

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760077

研究課題名(和文)結晶異方性を考慮したサブグレインスケールの微視的応力・ひずみ分布測定手法の構築

研究課題名(英文) Measurement of Microscopic Stress and Strain Distribution at Sub-grain Scale Considering Crystalline Anisotropy

研究代表者

三上 欣希 (Mikami, Yoshiki)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：40397758

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：金属系構造材料の変形・破壊挙動を明らかにするためには、結晶粒レベルの微視的な応力・ひずみ分布を把握することが重要である。本研究では、デジタル画像相関法による材料表面の変位・ひずみ分布の計測、結晶異方性を考慮した結晶塑性論による応力・ひずみ分布の有限要素解析を実施した。また、デジタル画像相関法によって測定した材料表面の見かけの変形を達成できるような結晶のすべり変形を、結晶の異方性変形挙動を考慮して決定する手法を提案した。本手法を用いて決定したすべり変形量に基づいて各結晶粒の応力を推定し、微視的応力分布を算出することができた。

研究成果の概要(英文)：The evaluation of the microscopic stress or strain distribution at crystalline scale is essential in the investigation of the deformation and fracture behavior of structural metallic materials. In this study, the following two approaches were taken: (1) Measurement of displacement and strain on the specimen surface by digital image correlation (DIC) technique, (2) Numerical simulation of microscopic stress and strain distribution considering crystal anisotropy and crystal plasticity. Additionally, a method to determine slip deformation at crystalline scale that can reproduce the measured deformation obtained by DIC approach on the specimen surface was proposed. Microscopic stress distribution was estimated based on the determined slip deformation considering crystalline orientation.

研究分野：微視的材料強度学

キーワード：微視的ひずみ 微視的応力 結晶方位 デジタル画像相関法 結晶塑性論 有限要素解析

1. 研究開始当初の背景

金属系構造材料の破壊を結晶粒レベルで考えると、すべりが結晶粒界で阻止されて生じる応力集中、その結果として生じる結晶粒界の割れや結晶粒のへき開破壊など、結晶粒のオーダーは、重要な基本単位であることは明らかである。したがって、破壊の現象を結晶粒レベルで明らかにするためには、ひずみや応力を、結晶粒内での分布が把握できるようなスケール、すなわち、サブグレインスケールの空間分解能で評価することが重要である。既存のひずみや応力の測定手法を、空間分解能とマッピングの難易度で整理して図1に示した。

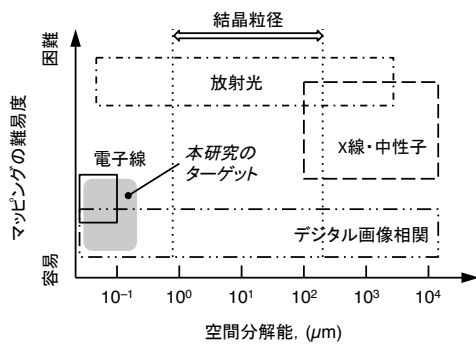


図1 既存のひずみ・応力測定手法の空間分解能およびマッピングの難易度。

X線回折法や中性子回折法の空間分解能は、ビーム径に依存し、最高でも100 μm程度であるため、結晶粒内の分布を測定することは困難である。放射光を活用すれば、0.1 μm程度の空間分解能を達成できるものの、マシンタイムの確保など、使用上の制約が極めて大きいのが現状である。また、これらの手法では、信頼性の高い測定値を得るためには、1箇所の測定に十分な時間をかける必要があり、ひずみや応力をマッピングすることは困難である。

実験室レベルで使用可能で、0.1 μm程度の空間分解能を有する手法として、主に結晶方位の測定に用いられる後方散乱電子線回折 (EBSD, electron backscatter diffraction) 法がある。近年では、ひずみや応力の評価への適用も試みられているが、測定理論の確立には至っていないのが現状である。しかし、結晶方位による異方性変形挙動は、結晶粒オーダーでの測定では顕著になることが予想されるので、結晶方位マップを得られるEBSD法を有効に活用することは重要である。

一方、変形前後の結晶組織の画像を用いて、デジタル画像相関 (DIC, digital image colleration) 法により、高い空間分解能でひずみを算出することも可能である。ただし、DIC法では、測定画像における見かけの面内ひずみしか測定できないという課題がある。

2. 研究の目的

そこで、本研究では、DIC法による微視的ひずみ測定に、EBSD法によって得られる結晶方位の情報を導入し、結晶方位による異方性変形挙動を考慮することで、ひずみテンソルを同定する手法を構築する。ひずみテンソルを同定できれば、結晶異方性を考慮して微視的応力分布を推定することも可能になる。本研究においては特に、引張負荷作用下に条件を限定して、結晶粒レベルのひずみおよび応力の測定手法を構築することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 微小引張試験

図2に示す形状および寸法の微小引張試験片を放電加工により作成し、引張試験を行った。供試材には熱処理により結晶粒を粗大化させたオーステナイト系ステンレス鋼を用いた。引張試験はデジタルマイクロ스코プの観察下で実施し、試験中の表面画像を複数の負荷レベルにおいて撮影した。撮影した画像は、(2)においてデジタル画像相関法による変位およびひずみ分布の計測に用いた。

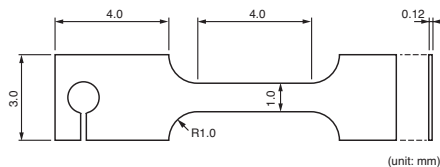


図2 微小引張試験片の形状および寸法。

(2) デジタル画像相関法による微視的変位分布および微視的ひずみ分布の計測

(1)で撮影した引張試験片表面画像を用いて、デジタル画像相関法により微視的変位分布および微視的ひずみ分布を算出した。デジタル画像相関法による変位算出が可能な試験片表面のデジタル画像を取得するため、微小引張試験片表面の研磨および腐食などの処理条件の検討、ならびに、デジタルマイクロ스코プによる撮影時の倍率や解像度などの撮影条件についても検討を行った。

(3) 結晶塑性有限要素解析による微視的ひずみ分布および微視的応力分布の数値解析

デジタル画像相関法による微視的変位分布および微視的ひずみ分布の計測結果と比較・考察するために、(1)で実施した微小試験片を用いた引張試験を対象として、結晶塑性論に基づく有限要素解析を実施した。数値解析モデルに導入するための結晶粒形状および結晶方位の情報を取得するため、EBSD法による結晶方位測定も実施した。結晶方位測定結果を図3に示す。また、数値解析に用いた有限要素モデルを図4に示す。作成した引張試験片の平行部のみをモデル化した。

結晶塑性論に用いる材料パラメータ (初期すべり抵抗  $\tau_0$ 、飽和すべり抵抗  $\tau_s$ 、すべり硬化係数  $\gamma$ ) については、直接測定すること

は困難であるが、これまでにその決定方法は必ずしも明確にされていなかったため、微小試験片を用いた引張試験結果に基づいて決定する方法についても検討した。



図3 結晶方位測定結果.

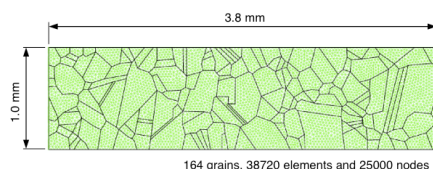


図4 多結晶体の有限要素モデル.

(4) 微視的ひずみ分布と結晶方位を考慮した微視的応力算出手法の構築

微視的ひずみ分布測定結果を利用した微視的応力分布の算出手法を構築した。デジタル画像相関法で測定された見かけの変形を達成できるようなすべり変形を、結晶方位を考慮して決定した。具体的には、DIC法で測定されたひずみを塑性変形によるものと見なし、塑性変形はシュミット因子によって決まるすべり面・すべり方向に沿うすべり変形により生じると仮定して、すべり変形による塑性仕事が最小になるように、各すべり系のすべり変形量を算定した。算出されたすべり変形量より各結晶粒の応力値を決定し、微視的応力分布を求めた。

4. 研究成果

(1) 微視的変位分布および微視的ひずみ分布の測定

微小試験片の引張試験中に撮影した試験片の表面画像を用いて行ったDIC法により、微視的変位分布および微視的ひずみ分布を測定することができた。測定結果の一例として、引張方向のひずみ分布を図5に示す。他のひずみ成分についても同様に測定されている。また、図6に示すように、表面画像において粒界三重点などの特徴的な点の変位量から幾何学的に算出したひずみ量(AF, BG, CH)とDIC法により測定したひずみ量は、定量的に対応していることを確認した。このように、結晶粒レベルにおける変位およびひずみ算出が可能となった。

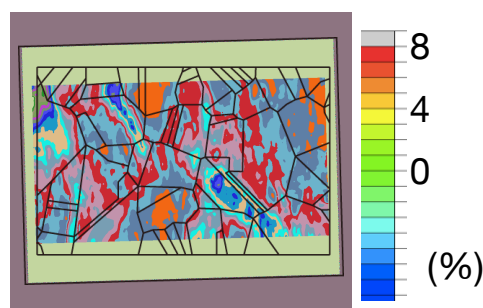


図5 引張方向のひずみ分布測定結果.

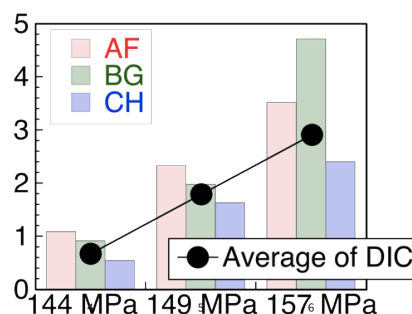


図6 DIC法によるひずみ測定結果と幾何学的に算出したひずみ量との比較.

(2) 結晶塑性有限要素解析における材料パラメータの影響の明確化

本研究においては、微小試験片の引張試験を対象として、結晶塑性有限要素法による評価も実施した。多結晶有限要素モデルは、微小試験片表面でEBSD法により測定した結晶粒形状および結晶方位に基づいて作成した。ただし、測定領域の制約により試験片平行部のみを測定したが、結晶塑性有限要素法による数値解析を実施する際の境界条件についても検討し、適切な設定方法を見出すことができた。また、結晶塑性有限要素法で使用する材料パラメータについても、個々の結晶について実験により測定することは困難であり、その決定手法を構築する必要があった。そこで、微小引張試験によって得られた応力ひずみ曲線を、多結晶有限要素モデルを用いた結晶塑性有限要素解析により再現できるような材料パラメータを同定することを試みた。微小引張試験および多結晶有限要素モデルを用いた結晶塑性有限要素解析によって得られた応力ひずみ曲線を比較して図7に示す。このように、結晶塑性論で使用する材料パラメータを適当に設定することにより、多結晶体の引張試験結果を多結晶モデルの数値解析によって再現することができた。

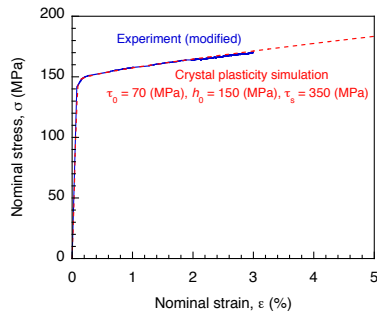


図7 微小引張試験および結晶塑性有限要素解析によって得られた応力ひずみ曲線の比較。

その一方で、見かけ上、同一の応力ひずみ曲線となっても、結晶塑性有限要素法で使用する材料パラメータは一意には決定できないという課題も明らかになった。そこで、同一の応力ひずみ曲線を再現するような複数の材料パラメータの組合せについて、数値解析によって得られる微視的な応力分布がどのように変化するかを検討した。その結果に基づくと、同一の応力ひずみ曲線が再現されていれば、材料パラメータの組合せが異なっても微視的な応力分布はほとんど影響を受けないことが示された。この結果は、微視的な応力分布を評価するための結晶塑性有限要素法における適切な材料パラメータの決定手法のひとつになると考えられる。

(3) デジタル画像相関法による微視的変位分布およびひずみ分布測定結果と数値解析結果の比較

DIC法による微視的ひずみ測定手法と、結晶塑性論に基づく有限要素解析手法の比較・考察を実施した。微小試験片を用いた引張試験を対象として、微視的変位分布および微視的ひずみ分布の測定結果と数値解析結果を比較した。微視的変位分布の比較を図8に、微視的ひずみ分布の比較を図9に示す。

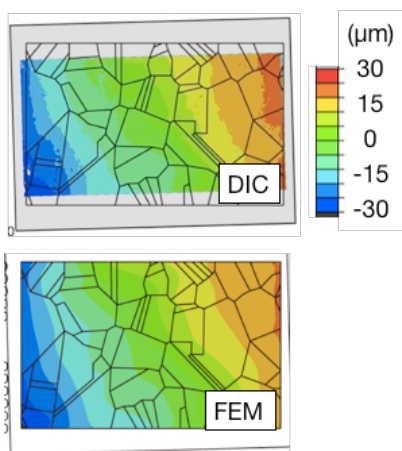


図8 微小引張試験および結晶塑性有限要素解析によって得られた変位分布の比較。

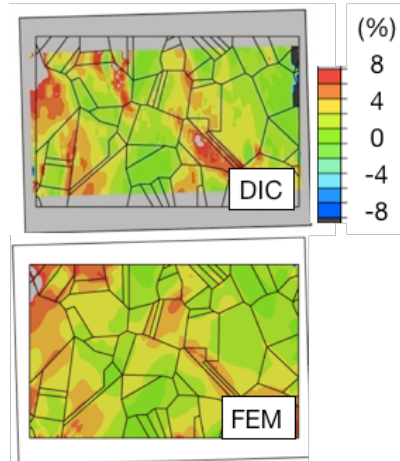


図9 微小引張試験および結晶塑性有限要素解析によって得られたひずみ分布の比較。

変位分布に関しては、両者が良好に一致することを確認できた。ただし、すべり変形の局在化などにより、局所的に変形が集中している部分もあり、そのような変形挙動については、結晶塑性論に基づく有限要素解析では確認できないことも明らかになった。同様に、微視的ひずみ分布についても、局所的に集中している部分は存在するものの全体として測定結果と数値解析結果はよく対応しており、本研究で構築した微視的ひずみ分布測定手法が有用であることを確認できた。

(4) 結晶方位を考慮した微視的応力推定手法の構築

微視的ひずみ分布測定結果を利用した微視的応力分布の算出手法を構築した。デジタル画像相関法で測定された見かけの変形を達成できるようにすべり変形を、結晶方位を考慮して決定した。本手法においては、デジタル画像相関法で測定されたひずみを塑性ひずみと見なし、塑性変形はシュミット因子によって決まるすべり変形により生じると仮定して、すべり変形による塑性仕事が最小になるように、各すべり系のすべり変形量を算出した。算出されたすべり変形量より各結晶粒の応力値を決定し、微視的応力分布を求めた。本手法は、材料の結晶方位による変形の不均一性を考慮して応力を算出する手法となる。現時点で、本手法の定量性を確認できる実験手法がなく、実験結果との比較による定量性の確認はできていないが、同一の結晶方位および引張条件を設定した結晶塑性有限要素解析結果との比較を行った。その結果を図10に示す。発生する応力値のレベルや、高い応力が発生する結晶粒などはよく対応していることが確認できている。

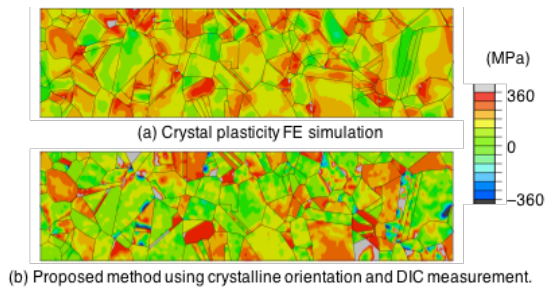


図 10 結晶塑性有限要素解析および提案手法によって得られた微視的応力分布の比較。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- ① Kazuo ODA, Yoshiki MIKAMI and Masahito MOCHIZUKI, Estimation of Three-dimensional Microscopic Strain Components by Digital Image Correlation and Crystal Orientation Analysis, 溶接学会論文集, 31, 4, 2013, 163s-167s, 査読あり  
doi.org/10.2207/qjaws.31.163s
- ② 三上欣希, 望月正人, 鋼溶接金属の結晶方位異方性を考慮した微視的応力分布特性の数値解析, 鉄と鋼, 100, 2014, 1281-1288, 査読あり  
doi.org/10.2355/tetsutohagane.100.1281

〔学会発表〕(計 7 件)

- ① Y. Mikami, K. Oda and M. Mochizuki, Experimental Evaluation of Microscopic Strain Distribution by Digital Image Correlation Incorporating Crystalline Orientation, 65th Annual Assembly and International Conference of the International Institute of Welding, 2012 年 7 月 9 日-11 日, デンバー(アメリカ)
- ② 小田 和生, 三上 欣希, 望月 正人, デジタル画像相関法と結晶方位解析を併用した微視的三次元ひずみ算出手法の構築, 溶接学会 平成 24 年度秋季全国大会, 2012 年 9 月 26 日-28 日, 奈良県文化会館・奈良商工会議所(奈良県奈良市)
- ③ Kazuo ODA, Yoshiki MIKAMI and Masahito MOCHIZUKI, Estimation of Three-dimensional Microscopic Strain Component by Digital Image Correlation and Crystal Orientation Analysis, The International Symposium on Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation (Visual-JW 2012), 2012 年 11 月 28 日-30 日, ホテル阪急エキスポパーク(大阪府吹田市)
- ④ Yoshiki Mikami and Masahito Mochizuki, Numerical Simulation of Microscopic Stress Distribution in Polycrystalline

Materials Considering Hardening due to Irradiation, 3rd International Conference on Material Modeling (ICMM3), 2013/9/8-11, ワルシャワ(ポーランド)

- ⑤ 小田和生, 三上欣希, 望月正人, デジタル画像相関法に基づく多結晶金属の多重すべりを考慮した微視的変形挙動推定手法の提案, 日本保全学会 第 10 回学術講演会, 2013/7/25-26, ホテル阪急エキスポパーク(大阪府吹田市)
- ⑥ Y. Mikami, K. Oda, M. Mochizuki, Determination of Microscopic Strain Components by Digital Image Correlation in Combination with Crystal Orientation Information, 16th International Conference on Experimental Mechanics, 2014/7/7-11, ケンブリッジ(イギリス)
- ⑦ Y. Mikami, K. Oda and M. Mochizuki, Application of Digital Image Correlation Technique to Evaluation of Grain-scale Microscopic Strain Distribution, 67th Annual Assembly of International Institute of Welding, 2014/7/13-18, ソウル(韓国)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

三上 欣希 (MIKAMI, Yoshiki)

大阪大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 40397758