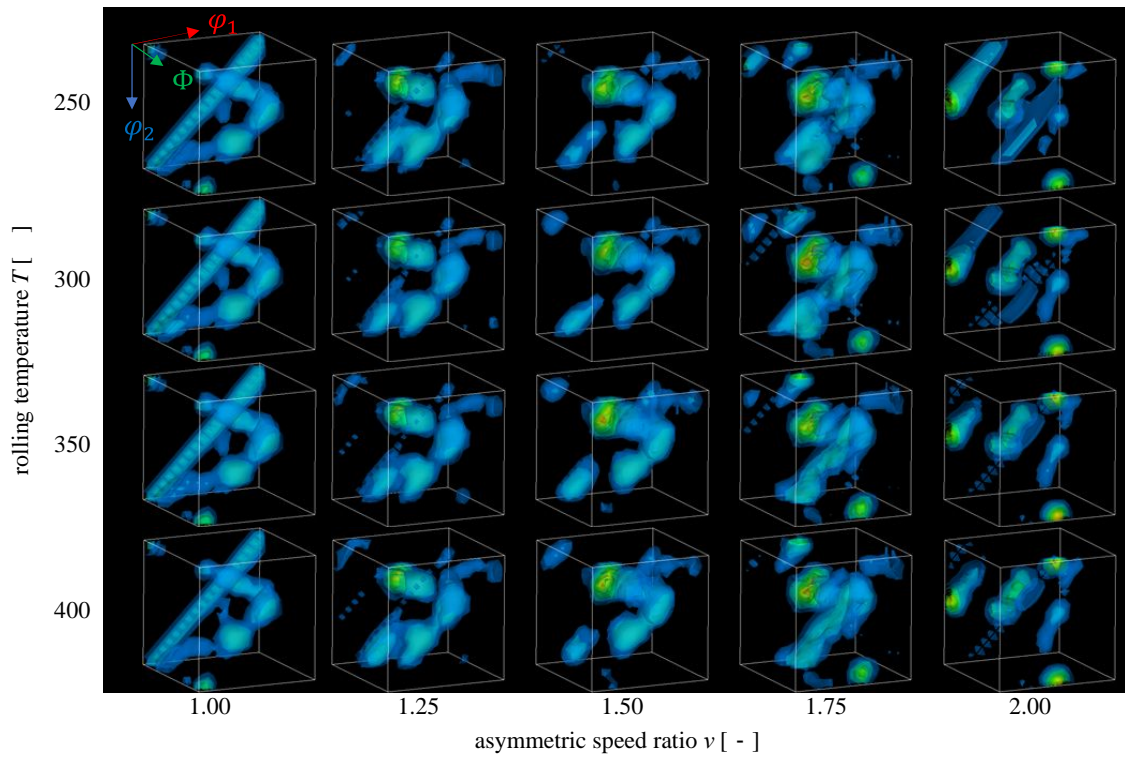


Fig. 7 Comparison of texture evolution at center layer of rolled sheet by ODF analysis.

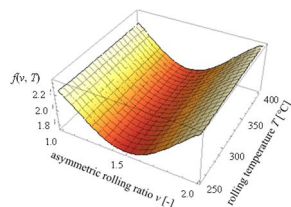


Fig. 8 Fourth polynomial response surface of multi-objective function $f(v, T)$.

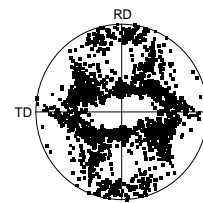


Fig. 9 Optimum texture.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Hiroyuki Kuramae, Eiji Nakamachi, Hidetoshi Sakamoto and Yasunori Nakamura
2. 発表標題 Development of Multi-scale Thermo-coupled Elastic-crystalline Plasticity Finite Element Code to Predict Dynamic Recrystallization
3. 学会等名 Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 倉前宏行, 仲町英治
2. 発表標題 動的再結晶を考慮したマルチスケール結晶塑性有限要素法によるAl合金板材の熱間圧延解析
3. 学会等名 日本機械学会 第32回計算力学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 倉前宏行
2. 発表標題 動的再結晶を考慮したマルチスケール結晶塑性有限要素法によるAl合金板材の熱間圧延パラメータ最適化
3. 学会等名 日本機械学会 第34回計算力学講演会
4. 発表年 2021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
---------	---------