

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360339

研究課題名(和文) 加工ひずみ制御による微細粒組織創成の定量的予測技術の構築

研究課題名(英文) Construction of quantitative prediction technology on creation of ultrafine-grained structure by plastic deformation control

研究代表者

井上 忠信 (INOUE TADANOBU)

独立行政法人物質・材料研究機構・材料信頼性萌芽ラボ・主幹研究員

研究者番号：90354274

研究成果の概要(和文)：構造用金属材料の結晶粒微細化は、希少な合金元素を使用することなく、加工プロセスによる組織制御によって特性を向上できるため重要である。本研究では、計算科学と実験科学を結合した本研究手法により、ひずみ(量と成分)と組織の定量的な関係を構築した。そして、その普遍的結果を用いて、数値シミュレーションによる仮想実験によって大型棒鋼の試作を試み、実機圧延機で実証した。

研究成果の概要(英文)：Refinement of crystal grains is an effective methods for developing toughness and strength in structural metallic materials without the addition of alloying elements, and it can be achieved by microstructure control through plastic deformation processes. In this study, quantitative correlation between strain and microstructure is investigated through a combination of numerical simulations and experimental observations and measurements. The rolling process to efficiently create ultrafine-grained bar is proposed by numerical simulation, the predicted result was verified by the rolling experiments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,700,000	2,610,000	11,310,000
2009年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2010年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：加工ひずみ制御、結晶粒微細化、有限要素法、定量的予測技術、プロセスパラメータマップ

## 1. 研究開始当初の背景

希少合金元素の枯渇や資源循環型社会の醸成を背景に、単純組成で機械的性質を向上できる結晶粒微細化技術は、次世代の金属材料として大きな期待が寄せられている。結晶粒微細化の研究では、微細化＝大ひずみという観点から、特別な強加工手段で創成されて

いるため、個別現象の蓄積だけが進み、普遍的な取り扱いがなされていない。これにより、メカニズム解明が出来ておらず、かつ実機レベルでの加工プロセスに展開することが困難であった。よって、今後の取り組みとして、普遍的な取り扱いを目的とした研究成果が期待されていた。

## 2. 研究の目的

計算科学と実験科学を結合した研究手法により、加工の進行に伴うひずみの蓄積とその空間分布による組織の変化を定量的に明らかにし、微細粒組織形成の予測技術を構築することを目的とした。また、普遍的な研究成果を利用し、微細粒金属材料のバルク材（棒断面）創成を例題設定し、数値シミュレーションによる仮想実験によって効率的な圧延プロセスを提案し、実証した。

## 3. 研究の方法

- (1) 純アルミニウム (99.99%Al) を対象に、8パス、強加工と焼鈍を工夫することで結晶粒径の異なるサンプル（粒径~6, 30, 100  $\mu\text{m}$ 、ビッカース硬さ HV=31,25,25）を準備し、円柱圧縮試験（0.01/s, 室温）を実施した。圧縮加工で導入された相当ひずみ  $\epsilon_{\text{eq}}$  は有限要素解析で予測し、圧縮後の samples について、HV 測定と組織観察（EBSD, TEM）を行った。
- (2) 低炭素鋼を対象に、温間域での1パス平面ひずみ圧縮試験によって、ひずみと組織の関係を明らかにした。また、組織微細化へのせん断ひずみの影響についての検討も行った。
- (3) 低炭素鋼を対象に、温間域での多パス溝ロール圧延を実施し、微細粒棒鋼創成を試み、その機械的特性を調べた。同時に、三次元有限要素シミュレーションによって変形解析を行い、相当ひずみや各ひずみ成分の履歴を定量的に予測した。
- (4) 得られた成果をサーベイし、個別の加工プロセスに依存しない共通の物理量、物理現象に基づいた微細粒組織形成のプロセスパラメータマップを明らかにした。そのパラメータマップに基づき、微細粒金属材料創成における既存プロセスの問題点を明確にし、効率的な微細粒創成プロセスを提案し、実証を試みた。

## 4. 研究成果

- (1) 圧縮条件が同じでも、材料内に蓄積する相当ひずみ  $\epsilon_{\text{eq}}$  の分布と大きさは初期結晶粒径  $d_0$  によって大きく異なり、これは各 sample の応力-ひずみ線図の相違に基づくことを明らかにした。また、 $\epsilon_{\text{eq}}$  における硬さ HV の変化は、 $d_0$  に強く依存した。 $d_0$  が小さいほど、最大 HV および HV 一定を示す  $\epsilon_{\text{eq}}$  の値は小さくなり、 $d_0$  が微細粒組織創成に重要なパラメータであることを明らかにした（図1）。この硬度変化の  $d_0$  依存性は、微細組織の形成過程の違いによって引き起こされたことをEBSDによる組織観察結果から明らかにした。なお、全ての samples に共

通して、 $\epsilon_{\text{eq}}$  の増加と共に結晶粒は扁平となるが、 $1\mu\text{m}$  以下にはならず、軟化が進むにつれ結晶方位の変化が観察された。また、有限要素解析で算出された  $\epsilon_{\text{eq}}$  から試験断面上における硬度分布を予測したところ、実験後に測定された硬度分布と良く一致した。

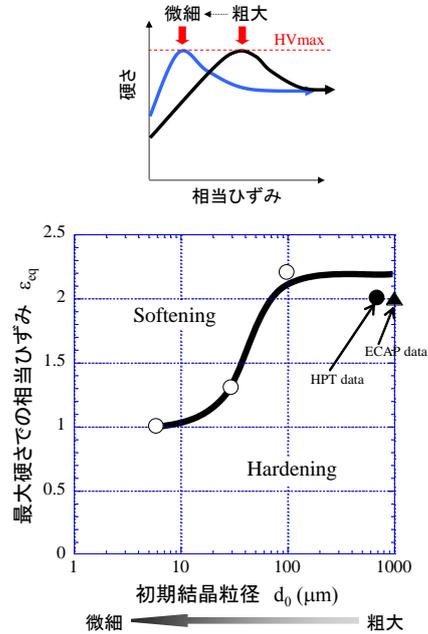


図1 初期結晶粒径と硬さの最大値を示す相当ひずみの関係

- (2) 低炭素鋼の温間域での1パス平面ひずみ圧縮試験を行い、同じ相当ひずみ  $\epsilon_{\text{eq}} = 2.0$  が導入された site でのせん断変形の有無による微細組織形成の違いを定量的に検討した。その結果、せん断変形が付与された site の組織は、様々なすべり系が活動し、結果的に大傾角化の割合が高くなり、微細組織形成に有効であることが分かった。

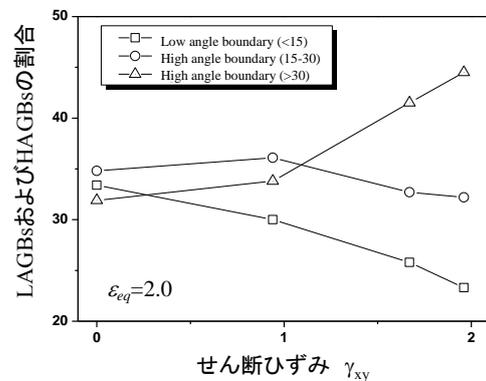
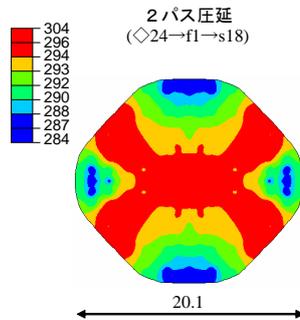


図2 せん断ひずみによる結晶方位差角の変化

- (3) 既存のスクエア孔型を有する溝ロール圧延での微細粒棒鋼創成の問題点を数値シミュレーションによって指摘し、これを改良した新しいフォーバル孔型を有した圧延パスを提案した。結果的に、少ないパスで大きなひずみを材料に導入でき、効率的に微細粒棒鋼を創成できることを実証した。

(a) 開発したフォーバル／スクエア孔型系列



(b) 既存のスクエア／スクエア孔型系列

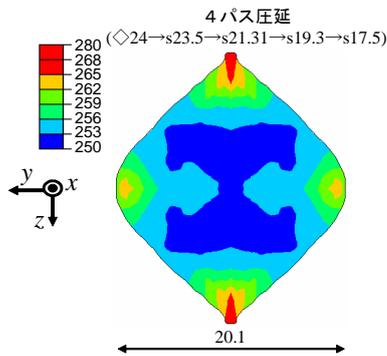


図3 実験後に測定された硬さ分布

## 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6件)

- 1) T. Inoue, F. Yin, Y. Kimura, K. Tsuzaki and S. Ochiai ; Delamination effect on impact properties of ultrafine-grained low carbon steel processed by warm caliber rolling, METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A, 査読有, Vol.40, 2010, 341-355.
- 2) J.-H. Kang, T. Inoue and S. Torizuka ; Effect of Shear Strain on the Microstructural Evolution of a Low Carbon Steel during Warm Deformation, Materials Transactions, 査読有, Vol.51, 2010, 27-35.
- 3) T. Inoue and N. Tsuji ; Quantification of strain in accumulative roll-bonding under unlubricated condition by finite element analysis, Computational Materials Science, 査読有, Vol.46, 2009, 261-266.
- 4) J.-H.Kang, T.Inoue, S.Torizuka ; Effect of Strain on Microstructural Evolution under Warm Deformation in an Ultra-Low Carbon Steel Materials Transaction, 査読有, Vol.50, 2009, 34-39.
- 5) T.Inoue, Z.Horita, H.Somekawa, F.Yin ; Distributions of Hardness and Strain during Compression in Pure Aluminum Processed with Equal-channel Angular Pressing and Subsequent Annealing, Materials Transaction, 査読有, Vol.50, 2009, 27-33.
- 6) T.Inoue, Z.Horita, H.Somekawa, K.Ogawa ; Effect of initial grain sizes on hardness variation and strain distribution of pure aluminum severely deformed by compression tests, ACTA MATERIALIA, 査読有, Vol.56, 2008, 6291-6303.

[学会発表] (計6件)

- 1) T. Inoue ; Optimum Pass Design of Bar Rolling for Producing Bulk Ultrafine-grained Steel by Numerical Simulation, The 7th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials, 2010.8.3, Cairns Convention Centre, Australia.
- 2) 井上忠信, 木村勇次, 殷福星, 津崎兼彰, 落合庄治郎 ; 超微細結晶粒組織を有する低炭素鋼の衝撃特性, 日本鉄鋼協会第157回春季大会, 2010.3.28, 筑波大学.
- 3) 井上忠信 ; 数値シミュレーションを活用した超微細粒棒鋼創成における圧延パスの最適化, 日本機械学会 第19回設計工学・システム部門講演会, 2009.10.28, 読谷村役場文化センター (沖縄県読谷村).
- 4) 井上忠信 ; 巨大ひずみ加工におけるマクロ変形の定量的理解の重要性と初期結晶粒径の影響, 日本金属学会 2009年秋期大会, 2009.9.15, 京都大学吉田キャンパス.
- 5) T. Inoue, Y. Fuxing, Y.Kimura ; Effect of Deformation Mode on Texture of Ultrafine-grained Low Carbon Steel Processed by Warm Caliber Rolling, International Conference on THERMEC, 2009.8.27, MARITIM HOTEL, Berlin, Germany.
- 6) 井上忠信 ; 実機鍛造プレスによる超微細粒組織厚鋼板の試作, 日本塑性加工学会鍛造分科会, 2008.10.24, 日本製鋼所室蘭製作所.

〔図書〕（計1件）

T.Inoue ; “Finite element analysis”, Editor: David Moratal, SCIYO, Croatia, (2010), pp.589-610, Chapter 24: “Strain Variations on Rolling Condition in Accumulative Roll-bonding by Finite Element Analysis”

〔その他〕

<http://www.nims.go.jp/inoino/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

井上 忠信 (INOUE TADANOBU)

独立行政法人物質・材料研究機構・材料信頼性萌芽ラボ・主幹研究員  
研究者番号：90354274

### (2) 研究分担者

殷 福星 (YIN FUXING)

独立行政法人物質・材料研究機構・材料信頼性萌芽ラボ・主席研究員  
研究者番号：80354273

### (3) 連携研究者

木村 勇次 (KIMURA YUUJI)

独立行政法人物質・材料研究機構・新構造材料センター・主幹研究員  
研究者番号：80253483

中里 浩二 (NAKAZATO KOJI)

独立行政法人物質・材料研究機構・材料創製ステーション・主幹エンジニア  
研究者番号：10469778