

平成21年 6月18日現在

研究種目：特定領域研究
研究期間：2006～2008
課題番号：18062001
研究課題名（和文） 巨大ひずみ導入のダイナミクスと組織形成
研究課題名（英文） Dynamics and microstructure evolution in metals during and after severe plastic deformation
研究代表者 大橋 鉄也 (OHASHI TETSUYA) 北見工業大学・工学部・教授 研究者番号：80312445

研究成果の概要：ECAPなどの巨大ひずみ加工プロセスで材料中に生ずる塑性ひずみテンソルの空間分布を定量的に精度良く求め、実験的に得られた微視組織と比較することにより、巨大ひずみ導入と微細組織形成の関係を明らかにすると同時に、微視組織の熱的安定性を検討した。組織微細化によって材料の巨視的力学特性が大きく変化する現象については、転位と結晶粒界との相互作用に起因する様々な効果を取り入れた「ひずみ勾配結晶塑性理論」を構築し、微細化による降伏応力とひずみ硬化率が増大する機構を明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	3,800,000	0	3,800,000
2007年度	14,300,000	0	14,300,000
2008年度	12,200,000	0	12,200,000
総計	30,300,000	0	30,300,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・構造・機能性材料

キーワード：計算力学，材料組織，格子欠陥，巨視的力学特性，巨大ひずみ，組織発展

1. 研究開始当初の背景

ECAP, ARB, HPT など材料に巨大なひずみを導入する加工プロセスを経た材料の微視組織は極めて微細で、その巨視的力学特性は高い降伏応力を持ち、また一般的には、工業材料として十分な破断伸びを持つに至らない等という特徴がある。材料の微視組織と巨視的力学特性との関係に関する研究には長い歴史があるにもかかわらず、「巨大ひずみ」で加工された材料のように、材料中に導入されたひずみが極めて大きな場合の「ひずみ」と微視組織形成の関係や、結晶粒界が空間的に高密度に導入された材料の力学特性に関する研究領域はほとんど未開拓のまま残さ

れていた。一方、結晶塑性解析理論、転位動力学シミュレーション手法など最近盛んに研究されている数値的手段を用いれば微細粒材料の形成過程やその巨視的特性を理論的に予測することが出来る可能性があるものの、転位と結晶粒界との相互作用、微細粒材料の組織安定性などに関する検討は未完成であり、既存の手法を利用するだけでは当該の研究課題を解決することは難しかった。

2. 研究の目的

(1) 超微細組織を創製するために用いられている加工プロセスの詳細を数値シミュレーションで再現し、ひずみと組織の定量的関係

を調査する。また、組織微細化に対するひずみ履歴や初期組織の因子の影響について検討を行う。微細粒組織の安定性と時間発展については熱力学理論を基礎にした検討を加える。

(2) 微細組織材料の特異な力学特性、特に極めて高い降伏応力と加工硬化率の発現には微細な寸法の結晶粒の中での転位の挙動と高密度の結晶粒界が関与する。このことに関する理論モデルを構築し、力学特性の予測を可能とする。

3. 研究の方法

(1) 工具摩擦、加工発熱などの効果を取り入れた3次元陽解法有限要素法により、巨大ひずみ加工で素材内に導入されるひずみの量と分布を明らかにする。解析結果の妥当性を担保するために、可能な限り実験結果との比較・検討を行う。

微細組織の時間発展については、フェーズ・フィールド法及びモンテカルロ法による数値シミュレーションにより検討する。

(2) 結晶粒界により転位の運動距離が制限されて生ずる効果、転位線の屈曲によって生ずる効果、転位の不均一な分布によって生ずる効果、高密度に蓄積した転位が対消滅または粒界に吸収される効果などについて、素過程に関する理論モデルの検討を進めるとともに、転位動力学シミュレーションによる検討、ひずみ勾配結晶塑性理論、高次勾配結晶塑性理論の構築を行い、数値シミュレーション/解析によって微細粒材料の巨視的力学特性を予測する。

4. 研究成果

(1) 低炭素鋼に0~6の範囲の相当ひずみを導入したときの、ひずみ量と得られる微視組織の定量的関係を構築した。あわせて、超微細組織を有するバルク棒材を効率的に創製できる加工プロセスを数値解析によって検討し、実証も行った。また、純アルミニウムの巨大ひずみ加工による硬度変化と微細化挙動に対する初期組織の影響を、材料に加える相当塑性ひずみ ϵ_{eq} を広範囲にわたって変化させながら検討を行った。その結果、 ϵ_{eq} に対する硬さ変化は初期結晶粒径 d_0 に強く依存し、これは d_0 によって微細組織の形成過程が異なることが原因であることを明らかにした。微細粒組織の時間発展には粒界移動度が大きな影響を及ぼすことを明らかにした。

(2) 結晶粒径が $1\mu\text{m}$ 程度以下になると巨視的な力学特性がいくつかの微視的な力学素過程の影響を顕著に受け、「特異な」力学特性が発現することを明らかにした。「巨大ひず

み」プロセスで創製された微細粒組織材料の場合、結晶粒内に残留する転位が少なくなるために、結晶粒内における転位同士の相互作用よりも転位と結晶粒界との相互作用の方が巨視的力学特性の決定に主要な役割を果たす。その1つは転位が微細な結晶粒中では大きな曲率で屈曲させられることにより生ずる効果である。Fig. 1はその効果を結晶塑性解析理論に導入して得られた巨視的力学特性の予測結果である。粒径が微細になるほど降伏応力が増大する。転位-結晶粒界相互作用に関する明瞭な物理描像に立脚して、連続体力学理論に初めて降伏応力の寸法依存性を組み込むことが出来た。

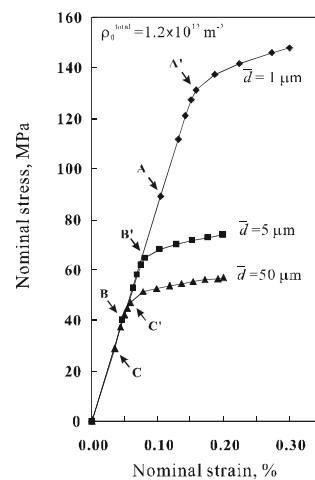


Fig. 1 Stress-strain curves for polycrystals of various mean grain diameter predicted by a novel strain gradient crystal plasticity theory.

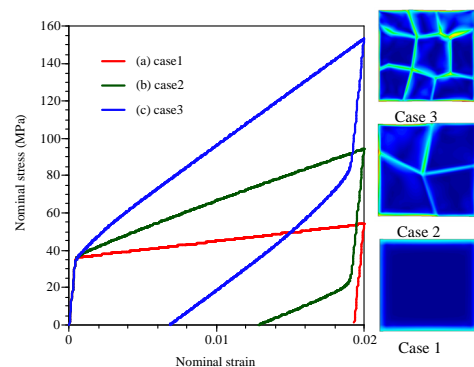


Fig. 2. Curves of nominal stress versus nominal strain and GN dislocation density distributions for reducing grain sizes.

結晶粒微細化に伴う内部応力効果については高次勾配結晶塑性理論を基礎とした有限要素法を用いて調査した。得られた公称応力

一公称ひずみ関係と GN 転位密度の分布を Fig. 2 に示す. 転位の堆積に起因する内部応力は, 反転負荷時に強いバウシinger 効果を発生させる背応力として作用し, 実験により同効果の大きさを測定することは, 間接的に内部応力の発生割合を推定することに結びつくことを示唆した.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 27 件)

1. Y. Saito and C. Masuda: Materials Science Forum, (2009), in press, Modelling of Grain boundary stability of materials under severe plastic deformation and experimental verification, 査読有.
2. Tetsuya Ohashi, Rozaliya Barabash, Judy W Pang, Gene E Ice, Oleg M Barabash: Int. J. Plasticity, vol.25, pp920-941, 2009, X-ray Microdiffraction and Strain Gradient Crystal Plasticity Studies of Geometrically Necessary Dislocations Near a Ni Bicrystal Grain Boundary, 査読有.
3. T.Inoue, Z.Horita, H.Somekawa, F.Yin, MATERIALS TRANSACTIONS, 50, pp.27-33, 2009, Distributions of Hardness and Strain during Compression in Pure Aluminum Processed with Equal-channel Angular Pressing and Subsequent Annealing, 査読有.
4. T.Inoue, N.Tsuiji, COMPUTATIONAL MATERIALS SCIENCE, 46, pp.261-266, 2009, Quantification of strain in accumulative roll-bonding under unlubricated condition by finite element analysis, 査読有.
5. Y.Suwa, Y.Saito and H.Onodera: Computational Materials Science:vol.44(2008), p.286-295, Phase-field simulation of recrystallization based on the unified subgrain growth theory, 査読有.
6. Y.Suwa, Y. Saito and H.Onodera: Materials Transactions vol.49(2008), p704-709, Parallel computer simulation of three-dimensional grain growth using the multi-phase-field model, 査読有.
7. Tetsuya Ohashi, Ryota Tsugawa and Tomotaka Ogasawara: Materials Science Forum, vol.584-586, pp1063-1068, 2008, Numerical Modeling of Dislocation-Grain Boundary Interaction and Continuum Mechanics Analyses for Mechanical Properties of Fine Grained Metals, 査読有.
8. Ryouji Kondou, Tetsuya Ohashi and Sei Miura: J. Computational Science and Technology, vol.2, pp162-172, 2008, Relationship between Micro-Incompatibility and Heterogeneity of Dislocation Density Distribution in Cu-9at.% Al Symmetric Type Bicrystal Models under Tensile Loading, 査読有.
9. T.Inoue, F.Yin, Y.Kimura, MATERIALS TRANSACTIONS, 48, pp.2028-2035, Crystallographic Texture of Warm Caliber Rolled Low Carbon Steel, 査読有.
10. T.Inoue, Z.Horita, H.Somekawa, K.Ogawa, ACTA MATERIALIA, 56, pp.6291-6303, 2008, Effect of initial grain sizes on hardness variation and strain distribution of pure aluminum severely deformed by compression tests, 査読有.
11. 井上忠信,鳥塚史郎,村松栄次郎,長井寿, 鉄と鋼, 94, pp.164-172, 2008, 実機溝ローラ圧延機による超微細粒組織棒鋼の創成, 査読有.
12. Kuroda, M., Tvergaard, V.: Journal of the Mechanics and Physics of Solids 56, 159161608 (2008). On the formulations of higher-order strain gradient crystal plasticity models, 査読有.
13. Y.Suwa, Y. Saito and H.Onodera: Materials Science Forum, ol.539-543(2007), p.2437-2442, Computer Simulation of Grain Growth in Three Dimensions by Phase Field Model with Anisotropic Grain Boundary Mobilities, 査読有.
14. Y.Suwa, Y. Saito and H.Onodera: Materials Science Forum, vol. 539-543 (2007),p.1189-1194,Phase Field Modeling of Recrystallization Effect of Second-Phase Particles on Recrystallization Kinetics, 査読有.
15. Y.Suwa, Y. Saito and H.Onodera: Materials Science and Engineering vol.A457(2007), p.132-138,Phase Field Simulation of Stored Energy Driven Interface Migration at a Recrystallization Front, 査読有.
16. Y.Suwa, Y. Saito and H.Onodera: Computational Materials Science, vol.40, p.40-50, Three-dimensional phase field simulation of the effect of anisotropy in grain-boundary mobility on growth kinetics and morphology of grain structure, 査読有.
17. Y.Suwa, Y.Saito and H.Onodera: Acta Materialia, vol.55(2007), p.6881-6894, Phase-field simulation of abnormal grain growth due to inverse pinning, 査読有.
18. Tetsuya Ohashi, Masato Kawamukai and Hussein Zbib: Int. J. Plasticity, vol.23, pp897-914, 2007, A Multiscale Approach for Modeling Scale-Dependent Yield Stress in Polycrystalline Metals, 査読有.
19. Tetsuya Ohashi, and Hussein Zbib: Materials Science Forum, vol.561-565,

- pp1827-1832, 2007, Numerical modeling of scale dependent mechanical properties of metal polycrystals, 査読有.
20. F. Akasheh, H. M. Zbib, and T. Ohashi: Phil. Mag., vol.87, pp1307-1326, 2007, Multiscale modeling of size effect in FCC crystals: Discrete dislocation dynamics and dislocation-based gradient plasticity, 査読有.
 21. Ryouji Kondou and Tetsuya Ohashi: Key Engineering Materials, vol.340-341, pp187-192, 2007, High Density Bands of GN Dislocations Formed by Multi Body Interaction in Compatible Type Multi Crystal Models, 査読有.
 22. T.Inoue, F.Yin and Y.Kimura, MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING A, 466, pp.114-122, 2007, Strain distribution and microstructural evolution in multi-pass warm caliber rolling, 査読有.
 23. Y.Suwa, Y. Saito and H.Onodera: Scripta Materialia, vol.55(2006), p.407-410, Phase Field Simulation of Grain Growth in Three Dimensional System Containing Finely Dispersed Second Phase, 査読有.
 24. Ryouji Kondou and Tetsuya Ohashi: International Journal of The Japan Society of Mechanical Engineers, A, vol.49, pp581-588, 2006, Grain Boundary Accumulation of Geometrically Necessary Dislocation and Asymmetric Deformation in Compatible-type Bicrystals with Tilt Angle Grain Boundary under Tensile Loading, 査読有.
 25. 近藤了嗣, 大橋鉄也: 日本機械学会論文集 (A編), vol.72, pp937-944, 2006, 適合型三重結晶の引張りに伴う結晶粒の多体相互作用と回位型変位場の形成, 査読有.
 26. 近藤了嗣, 大橋鉄也: 日本機械学会論文集 (A編), vol.72, pp16-23, 2006, 傾角粒界を持つ適合型双結晶の引張りに伴う非対称変形とGN転位の粒界堆積, 査読有.
 27. 近藤了嗣, 大橋鉄也, 三浦精: 日本機械学会論文集 (A編), vol.72, pp582-589, 2006, Cu-9at%As 合金対称双結晶の引張における微視的非適合性と転位密度不均質性の関係, 査読有.
- [学会発表] (計 43 件)
1. 井上忠信, 殷福星, 染川英俊, 堀田善治, 小川一行, 圧縮加工された純アルミニウムのひずみと組織・硬さ変化に関する初期結晶粒径の影響, 第 116 回軽金属春期大会, 登別グランドホテル, 5.2009.
 2. 大橋鉄也: 巨大ひずみ加工によるナノ組織材料の特性解明のためのマクロ・メゾ・ミクロシミュレーション, 金属学会 2008 年度春季大会シンポジウム「計算科学のフロンティア: 新たな飛躍を目指して」, 東工大大岡山, 2009/3/28, 基調講演
 3. Y.Saito and Y.Suwa: Theoretical studies of thermodynamic stability and computer simulation of microstructural evolution in materials under severe plastic deformation, International Conference on Giant Straining Process for Advanced Materials (GSAM-2008), Nishijin Plaza, Kyushu University, Fukuoka, Japan, 2008 年 11 月 22-24 日
 4. 井上忠信, 殷福星, 木村勇次, 温間溝ロール圧延で形成された超微細粒組織における変形履歴の影響, 日本鉄鋼協会第 156 回秋季講演大会, 熊本大学, 9.2008.
 5. T.Inoue, F.Yin and Y.Kimura, Texture evolution and deformation history in low carbon steel by multi-pass caliber rolling, GSAM-2008, Kyushu University, Japan, 2008.
 6. Tetsuya Ohashi, Tomotaka Ogasawara and Mitsutoshi Kuroda: Some Discussions on the Grain Boundary Effects on the Mechanical Properties of Ultrafine Grained Polycrystals, Int. Symp. Giant Straining Process for Advanced Materilas GSAM-2008, Fukuoka, 2008/11/21, Keynote talk
 7. Tetsuya Ohashi, Ryota Tsugawa and Tomotaka Ogasawara: Numerical Modeling of Dislocation-Grain Boundary Interaction and Continuum Mechanics Analyses for Mechanical Properties of Fine Grained Metals, The 4th International Conference on Nanomaterials by Severe Plastic Deformation, Goslar, Germany, 2008/8/18
 8. 大橋鉄也, 畑山昌宏, 小笠原朋隆, 黒田充紀: 内部応力場を考慮した単結晶の弾・粘塑性大変形有限要素解析, 日本機械学会 2008 年第 21 回計算力学講演会, 琉球大学, 2008/11/1
 9. 大橋鉄也, 栗原俊介: 多重すべりによって誘起される再結晶核形成のモデルと再結晶成長 MC シミュレーション, 日本機械学会 2008 年第 21 回計算力学講演会, 琉球大学, 2008/11/1
 10. 大橋鉄也, 津川良太: ひずみ勾配結晶塑性解析による微細粒多結晶材料の加工硬化特性予測の試み, 日本機械学会 2008 年第 21 回計算力学講演会, 琉球大学, 2008/11/1
 11. 小笠原朋隆, 大橋鉄也, 黒田充紀: 内部応力場を考慮した多結晶体の弾・粘塑性

- 大変形有限要素解析, 日本機械学会 2008 年第 21 回計算力学講演会, 琉球大学, 2008/11/1
12. 大橋鉄也: ひずみ勾配結晶塑性論と転位挙動のモデルを用いた多結晶金属材料の機械的特性の解析, 第 6 回 マテリアル設計講座 夏季セミナー, 札幌, 2008/9/9, 招待講演
 13. 大橋鉄也: 金属微視組織中に生ずる変形現象の連続体力学解析, 日本鉄鋼協会・国際シンポジウムフォーラム第 6 回研究会, 京都・関西セミナーハウス, 2008/5/23, 招待講演
 14. 大橋鉄也, 津川良太: 面心立方型金属多結晶体の引張弾塑性変形における寸法依存性の数値シミュレーション, 日本機械学会 北海道支部第 47 回講演会, 釧路高専, 2008/9/27
 15. 大橋鉄也, 畑山昌宏, 小笠原朋隆, 黒田充紀: 幾何学的非線形性の効果を考慮した単結晶金属材料の塑性変形有限要素解析, 日本機械学会 北海道支部第 47 回講演会, 釧路高専, 2008/9/27
 16. 小笠原朋隆, 大橋鉄也, 黒田充紀: 幾何学的非線形性の効果を考慮した多結晶金属材料の塑性変形有限要素解析, 日本機械学会 北海道支部第 47 回講演会, 釧路高専, 2008/9/27
 17. Rozaliya Barabash, J. Pang, G. Ice, and Tetsuya Ohashi: X-Ray Microbeam Probing the Inhomogeneous GNDs Distribution near the Boundary of a Ni Bicrystal, TMS2008, 137th Annual Meeting & Exhibition, New Orleans, USA, 2008/3/9
 18. Tetsuya Ohashi, Rozaliya I. Barabash, Judy W.L. Pang, Gene E. Ice, Oleg M. Barabash, Wenjun Liu: Finite element and polychromatic microdiffraction analysis of plastic deformation micromechanics near a grain boundary, Int. conf. Plasticity and its current applications, 08, Big Island, Hawaii, USA, 2008/1/3, Invited talk
 19. Tetsuya Ohashi and Kenji Higashida: Phenomenological models for dislocation-grain boundary interactions and their effects on yield strength and strain hardening of metal crystals, Int. conf. Plasticity and its current applications, 08, Big Island, Hawaii, USA, 2008/1/3, Invited keynote lecture
 20. 大橋鉄也: 結晶塑性理論における結晶粒微細化と強度, 金属学会 公募テーマシンポジウム「構造金属材料の力学的特性を支配する原理原則—鉄鋼編—」, 武蔵工業大学, 2008/3/27, 依頼講演
 21. 大橋鉄也: 微細粒材料の加工硬化特性に関する検討, 機械学会 計算力学部門研究会 A-TS01-15 研究会, 慶応大学矢上キャンパス, 2008/3/19, 招待講演
 22. 大橋鉄也: ひずみ勾配塑性理論と転位モデルに基づく力学特性予測, 鉄鋼協会「計算工学による組織と特性予測技術」研究会, 新日鉄 代々木倶楽部, 2008/1/28, 依頼講演
 23. 黒田充紀・佐藤喜樹, 高次勾配結晶塑性理論と機械的性質の粒径依存性予測について, 日本金属学会第142回春期大会, 武蔵工業大学(東京都), 2008.3.
 24. 佐藤喜樹・黒田充紀, 高次勾配結晶塑性モデルによる微細結晶粒材料の機械的性質の有限要素解析, 日本機械学会第21回計算力学講演会, 琉球大学(沖縄県), 2008.11.
 25. M. Kuroda, Y. Sato, Change in the mechanical response of polycrystals with grain refinement: Predictions by a gradient crystal plasticity theory. International Symposium on Giant Straining Process for Advanced Materials (GSAM-2008), 九州大学西新プラザ, 2008.11.
 26. 井上忠信, 微細組織創製におけるマクロ変形解析の役割, 日本機械学会年次大会, 関西大学, 9.2007 (招待講演)
 27. 井上忠信, 殷福星, 木村勇次, 温間溝ロール圧延による超微細粒組織棒鋼のひずみと組織, 硬さ分布, 日本鉄鋼協会第154回秋季講演大会, 岐阜大学, 9.2007
 28. T.Inoue, F.Yin, Effect of Shear Deformation on Deformed Microstructures of Austenitic Grains, PRICM6, Jeju, Korea, 11.2007.
 29. Daigo Setoyama, Noritoshi Iwata, Tetsuya Ohashi and Michihiro Sato: Crystal plasticity analysis for BCC ferritic steel, APCOM'07 in conjunction with EMMESC XI, 京都, 2007/12/3
 30. Tesuya Ohashi and Hussein Zbib: Numerical Modeling of Scale Dependent Mechanical Properties of Metal Polycrystals, The 6th pacific rim international conference on advanced materials and processing, PRICM6, Jeju iland, Korea, 2007/11/6, Invited talk
 31. Tetsuya Ohashi and Hussein Zbib: Modeling of dislocation-grain boundary interaction and scale-dependent mechanical properties of metal polycrystals, Int. symp. on Ultrafine Grained Steels, ISUGS, Kitakyushu, Japan, 2007/10/24, Invited talk
 32. 大橋鉄也: 巨大ひずみ材料の巨視的な力学的性質—連続体力学解析結果と実験結果との比較—, 特定領域「巨大ひずみ」個別テーマ検討会「粒界・転位相互作用」, NIMS 東京事務所会議室, 2007/12/12
 33. 大橋鉄也, 和田厚: GN 転位の蓄積及び多

- 重すべりに注目した金属の再結晶シミュレーション, 日本機械学会 2007年計算力学講演会講演論文集, 同志社大学京田辺, 2007/11/26
34. 大橋鉄也: 結晶塑性解析における巨視的加工硬化特性の予測, 第2回鉄鋼協会「加工硬化特性と組織」研究会, 鉄鋼協会会議室, 2007/11/21, 依頼講演
 35. 大橋鉄也: 微細組織材料の巨視的力学特性予測, 日本機械学会 2007年度年次大会ワークショップ「超強加工による超微細粒金属の組織と強度」, 関西大学, 2007/9/12, 依頼講演
 36. 大橋鉄也: 結晶塑性解析のパーспекティブ A perspective on crystal plasticity analysis system, 材料学会第56回通常総会講演会, 名古屋大学, 2007/5/20
 37. 大橋鉄也: 結晶粒界によって制限される転位運動のシミュレーションと多結晶体の巨視的力学特性の寸法依存性モデリング, 文部科学省科学研究費補助金・特定領域研究「巨大ひずみが開拓する高密度格子欠陥新材料」平成18年度報告会, 東京, 如水会館, 2007/3/30
 38. 大橋鉄也: 多結晶金属材料の力学特性に関する連続体力学モデリング, 日本金属学会 2007年春大会 公募シンポジウム S6.巨大ひずみ加工材料の特異なメカニクス, 千葉工大, 2007/3/29, 基調講演
 39. 瀬戸山大吾, 岩田徳利, 大橋鉄也, 佐藤満弘: フェライト鋼の結晶塑性解析, 第56回理論応用力学講演会, 日本学術会議, 東京, 2007/3/7
 40. Tetsuya Ohashi, Masato Kawamukai and Hussein Zbib: Crystal Plasticity Modeling of Scale Dependency of Yield Stress for Metal Polycrystals, International Symposium on Plasticity 2006 in Halifax, Halifax, Canada, 2006/7/16, Keynote lecture
 41. 大橋鉄也: ミクロ・メゾシミュレーションによる微細粒多結晶体の変形解析, 日本金属学会公募シンポジウム「巨大ひずみ材料の特異なメカニクス」, 千葉工業大学津田沼キャンパス, 2007/3/29
 42. 大橋鉄也, 河瀬厚: 多軸負荷を受ける多重のすべり変形と再結晶の数値シミュレーション, 日本機械学会第45回北海道支部講演会, 北見工大, 2006/9/30
 43. 大橋鉄也, H.M.Zbib: 多結晶材料のHall-Petch 関係の転位モデル, 日本機械学会 2006年度年次大会ワークショップ, 熊本大学, 2006/9/1

[図書] (計2件)

1. 大橋鉄也: 機械の研究, vol. 59,

pp823-833, 2007, 単結晶塑性と多結晶塑性 (1)

2. 大橋鉄也: 機械の研究, vol. 59, pp949-956, 2007, 単結晶塑性と多結晶塑性 (2)

受賞 (計1件)

1. 日本金属学会 第5回村上奨励賞, 物質・材料研究機構, 井上忠信, 平成20年9月23日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大橋 鉄也 (OHASHI TETSUYA)

北見工業大学・工学部・教授

研究者番号: 18062001

(2) 研究分担者

黒田 充紀 (KURODA MITSUTOSHI)

山形大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 70221950

井上 忠信 (INOUE TADANOBU)

物質・材料研究機構 主幹研究員

研究者番号: 90354274

斉藤 良行 (SAITO YOSHIYUKI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号: 60277829