

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 24 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010 ～ 2011 年度

課題番号：22760563

研究課題名（和文）

高精度塑性加工解析のための微小押込み試験による材料のマイクロ塑性流動特性評価

研究課題名（英文）

Evaluation of Micro Plastic Characteristic of Metals by Micro Indentation for Precise Analysis on Metal Forming

研究代表者

古島 剛 (FURUSHIMA TSUYOSHI)

首都大学東京 理工学研究科・助教

研究者番号：30444938

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、微小押込み試験を用いてマイクロ塑性流動特性の評価手法を確立し、それを用いた高精度塑性加工解析を実現することである。マイクロ塑性流動特性の評価方法として、微小押込み試験に着目し、アルミニウム合金、鋼板、銅合金、マグネシウム合金などの様々な材料に対し、結晶粒単位のマイクロ塑性流動特性の評価を行った。特に本研究では、押込み時に力を微小振動させる連続剛性測定法を用いてマイクロ塑性流動特性の評価を試みた。その結果、得られた硬さ—変位線図とマイクロ領域の応力—ひずみ曲線とは良い相関関係が得られなかったが、結晶粒ごとの硬さの値と変形抵抗のばらつきに良い相関関係があることがわかった。またマイクロ塑性流動特性の物理的な意味を明らかにするため、結晶粒の不均質性を考慮した有限要素モデルを提案し、解析を行った。その結果、不均質性有限要素解析の結果と微小押込み硬さ試験の結果、単軸引張試験の結果をもとに、有限要素解析で表現可能なマイクロ塑性流動特性として、材料のもつばらつきを評価することに成功した。また得られたばらつきのパラメータを考慮した不均質性有限要素解析によって、均質な有限要素解析では表現不可能な多軸応力下の自由表面あれ現象の高精度予測に成功した。自由表面あれ現象は、表面粗さの値だけでなく、粗さのプロファイルや3次元的な表面あれ進展も非常に良く予測されており、目標である塑性加工解析の高精度化に大きく寄与することができた。

研究成果の概要（英文）：

The purposes of this study are development of evaluating micro plastic characteristic by micro indentation and establishment of precise analysis on metal forming. As an evaluation method of micro plastic characteristic, the micro indentation tests are conducted for aluminum alloys, steels, copper alloys and magnesium alloys to evaluate the micro characteristic of crystal grain unit. As a result, hardness of each grain has a good correlation with variation in flow stress. In addition, a finite element (FE) model considering material inhomogeneity is developed to investigate the physical meaning of micro plastic characteristic. As a result, the material inhomogeneity as a micro plastic characteristic can be evaluated successfully by micro indentation test, uni-axial tensile test and simulation results. Furthermore, the free surface roughening behavior which cannot be expressed by uniform FE model can be predicted successfully by inhomogeneous FE model under axial stress state. Consequently, precise analysis on metal forming can be realized by these results.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：理工系・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：マイクロ加工，マイクロ塑性流動，微小硬さ試験，不均質性

1. 研究開始当初の背景

近年，医療機器，電子デバイスなど多くの分野で高精度な微細部品を安価に高速生産する技術として，マイクロ塑性加工が注目されている．しかしながら，従来のマクロスケールにおける塑性加工技術をそのままマイクロスケールに適用するのは簡単ではない．特に対象寸法が小さくなると結晶組織が，材料全体の变形挙動に及ぼす影響が非常に大きくなる．そのためマイクロ塑性加工の变形挙動を予測するためには，結晶粒サイズの力学的特性を把握することが重要である．

一方，マクロスケールの塑性加工解析においても，より高精度な解析を実現するため，ミクロの情報をもとにマクロの解析を行う，マルチスケール解析が注目されている．マルチスケール解析においても高精度な变形予測を行うためには，ミクロスケールにおいて材料を構成する個々の微小領域の物性を把握しておく必要がある．このようにマイクロ塑性加工やマルチスケール塑性加工解析の高精度化には，極狭小領域の力学的特性を求めることが重要であり，特にミクロな領域のマイクロ塑性流動特性を把握することが一つのカギである．

2. 研究の目的

本研究では，材料内の結晶サイズの極狭小領域のマイクロ塑性流動特性を評価する手法として微小押込み試験に着目する．具体的には，極狭小領域のマイクロ塑性流動特性の評価手法を解析的に評価するため，結晶粒を考慮した有限要素解析モデルを提案する．また実際の金属材料のミクロ領域の微小押込み試験を行い，マイクロ領域の变形挙動を解析の結果と併せて観察する．

その上でミクロの極狭小領域の塑性流動特性を得るための知見や問題点を整理し，微小押込み試験によるミクロ領域のマイクロ塑性流動特性を評価するための指針を明らかにする．

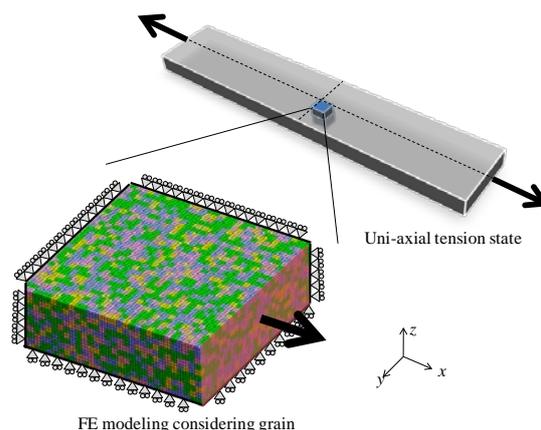
また得られたマイクロ塑性流動特性評価を利用した，新たな有限要素解析モデルを提案する．これまで用いられてきたマクロな材料特性では表現できない高精度な塑性加工解析の実現を試みる．

3. 研究の方法

(1) 結晶粒を考慮した有限要素モデルの提案

本研究では自由表面あれ挙動を予測するため結晶粒に見立てた各要素に変形抵抗差を与えることで材料の不均質性を表現した．FEM コードは MSC. Marc/ Mentat ver. 2005 を用いた．本モデルの概要を図 1 に示す．供試材料として厚さ 0.5mm の A5052-O, SPCC, C1220P-O の板材を用いた．引張試験と結晶組織観察より得られた供試材の材料特性値を Table 1 に示す．

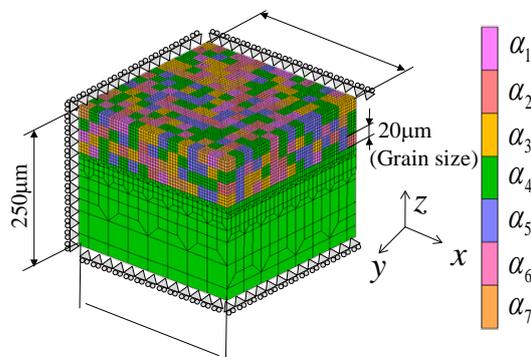
式(1)に示すように n 乗硬化型の变形抵抗にばらつき α_i を考慮し，材料特性を k 階級にランダムにモデルに分布させることで，材料内の不均質性を表現した．本研究では $k=7$ とした．



$$\sigma = \alpha_i \cdot K \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \quad (i=1,2,\dots,k) \quad (1)$$

(ただし $\alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_7$, $\alpha_4=1$)

(a) FE model under uni-axial tensile state

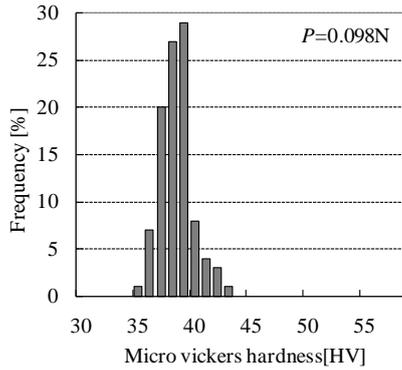


(b) FE model considering crystal grain

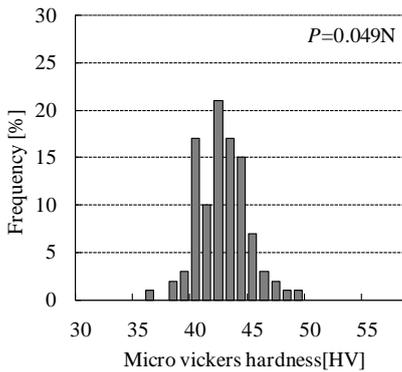
図 1 結晶粒を考慮した有限要素モデル

(2) 微小領域の押し込み試験

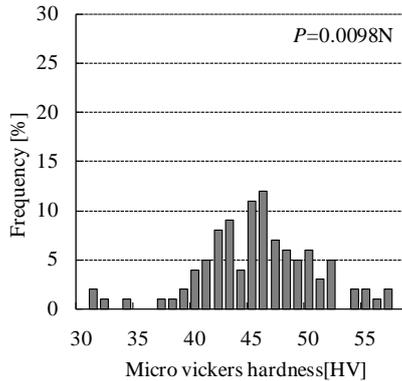
マイクロ塑性流動特性の評価を行うため、微小押し込み試験を行い、各種特性を評価した。まず荷重が硬さ試験結果に及ぼす影響を調査した。試験片は板厚 0.7mm のアルミニウム合金を用いた。押し込み荷重は 0.098, 0.049, 0.0098N とした。図 2 は硬さのばらつきに及ぼす押し込み荷重の影響を示したものである。荷重が小さくなると粗さのばらつきが大きくなっているのがわかる。



(a) Indentation load $P=0.098N$



(b) Indentation load $P=0.049N$



(c) Indentation load $P=0.0098N$

図 2 微小押し込み試験結果

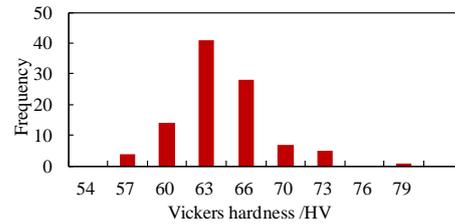
次に、材料の微小押し込み試験のばらつきと、材料の不均質性を表す評価指標として、自由表面あれ進展の度合いを表す材料定数 c との

関係を調べた。試験片はアルミニウム合金と SPCC を用いた。図 3 は各種材料の硬さのばらつきを示したものである。アルミニウム合金に比べて、SPCCの方がばらつきの度合いが大きいのがわかる。そこで、材料間で硬さのばらつきを比較するために、硬さのばらつきを式(2)で表す S_H を用いて評価した。 σ_H : 硬さのばらつきの標準偏差、 HV : 平均硬さ

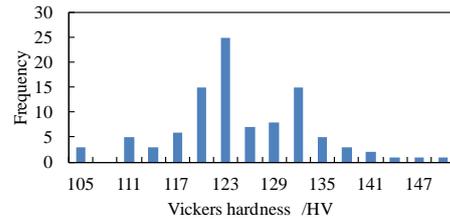
$$S_H = \sigma_H / HV \quad (2)$$

材料間の硬さのばらつきの標準偏差を図 4 に示す。

材料定数ともに SPCCの方がアルミニウム合金材より大きくなっていることがわかる。このことから不均質性が大きい材料ほど微小押し込み試験の硬さ値のばらつきが大きい材料といえる。

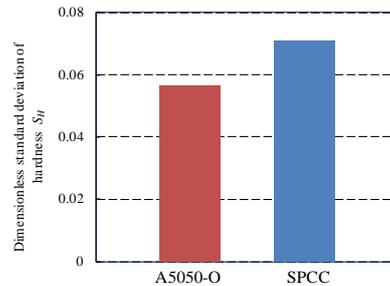


(a) アルミニウム合金

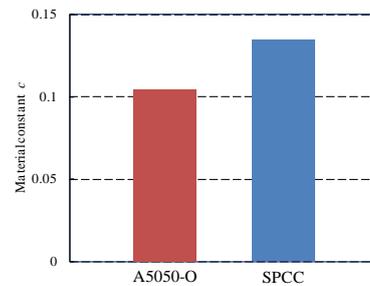


(b) SPCC

図 3 各種材料の硬さのばらつき



(a) 硬さのばらつき



(b) 不均質性パラメータ

図4 硬さのばらつきと不均質パラメータ

4. 研究成果

これまでに提案した有限要素解析モデルおよび微小押し込み試験の結果と、単軸引張試験で得られるマクロな塑性流動特性をもとに、高精度な塑性加工解析モデルの提案と、それを用いた自由表面あれ予測を行う。

(1) 供試材

供試材は厚さ 0.5mm の A5052-O, SPCC, C1220P-O の板材を用いた。引張試験より得られた供試材の材料特性値を表 1 に示す。

表 1 単軸引張試験から求めた材料特性

Material	E [GPa]	K-value [MPa]	n-value	UTS [MPa]	Elongation [%]	ϵ_0	Grain size [μm]
A5052-O	69	445	0.32	211	21	0.01	17
SPCC	206	577	0.23	327	46	0.01	11
C1220P-O	110	545	0.39	245	39	0.02	39

(2) 不均質パラメータ α の同定

本研究では材料の不均質性の新しい評価方法を提案する。材料の不均質パラメータの1つとして、材料固有のものであると考えられる「単軸引張変形における表面粗さ増加の傾き」に着目した。そして α の値を変化させながら、単軸引張変形下の粗さ増加の解析結果を実験結果にフィッティングさせることで不均質パラメータ α の値を同定し、その値を解析モデルに用いることで単軸引張以外の変形下の自由表面あれを予測できると考えた。

そこでまず、式(3)の $\alpha_1 \sim \alpha_7$ の値を変化させながら、数回表面あれの解析を繰り返し、単軸引張変形における表面粗さ増加の傾きが解析と実験で一致する α の標準偏差を調べた。例として図5にA5052-Oでの α の値を変化させた時の解析結果と、単軸引張試験より得られた表面粗さ増加の実験結果を示す。 α の標準偏差が0.20の時に、実験と解析で表面粗さ増加の割合が一致していることがわかる。他の材料に関しても同様の方法で不均質パラメータ α の値を決定した。表2に各材料で、解析と実験で単軸引張変形における表面粗さ増加の傾きが一致した際の α の値とその標準偏差を示す。引張速度は実際の引張試験とほぼ同じになるように、A5052-O 材：0.15 $\mu\text{m}/\text{s}$ 、SPCC：0.08 $\mu\text{m}/\text{s}$ 、C1220-P：0.3 $\mu\text{m}/\text{s}$ で解析を行った。

表 2 同定した各種材料の α 値

	Mat.1	Mat.2	Mat.3	Mat.4	Mat.5	Mat.6	Mat.7	Standard deviation of α
α (A5052-O)	0.61	0.74	0.87	1.00	1.13	1.26	1.39	0.20
α (SPCC)	0.31	0.54	0.77	1.00	1.23	1.46	1.69	0.35
α (C1220-P)	0.31	0.54	0.77	1.00	1.23	1.46	1.69	0.35

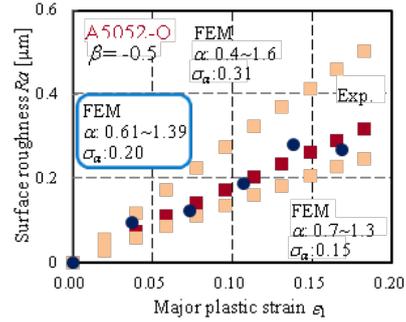
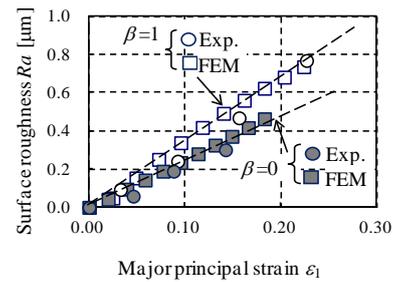


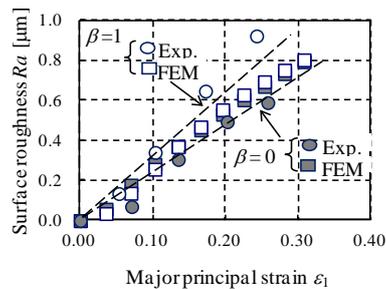
図 5 α 値の同定フィッティング (A5052-O)

(3) 多軸応力下における表面あれ挙動解析

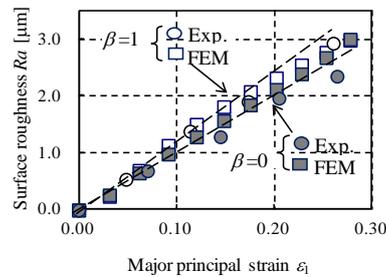
前節で決定した各材料の不均質パラメータ α の値および表1の材料特性値を用いて、等二軸および平面ひずみ引張変形下における自由表面あれ挙動の解析を行い、実験結果と比較した。ポアソン比は0.3、各解析は3回ずつ行い、その結果の中から一つ代表的なものを選びをプロットした。各解析結果を最大主ひずみで整理したものを図6に示す。



(a) A5052-O



(b) SPCC



(c) C1220P-O

図 6 自由表面あれ予測結果

A5052-O, C1220P-O では等二軸および平面ひずみ引張変形下ともに実験と解析で、表面粗さの値がよく一致している。SPCC では等二軸引張変形下でひずみが大きい領域で実験と解析で結果に若干差がみられるものの、全体としては両変形下でおおよそ良い一致が得られている。

以上の結果から、材料の不均質パラメータとして「単軸引張変形におけるひずみ増加に伴う表面粗さ増加の傾き」を解析モデルに反映させることで、等二軸および平面ひずみ引張変形下における巨視的な自由表面あれ挙動をおおよそ定量的に予測することができたと言える。

以上、不均質性有限要素解析の結果と微小押込み硬さ試験の結果、単軸引張試験の結果をもとに、有限要素解析で表現可能なマイクロ塑性流動特性として、材料のもつばらつきを評価することに成功した。また得られたばらつきのパラメータを考慮した不均質性有限要素解析によって、均質な有限要素解析では表現不可能な多軸応力下の自由表面あれ現象の高精度予測に成功した。本結果は、目標である塑性加工解析の高精度化に大きく寄与することができたといえる。

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4件)

- (1) **T. Furushima**, T. Masuda, K. Manabe: In-situ Observation and Anisotropy of Free Surface Roughening for Polycrystalline Metals, Key Engineering Materials, 443 (2010), 450-455
- (2) H.N. Lu, D.B. Wei, Z.Y. Jiang, K. Manabe, **T. Furushima**: Study on Size Effect in Micro Cross Wedge Rolling, Steel research International, 82, Special edition (2011), 962-967
- (3) **T. Furushima**, T. Masuda, K. Manabe, S. Alexandrov: Inhomogeneous 3D Finite Element Model for Prediction of Free Surface Roughening, Advanced Materials Research, 418-420 (2011), 1040-1043
- (4) **T. Furushima**, T. Masuda, K. Manabe, S. Alexandrov: Prediction of Free Surface Roughening by 2D and 3D Model Considering Material Inhomogeneity, Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, Vol. 5, No. 12 (2011), 978-990

〔学会発表〕(計10件)

- (1) **T. Furushima**, T. Masuda, K. Manabe: In-situ Observation and Anisotropy of Free Surface Roughening for Polycrystalline Metals, 9th Asia-Pacific Conference on Materials Processing (APCMP2010), 2010年6月, オース

トラリア, シドニー

- (2) **T. Furushima**, T. Masuda, K. Manabe: FE Simulation Considering Mesoscopic Material Inhomogeneity For Prediction of Free Surface Roughening, 6th International Conference on Micromanufacturing, 2011年3月, 日本, 東京
- (3) **古島 剛**, 増田 哲朗, 真鍋 健一: 材料の不均質性を考慮した多軸応力下における自由表面あれ挙動予測モデリング, 第61回塑性加工連合講演会, 2010年10月, 日本, 山形
- (4) **古島 剛**, 増田 哲朗, 真鍋 健一, メゾ領域の不均質性を考慮した材料構成式による多軸応力下の自由表面あれ予測, 日本機械学会第18回機械材料・材料加工技術講演会, 2011年11月, 日本, 東京
- (5) **T. Furushima**, T. Masuda, K. Manabe, S. Alexandrov, Prediction of Free Surface Roughening by 2D and 3D FE Model Considering Material Inhomogeneity, The JSME/ASME 2011 International Conference on Materials and Processing (ICM&P2011), June 2011, Oregon, USA
- (6) H. Lu, D. Wei, Z. Jiang, K. Manabe, **T. Furushima**, Analysis of Micro Cross Wedge Rolling of Metals, The 5th International Conference on Tube hydroforming (TUBEHYDRO2011), July 2011, Hokkaido, Japan
- (7) S. Alexandrov, K. Manabe, **T. Furushima**, Free Surface Roughness Prediction in Bending Under Tension, The 8th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes (NUMISHEET2011), Aug. 2011, Seoul Korea
- (8) **T. Furushima**, T. Masuda, K. Manabe, S. Alexandrov: Inhomogeneous 3D Finite Element Model for Prediction of Free Surface Roughening, The 2nd International Conference on Advances in Materials and Manufacturing Processes (ICAMMP2011), Dec. 2011, Guilin, China
- (9) **古島 剛**, 増田 哲朗, 真鍋 健一, S. Alexandrov: 不均質性を考慮した有限要素解析による多軸応力下の自由表面あれ挙動と連続観察, 平成23年度塑性加工春季講演会, 2011年5月, 日本, 東京
- (10) **T. Furushima**: Material Inhomogeneity Modeling for Micro Metal Forming, The 2nd International Conference on Advances in Materials and Manufacturing Processes (ICAMMP2011), Dec. 2011, Guilin, China 【基調講演】

6. 研究組織

(1)研究代表者

古島 剛 (FURUSHIMA TSUYOSHI)

首都大学東京 理工学研究科・助教

研究者番号：30444938