



Quantitative Evaluation of the Relationship between Strain and Color Change in Opal Photonic Crystal Films and Application into Complex Specimen Geometries

Yutao ZHOU^{1,2}), Zhipeng YANG^{1,2}), Motomichi KOYAMA¹)*, Saya AJITO¹), Tomohiko HOJO¹), Hiroshi FUDOUZI³) and Eiji AKIYAMA^{1,3})

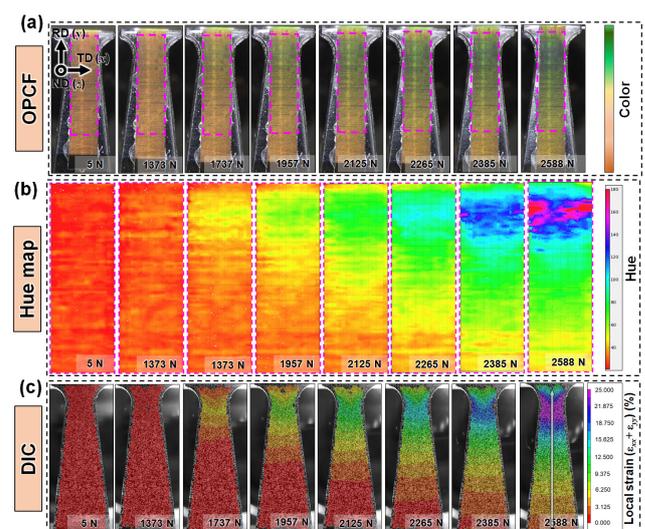
1) Institute for Materials Research, Tohoku University

2) Department of Quantum Science and Energy Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University

3) National Institute for Materials Science

Abstract: The color change of opal photonic crystal films (OPCFs) due to deformation was quantitatively evaluated using digital image correlation (DIC) analysis. OPCFs were pasted on specimens of three different gauge geometries, and random patterns were formed on the opposite side of each specimen for DIC analysis. To assess the applicability of using OPCFs-based strain characterization for analyzing steel structural components and associated metallurgical analyses, smooth, width-gradient, and holed specimens were prepared in this study. As deformation increased in the smooth specimen, the color of the OPCFs changed significantly. The color change in the OPCFs could be quantitatively converted into strain values through Hue value analysis. Heterogeneous strain distributions could also be quantitatively analyzed using OPCFs-based analysis at the submillimeter or millimeter scale. When the strain gradient is too high, for example, near a stress concentration site such as a hole, local peeling of the OPCFs away from the specimen surface can occur. Consequently, for quantitative characterization, we must take proper care when measuring this upper limit of the “strain gradient” as well as strain, which would depend on the adhesion and surface condition of the specimen.

Keywords: strain visualization; strain mapping; opal photonic crystal films; digital image correlation.



Received March 27, 2023; Accepted April 10, 2023; Advance online published April 15, 2023; Published February 15, 2024; Originally published in ISIJ Int., Vol.62, 2022, No.10, pp.2061-2068

* Corresponding author. E-mail: motomichi.koyama.c5@tohoku.ac.jp, Address: Tohoku University, 2-1-1 Katahira Aoba-ku Sendai Miyagi 980-8577



© 2024 The Iron and Steel Institute of Japan. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

オパールフォトリック結晶膜の色調変化— ひずみ関係の定量評価および複雑形状試験片への適用

周 宇涛^{1,2)}・楊 志鵬^{1,2)}・小山 元道¹⁾*・味戸 沙耶¹⁾・
北條 智彦¹⁾・不動寺 浩³⁾・秋山 英二^{1,3)} 

Quantitative Evaluation of the Relationship between Strain and Color Change
in Opal Photonic Crystal Films and Application into Complex Specimen Geometries
Yutao ZHOU, Zhipeng YANG, Motomichi KOYAMA, Saya AJITO, Tomohiko HOJO, Hiroshi FUDOUZI and Eiji AKIYAMA

1. 緒言

代表的な構造用材料である鉄鋼材料では、平滑材で得られる単純化された力学特性の他に、自動車用部材などにみられる複雑な構造体の力学的なパフォーマンスも重要視される¹⁻⁴⁾。それら構造体の強度や寿命は応力集中の程度や内在する局所塑性ひずみに依存する⁵⁻⁷⁾。このため、平滑材の力学特性が優れていたとしても、例えば単軸引張負荷の力学場であっても、部材形状に由来した局所応力やひずみの影響で想定される強度や寿命よりも低い特性が現れることがある⁸⁻¹¹⁾。さらに、多くの構造部材は製品として要求される特定の形状やサイズを満たすために複雑な塑性加工履歴を経ている。それら塑性加工は少なからず部材中に欠陥や局所内部応力を生じさせ、より複雑な変形や不均一変ひずみを生じさせる¹²⁻¹⁴⁾。よって、構造体としてのパフォーマンスを改善するためには、マクロ、メゾ、マイクロスケールの変形不均一性を解析する必要がある。

これまでに画像相関法 (DIC)¹⁵⁻¹⁹⁾、マクログリッドマーカ法^{20,21)}、サンプリングモアレ法^{22,23)}などのひずみ解析法が開発されている。更に近年では、シリコンエラストマーとポリスチレン球状粒子で構成されたオパールフォトリック結晶膜 (OPCF) を用いたひずみ可視化シートが開発された。ポリスチレン粒子は面心立方格子 (FCC) を構成しており、FCC構造の{111}面がOPCF表面と平行になるように配向している。ある特定の波長を有する可視光がFCCの{111}面に対してブラッグ条件を満たすとき、そ

の波長に対応する色が現れる²⁴⁻²⁶⁾。現れる色は変形に伴う{111}面間隔の低下に対応して変化するので、OPCFは色変化を通してひずみ分布を可視化させられる^{27,28)}。OPCFによるひずみ可視化の利点は、サブmmスケールの分解能と広い観察視野を兼ね備えることだけではなく、試料表面状態に特別な要求がないことにある²⁷⁾。つまり、OPCFは様々な試験片形状に対して、メゾおよびマクロスケールのひずみ勾配を可視化できる。

本研究では、様々な形状を有する試験片に対して引張変形を与えた際のひずみ勾配をOPCFで可視化し、その適用可能性を示す。また、OPCFで得られた変形中のひずみ分布をDIC法により得たひずみ分布と比較をし、局所ひずみの定量的評価を行う。さらに、得られた局所ひずみと微視組織発達の相関も調査することで将来的な金属組織学的解析への利用可能性も示す。

2. 実験方法

本研究では、四つの理由からオーステナイト系ステンレス鋼の一種であるSUS304をひずみ分布解析の対象材料として選択した。(1) SUS304は代表的な商業材料であり本手法の汎用材への適用可能性を示す一例として適している。(2) 伸びが大きいため、大変形への適用可能性も評価可能である。(3) 変形誘起マルテンサイト量がひずみ発達とともに増大するため、局所ひずみと微視組織発達の関係において定量評価が容易である。(4) 加工硬化能が高く、試験

原著論文: ISIJ Int., Vol.62 (2022), No.10, pp.2061-2068

2023年3月27日受付 2023年4月10日受理 2023年4月15日早期公開 2024年2月15日発行 (Received March 27, 2023; Accepted April 10, 2023; Advance online published April 15, 2023; Published February 15, 2024; Originally published in ISIJ Int., Vol.62, 2022, No.10, pp.2061-2068)

1) 東北大学金属材料研究所 (Institute for Materials Research, Tohoku University)

2) 東北大学大学院量子エネルギー工学専攻 (Department of Quantum Science and Energy Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University)

3) 国立研究開発法人物質・材料研究機構 (National Institute for Materials Science)

* Corresponding author. E-mail: motomichi.koyama.c5@tohoku.ac.jp, Address: Tohoku University, 2-1-1 Katahira Aoba-ku Sendai Miyagi 980-8577



© 2024 The Iron and Steel Institute of Japan. This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.ja>).

片形状に由来した応力集中が大きい場合もマクロ塑性変形が長く継続される。このためSUS304は、穴などの人工的な応力集中源を対象にひずみ勾配を解析するために適している。今回用いたSUS304板の厚さは1 mmであり、化学成分はTable 1に示す通りである。受入れ材の初期組織は等軸粒を有しており (Fig.1 (a)), 変形前はオーステナイト単相で構成されている (Fig.1 (b))。

試験片形状は三種類とした。まずは二つの目的のため平滑試験片を準備した (Fig.2 (a))。OPCFの色調変化とひずみ量の関係を定量的に評価することが第一の目的である。第二の目的は、DIC法による解析も同時に行うことで、OPCFとDIC法で得たひずみの分布の対応を観察することである。具体的には、マクロな色調変化、マクロなひずみ、ならびにひずみ成分の定量的関係を調査した。二種類目の試験片では、試験片長手方向に単調なひずみ勾配を与えるため、幅に勾配を持たせた (Fig.2 (b))。以降、これを幅勾配材と呼称する。平滑材と同じく、試験片長さ方向に沿ったひずみプロファイルをOPCFとDIC法で測定し、それらを比較することで妥当性の検証を行った。最後に、人工応

力集中源近傍のひずみ分布に対するOPCFの適用可能性を検証するため、三種類目の試験片には穴を導入した (Fig.2 (c))。以降、これを穴材と呼称する。

引張試験は島津製作所製引張試験機を用いて、室温にて行った。クロスヘッド変位速度は平滑材、幅勾配材、穴材の試験に対してそれぞれ0.0008, 0.0016, 0.002 mm/sに設定した。引張試験中の局所ひずみ分布はDIC法およびOPCFを用いて測定した。試験片の片面は白色のエナメルで被覆し、その上にDIC用ランダムパターンとしてスプレーで黒点を塗布した。もう一方の試料表面には、ポリエチレンテレフタレートシート上に積層されたOPCFを長さ20 mm, 幅3 mmまたは4 mmに切り出し、貼り付けた。以降は、ポリエチレンテレフタレート上にOPCFを積層されたものをひずみ可視化シートと呼称する。ひずみ可視化シートの貼り付けには、非溶剤型樹脂であるエポキシ樹脂プライマー接着剤とエポキシ樹脂硬化剤の混合物を用いた。その他詳細は前報²⁷⁾を参照されたい。穴材を使用する際は、ひずみ可視化シートは穴を覆うように貼り付けた。OPCFから反射した可視光の初期波長は分光光度計を用いて測定した。この際、光の入射角がひずみ可視化シートに対して垂直となるようにセットし、OPCFの反射スペクトルを測定した。DIC解析およびOPCF観察のため、引張試験中の各試験片の平行部両面を市販デジタルカメラにて観察した。実験のセットアップの模式図をFig.3に示す。カメラの角度は試験片表面 (ひずみ可視化シート) に対して垂直となるようにセットした。よって、デジタルカメラで観察された可視光の反射角は約0°とみなせる。DIC解析には専用ソフトウェアVic2Dを用いた。DIC解析の際のステップサイズおよびサブセットサイズはそれぞれ7ピクセルおよび29×29ピクセルに設定した。

ひずみ可視化シートを撮影した94×489ピクセルのデジ

Table 1. Chemical composition and some parameters of the austenitic stainless steel in this work.

C (%)	Mn (%)	Cr (%)	Ni (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	M_{d30} (°C) ^{a)}
0.05	1.09	18.3	8.21	0.54	0.004	0.005	47.4

^{a)} $M_{d30} = 413-462(C+N)-9.2Si-8.1Mn-13.7Cr-9.5Ni-18.5Mo^{31)}$, where M_{d30} is the temperature at which 50% of martensite formed after 30% strain.

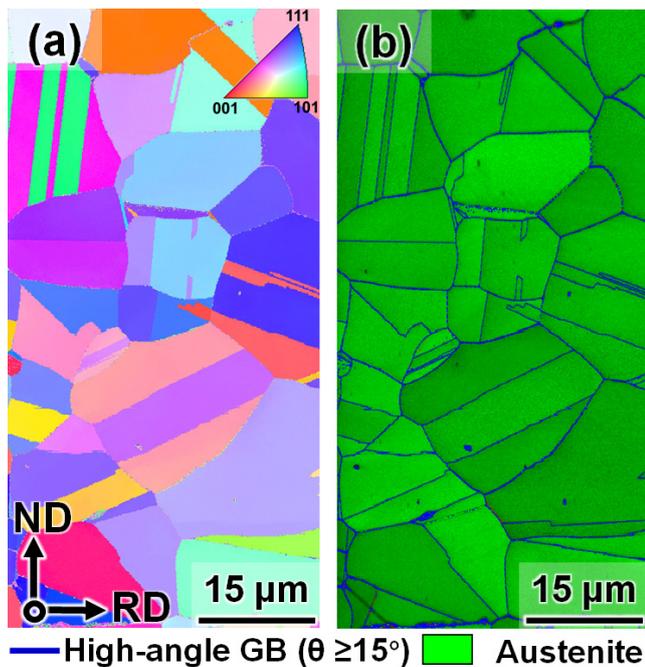


Fig. 1. Initial microstructure of the present steel. (a) Inverse pore figure (IPF) map, and (b) phase map with indications of grain boundaries (GB). ND and RD represent the normal direction and rolling direction, respectively. (Online version in color.)

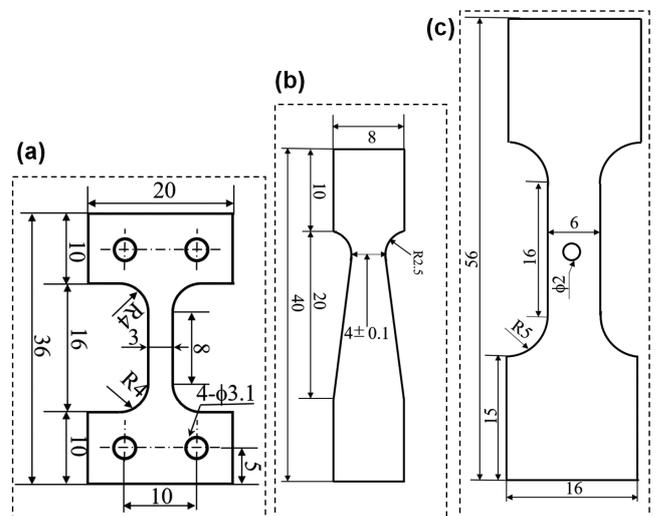


Fig. 2. Geometries of the (a) smooth specimen, (b) specimen with a width-gradient, and (c) holed specimen.

タルカメラ画像はRGB (Red-Green-Blue) データを基に解析した。本研究ではRGB値をHue値に換算し、各変形段階のひずみ分布を可視化するために用いた。RGB値からHue値(H)への変換は式(1)および式(2)により行った^{29,30)}。

$$C_{max} = \max(R, G, B)$$

$$C_{min} = \min(R, G, B) \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta = C_{max} - C_{min}$$

$$H = \begin{cases} 0^\circ & \Delta = 0 \\ 60 \times \left(\frac{G-R}{\Delta} \right) + 60 & C_{min} = B \\ 60 \times \left(\frac{B-G}{\Delta} \right) + 180 & C_{min} = R \\ 60 \times \left(\frac{R-B}{\Delta} \right) + 300 & C_{min} = G \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

幅勾配材に対しては、準安定オーステナイトの変形誘起変態挙動を解析するために電子後方散乱回折 (EBSD) 測定を行った。試料表面を#180, #320, および#600の耐水研磨

紙で研磨後、9 μm, 3 μmのダイヤモンドスラリーならびに直径60 nm粒子のコロイダルシリカでバフ研磨を行った。EBSD測定は加速電圧20 kV, ビームステップサイズ0.1 μmで行った。

3. 結果および考察

3・1 三種類の試料におけるマクロ応力ひずみ応答

Fig.4に平滑材, 幅勾配材および穴材の荷重-変位曲線および公称応力-公称ひずみ曲線を示す。青三角はひずみ可視化解析を行った変形段階を示している。平滑材で得られた結果によると、降伏強度, 引張強度ならびに均一伸びはそれぞれ319 MPa, 794 MPa, 63%であった。予想通り, 幅勾配材は最も幅が狭い部分で破断し, その伸びは平滑材よりも小さかった (Fig.4 (b))。穴材は穴縁近くで変形の集中が起こり, 破断した。このときの伸びは平滑材および幅勾配材のいずれよりも小さかった。次節では, 異なる変形勾配に由来したひずみ発達挙動をDICおよびひずみ可視化シートにより解析する。

3・2 平滑材

Fig.5 (a) に各変形段階における平滑材に貼り付けたひずみ可視化シートの色調変化を示す。前報の通り, OPCFの色は変形とともに赤から緑へと変化した²⁴⁻²⁸⁾。色調変化を定量化するために, 各変形段階で試験片平行部におけるHue値の分布を解析した (Fig.5 (b))。Fig.6 (a) に示すように, 平行部の平均Hue値を公称ひずみに対してプロットした。平均Hue値は公称ひずみに対してほぼ線形に増加している。ここで, OPCFの色調変化に対応するひずみは厚さ方法に沿った ϵ_{zz} であることに注意されたい。つまり, 波長 λ として物理的に表現される色調変化は面内変形と以下の定量的な関係がある。

$$\lambda = 2D \left(1 - \frac{\nu}{1-\nu} (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}) \right) \sqrt{n_{eff}^2 - \sin^2 \theta} \dots\dots\dots (3)$$

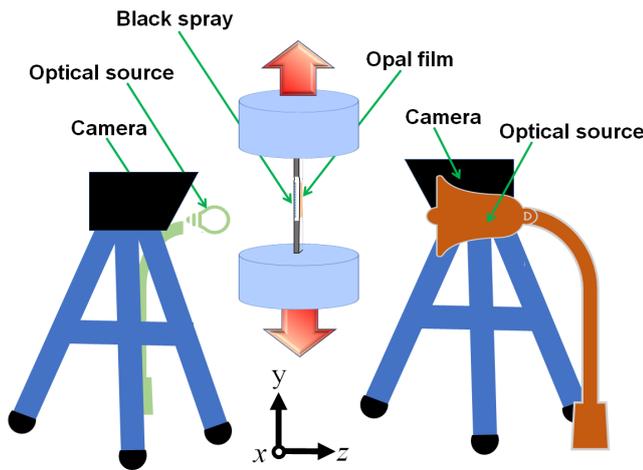


Fig. 3. Schematic diagrams of the tensile experiment for the strain visualization. (Online version in color.)

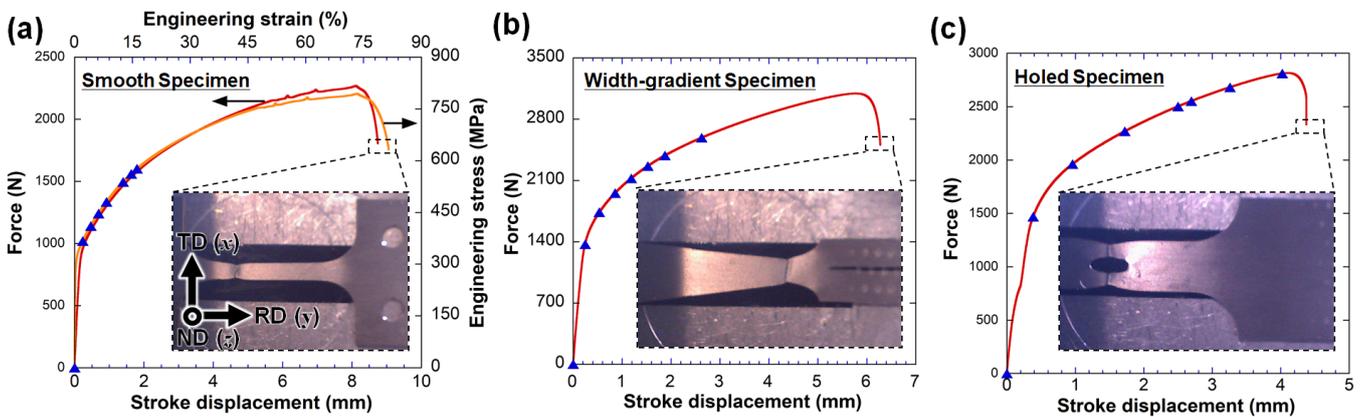


Fig. 4. Force-stroke displacement curves of (a) smooth, (b) width-gradient, and (c) holed specimens. The insets display the shape of the specimen after the fracture. TD represents the transverse direction. (Online version in color.)

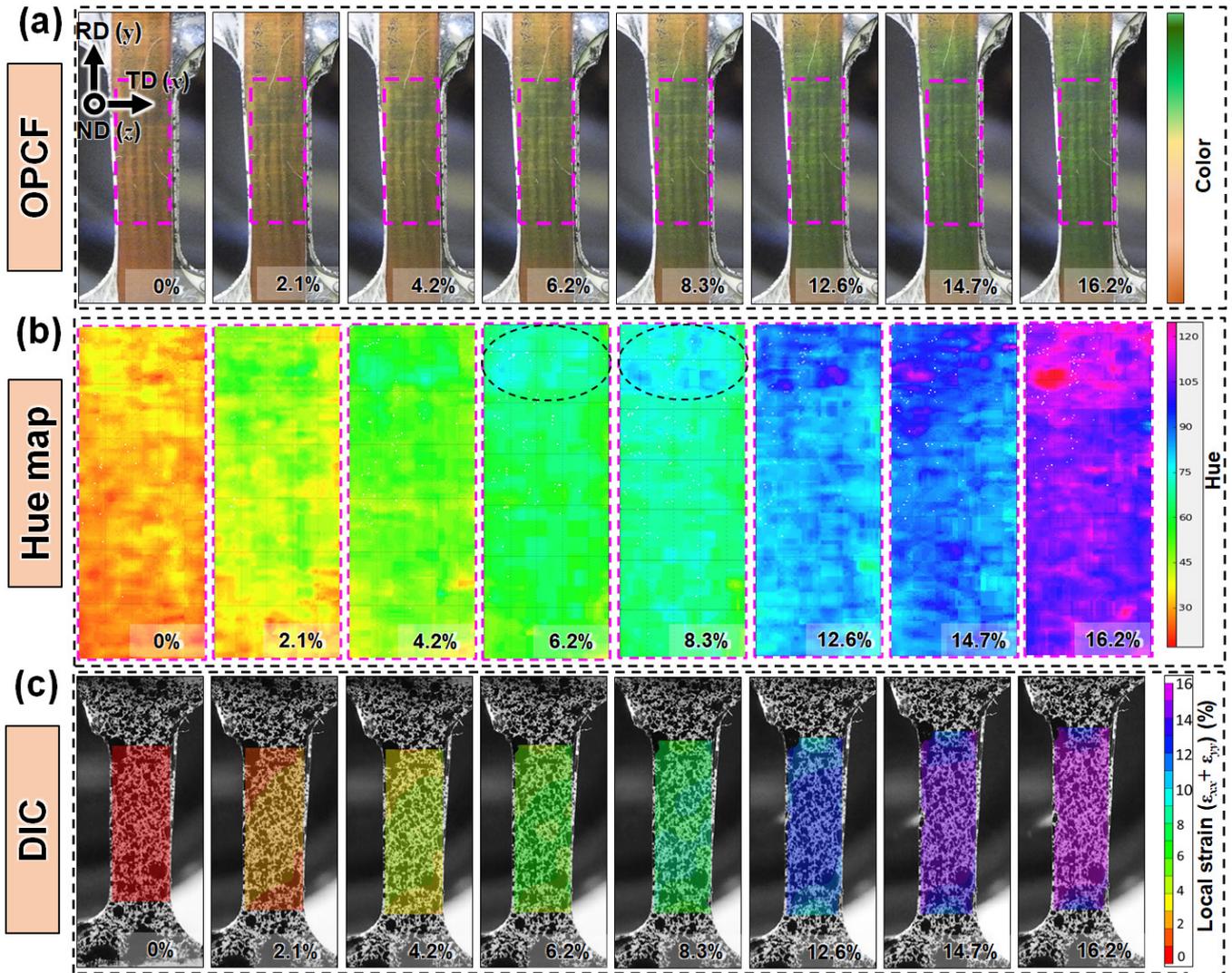


Fig. 5. Images showing strain distributions of the smooth specimen at the different engineering strain stages. (a) Strain-dependent change in color of OPCFs, (b) Hue maps obtained from the OPCFs color of the gauge section, and (c) local strain $[\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}]$ contour maps at various engineering strains. (Online version in color.)

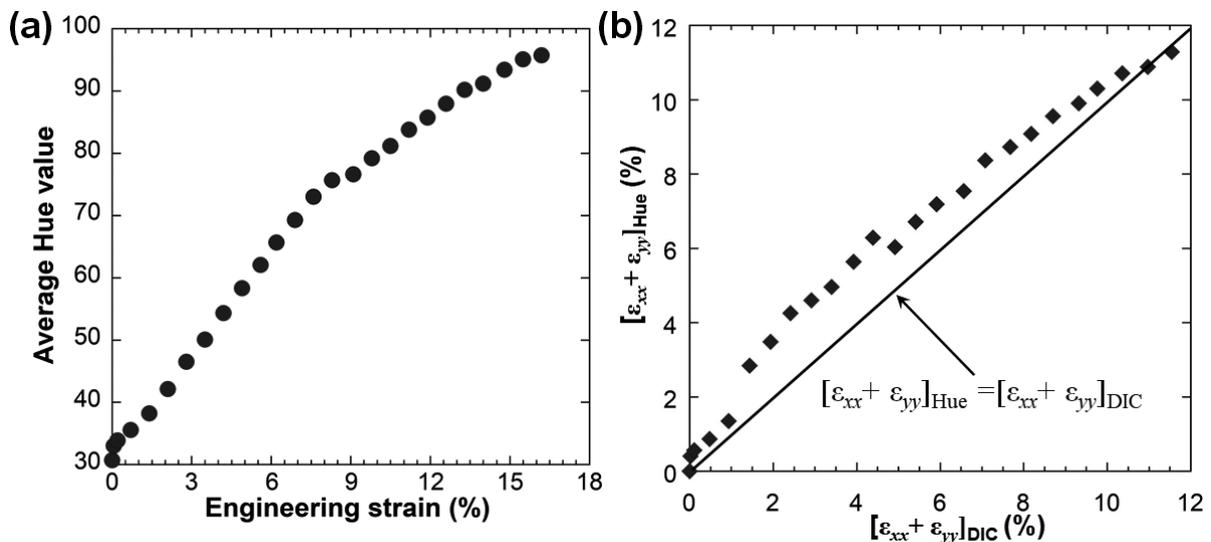


Fig. 6. (a) Average Hue values of the gauge regions of the smooth specimen plotted against engineering strain. (b) Comparison between local strains obtained from Hue value and DIC analysis.

ここで、 D , ν , n_{eff} , θ はそれぞれオパール膜中の初期粒子間距離、オパール膜のポアソン比、平均屈折率、光の入射角である。 ν , n_{eff} , θ はそれぞれ0.46, 1, 0° とした^{28,32}。無変形状態の試験片において $n_{\text{eff}}=1$, $\theta=0^\circ$ のとき、 λ は約600 nmと測定された。つまり、式(3)に基づくと、 D は300 nmと決定される。さらに、Hue値(H)と λ の関係より、面内ひずみとHue値の関係は式(4)で表現される。

$$[\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}]_{\text{Hue}} = 1 - \frac{314.032 - 0.53589H}{D} \dots\dots\dots (4)$$

よって、OPCFにおけるHue値を実際の引張ひずみ ε_{yy} と直接比較するためには、一軸ひずみ ε_{xx} を測定する必要がある。DIC解析は ε_{xx} と ε_{yy} の両方のひずみ分布を同時に測定することができるので、同一試験片の片面でDIC解析を並行して行った(Fig.5(c))。Fig.6(b)はひずみ可視化シートとDIC解析によって得られた $[\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}]$ の対応関係を示してい

る。 $[\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}]_{\text{Hue}}$ と $[\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}]_{\text{DIC}}$ には凡その線形関係があることがわかる。Fig.6(b)中の直線からの1-2%ひずみのずれは局所的な色の不均一性に起因している(例えば、Fig.5(b)中の丸で囲まれた領域における早期な色調変化など)。局所的な色の不均一性はマクロひずみとともに小さくなり、 $[\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}]$ が10%になると、 $[\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}]_{\text{Hue}}$ は $[\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}]_{\text{DIC}}$ と一対一対応を示している。追試験により、色分布の不均一性には再現性がないことを確認しているの、撮影時の影の影響などに由来した実験上のエラーとして取り扱うべきだと考えられる。これらの理解に基づくと、ある程度のエラーは考慮すべき因子として存在するものの、OPCFの色調変化におけるHue値の解析はひずみ分布の定量的な解析に適用可能であると言える。

3.3 幅勾配材

Fig.7(a)は、異なる負荷段階における幅勾配材のひずみ可視化実験の結果を示している。1737 N負荷した段階で、

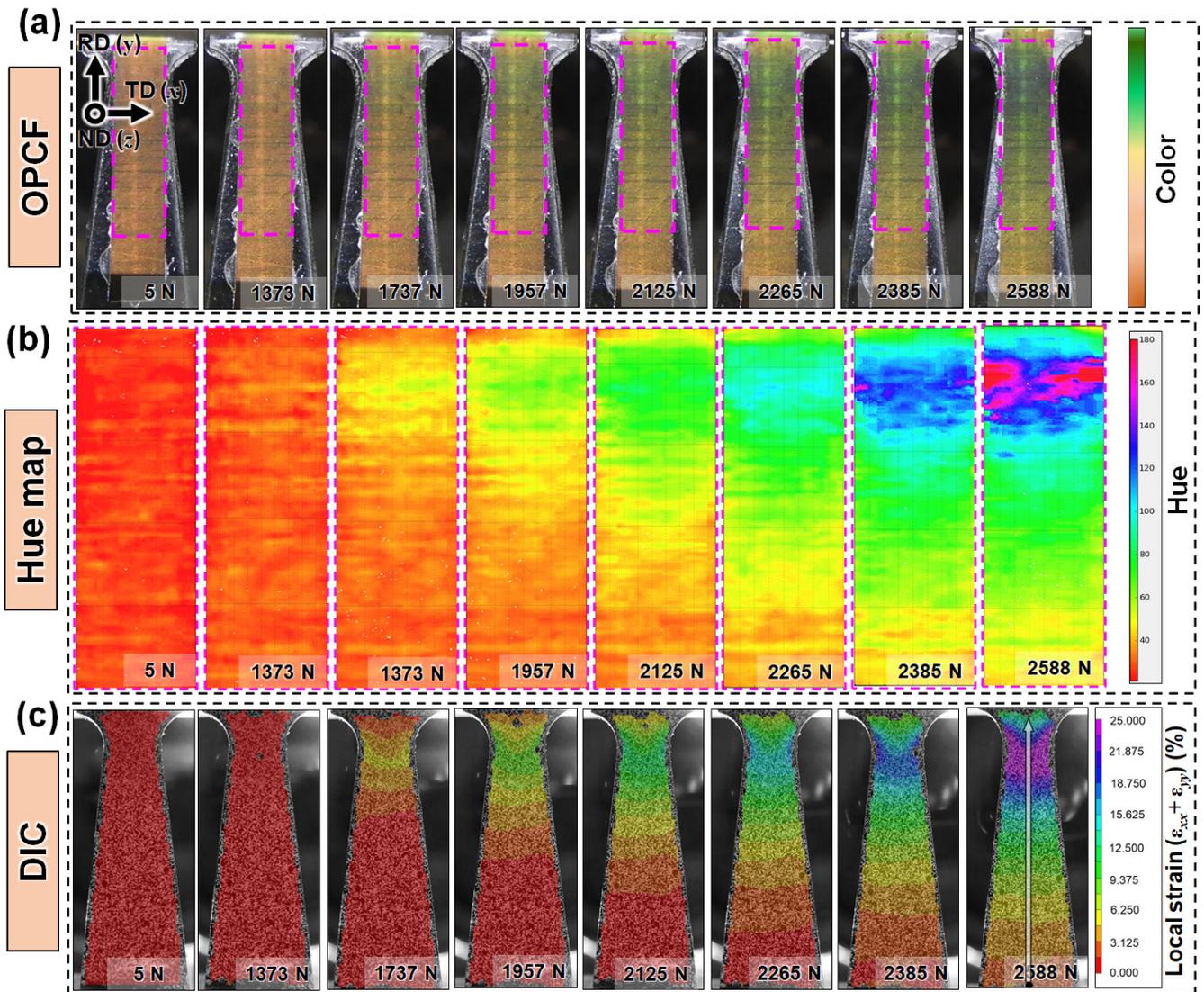


Fig. 7. (a) OPCFs images showing color changes at different loads. (b) Hue maps corresponding to the OPCFs images at the gauge portion of the specimen. (c) Strain distribution obtained by DIC analyses on the backside of the specimen. The line in (c) at 2588 N indicates the region used for the line profile analysis shown in Fig. 8. (Online version in color.)

最小幅部にて有意なOPCFの色調変化が現れた。続いて、色調変化が現れた領域の面積が負荷荷重増大とともに拡大した。定量化のため、色データをHue値に変換した結果をFig.7 (b) に示す。Hueマップは試験片幅に依存したひずみ勾配をより明瞭に可視化している。Fig.7 (c) に、各負荷段階における試験片背面でのDIC解析結果を示す。各変形段階におけるHue値の分布はDIC解析によって得られたひずみ分布と定量的により対応関係にある。Fig.8に示すHue値とDIC結果から得られた $[\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}]$ のラインプロファイルでも、 $[\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}]_{\text{Hue}}$ と $[\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}]_{\text{DIC}}$ は互いにより相関を示している。Hue値から得たひずみはDICの結果よりもばらつきが大きい。ばらつきの最大値は、 $[\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}]_{\text{DIC}}$ が3%から25%まで増加するとともに0.7%から5%へと増加した。この結果は、Hueで得られた $[\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}]$ には最大約20%の誤差が生じうることを示唆している。

従来サブmmスケールのひずみマッピングは、不均一な変形を受けた試料や破断材における局所ひずみと微視組織発達の相関を解析するために用いられてきた。本手法についてもひずみ-微視組織関係の解析への適用可能性を検討するため、幅勾配材における局所ひずみに対応する微視組織の変化を調査した。様々な局所ひずみを伴う2588 Nまで負荷した幅勾配材のEBSD測定結果をFig.9に示す。今回対象材としたSUS304では、変形中に転位すべりとマル

テンサイト変態が起こるので、相マップ (Figs.9 (b), (e), (h), (k)) および kernel average misorientation (KAM) マップ (Figs.9 (c), (f), (i), (l)) を用いてマルテンサイト率と転位密度変化の傾向を解析した。KAM値は測定点と最近接点との結晶方位差の平均として算出している。Fig.10

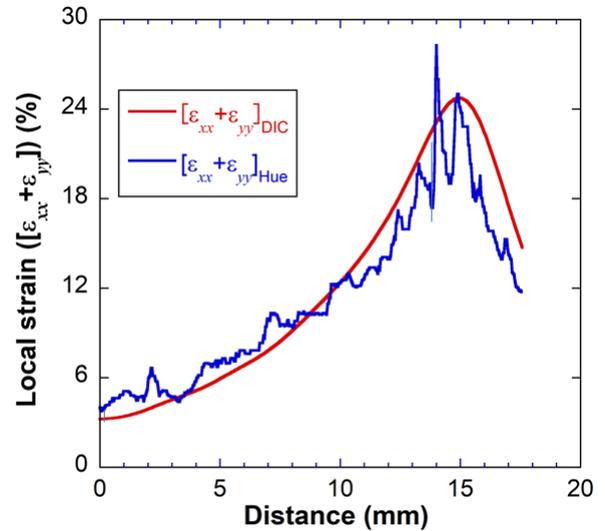


Fig. 8. Comparison between strain line profiles analyzed by the Hue value calculation and DIC analysis at 2588 N. The strain line profiles were obtained along the white arrow shown in Fig. 7(e) at 2588 N. (Online version in color.)

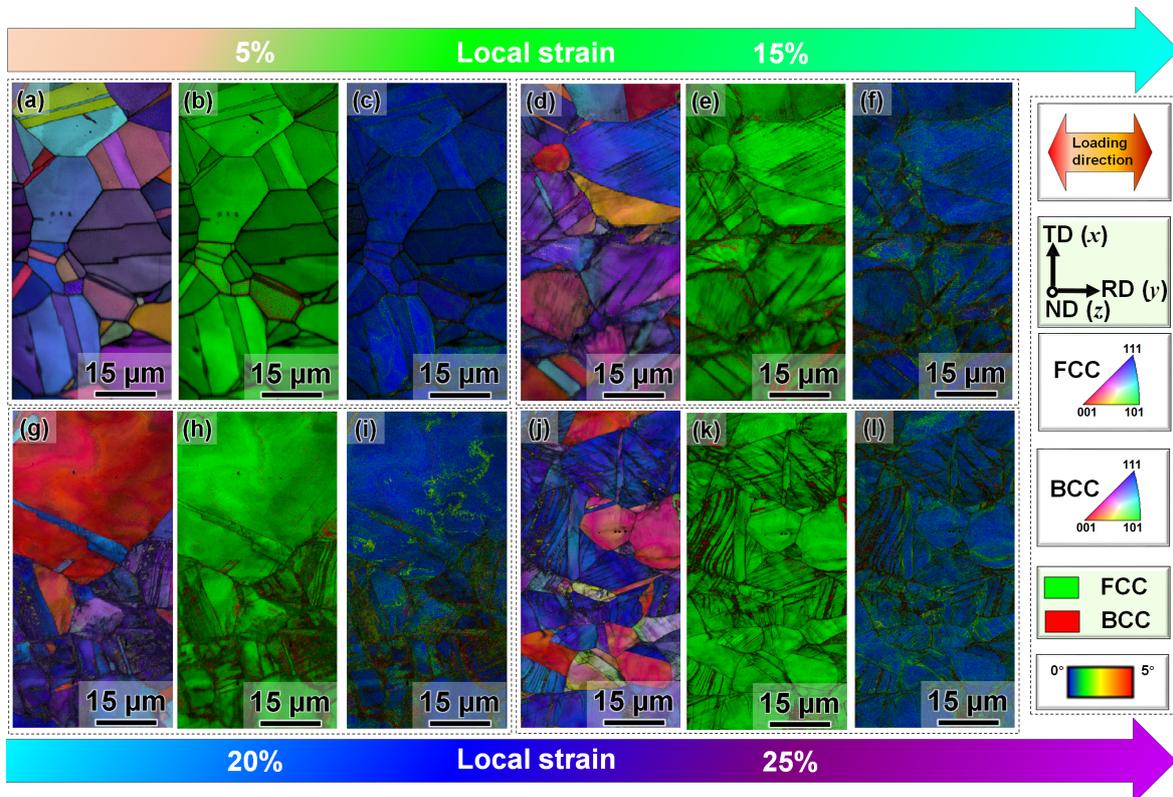


Fig. 9. (EBSD maps showing the microstructure evolution in the width-gradient specimen at local strains of (a-c) 5%, (d-f) 15%, (g-i) 20%, and (j-l) 25%: (a, d, g, j) IPF map, (b, e, h, k) phase map, and KAM map. All the EBSD maps were overlapped with the corresponding grayscale image quality map. (Online version in color.)

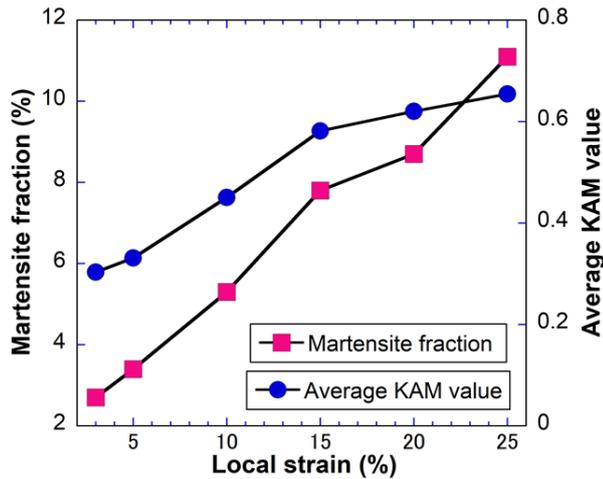


Fig. 10. Average martensite fraction and KAM values at each location with different local strains in the width-gradient specimen deformed until 2588 N. (Online version in color.)

にFig.9で示す像から得た平均のマルテンサイト分率とKAM値を示す。5%変形ごとに有意なマルテンサイト分率の変化が観察された。幾何学的に必要な転位と対応があるKAM値も5%変形ごとに単調に上昇している様子が示されている。つまり、ひずみ可視化シートのサブmmスケールでのひずみ解析で観察された5%ひずみ分のエラーは局所ひずみと微視組織の相関を解析する上で大き過ぎる。定量的なひずみ-微視組織関係を解析するためにひずみ可視化シートを用いる場合、局所ひずみのばらつきを十分に低減するために、得られた解析値をmmスケールで平均化する必要がある。

3・4 穴材

Fig.11 (a) にDIC解析で得られた各負荷段階でのひずみ分布を示す。想定通り、穴近くの領域で変形が優先的に起こり、穴縁周辺にひずみ勾配が観察された。対応して、穴

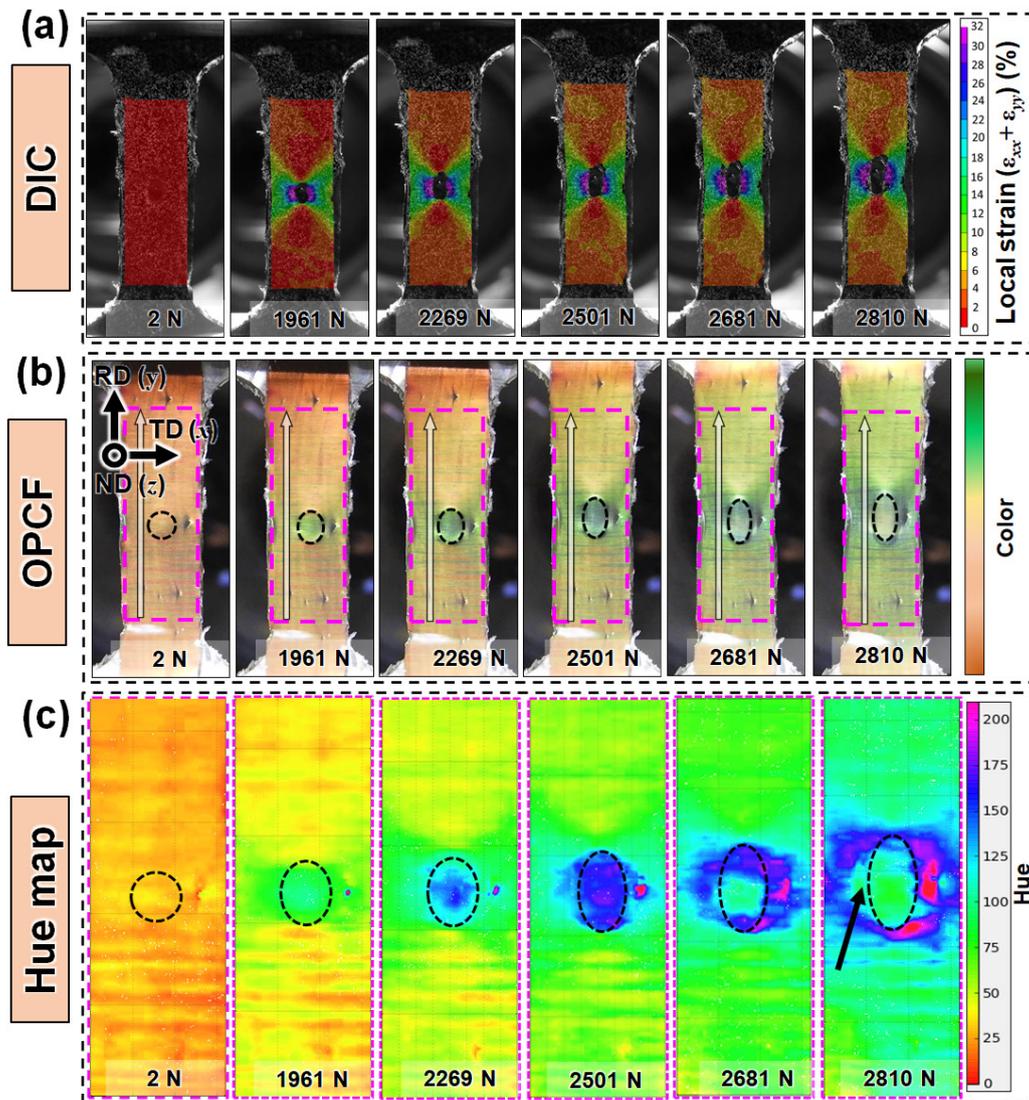


Fig. 11. Strain visualization results of the holed specimen at the different loading stages. (a) Strain maps obtained by DIC analyses. (b) The optical images of the OPCFs. (c) Hue maps of the specimen gauge section highlighted by the dashed squares in (b). The dashed circles indicate the positions of the hole. A movie corresponding to Figs. (b) and (c) is available in a supporting information. (Online version in color.)

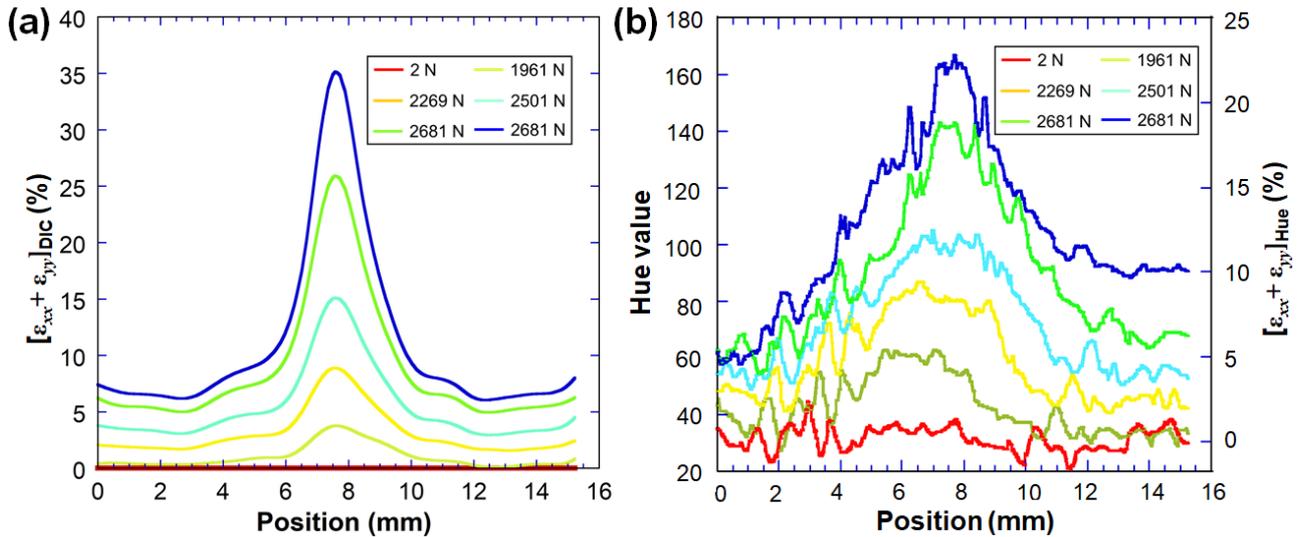


Fig. 12. Strain profiles along the white arrow at the same position shown in Fig. 11(b): (a) DIC analysis and (b) OPCFs analysis. (Online version in color.)

周辺の領域でOPCFの色調にも変化が生じた (Fig.11 (b))。色調変化の定量値として、Hue値の変化をFig.11 (c) に示す。Hue値の勾配は試験片の変形に追従して変形するOPCFのひずみ勾配に対応する。しかし、穴周辺領域における色調変化は試験片とOPCFの変形に対応していない。穴上のOPCFは試験片で拘束されていないので容易に曲がる。この曲がりのため、OPCFに対する光の入射角 θ が変化し、色の変形が生じている。

Fig.12にHueおよびDICデータから得られたFig.11 (b)中の白矢印に沿った $[\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}]$ ひずみプロファイルを示す。2269 Nにおいて、 $[\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}]_{Hue}$ が $[\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}]_{DIC}$ と同様のプロファイルを示している。しかし、さらに負荷を大きくすると、 $[\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}]_{Hue}$ は $[\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}]_{DIC}$ よりも有意に小さく、とくに穴近傍ではその差が顕著である。これら二つのひずみマップにおける不適合の原因を理解するために、Fig.11 (c)中の最後の画像 (2810 N) において黒矢印で示す領域について詳細に解析した。この領域は穴部分と同じ程度の低いHue値が現れており、ひずみ可視化シートが試験片表面から剥離したことが示唆されている。つまり、高負荷における $[\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}]_{Hue}$ と $[\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy}]_{DIC}$ の不適合の一因はひずみ可視化シートの試料表面からの部分的な剥離である。また、Fig.8に示す幅勾配材のOPCF解析では25%程度の大きなひずみを解析できていたので、Fig.12 (b)に示す2501 N負荷時のひずみプロファイルのピーク値である15%ひずみが正しく解析されていない点には注意が必要である。Fig.8とFig.12 (b)の解析における主な差異はひずみ勾配の程度にある。より具体的には、2501 N時のひずみピーク位置から2 mm幅の領域において (Fig.12 (a)中の6 mmから8 mmの位置)、最小と最大ひずみの差はおおよそ10%である。このひずみ差はFig.8におけるひずみ勾配 (約6%)と比較して大きい。こ

れら結果は、大きなひずみ勾配がひずみ可視化シートの剥離およびこれに関連するひずみ解析のエラーを引き起こすことを示唆している。

4. 結言

本研究では、OPCFを用いたひずみ可視化シートにより得られるひずみ分布をDIC解析結果と比較することでその結果の妥当性および定量性を評価した。また、ひずみ可視化シートによるひずみ解析の鋼構造部材への適用可能性や、関連組織解析への有用性を検証するために、三種類の試験片 (平滑材, 幅勾配材, 穴材) を用いて解析した結果、以下の結論を得た。

- (1) 平滑材におけるOPCFの変形に対する色調変化はHue値を用いることで定量的にひずみへ変換できた。
- (2) 幅勾配材において、幅に対応したひずみ勾配をひずみ可視化シートにより少なくとも25%ひずみまで定量的に解析できた。しかし、色調変化をサブmmスケールで解析した結果、ひずみプロファイルに有意なノイズが存在することがわかった。つまり、ひずみ可視化シートで得られる局所ひずみを微視組織やき裂・ボイドのような微小損傷と関係づけるためにはmmスケールで結果を平均化する必要がある。
- (3) 穴材における穴近傍のひずみ勾配はひずみ可視化シートによって解析可能であることが示された。しかし、穴近傍のひずみが過大であるとき、ひずみ可視化シートから見積もられたひずみの値はDIC解析で得られた値よりも小さかった。このひずみ可視化シートとDIC解析で得られた値の差はひずみ可視化シートの試料表面からの剥離に起因する。

Supporting Information

The movie corresponding to Fig.11.

This material is available on the Website at <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2023-020>

Acknowledgements

This work was supported by JSPS KAKENHI (JP20H02457). Yutao Zhou is grateful to the China Scholarship Council (CSC) for financial support.

文 献

- 1) M.Koyama, Z.Zhang, M.Wang, D.Ponge, D.Raabe, K.Tsuzaki, H.Noguchi and C.C.Tasan: *Science*, **355**(2017), 1055. <https://doi.org/10.1126/science.aal2766>
- 2) D.Raabe, H.Springer, I.Gutierrez-Urrutia, F.Roters, M.Bausch, J.-B.Seol, M.Koyama, P.-P.Choi and K.Tsuzaki: *JOM*, **66**(2014), 1845. <https://doi.org/10.1007/s11837-014-1032-x>
- 3) R.Zhu, S.Li, I.Karaman, R.Arroyave, T.Niendorf and H.J.Maier: *Acta Mater.*, **60**(2012), 3022. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.02.007>
- 4) D.Raabe, C.C.Tasan and E.A.Olivetti: *Nature*, **575**(2019), 64. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1702-5>
- 5) N.A.Fleck, G.M.Muller, M.F.Ashby and J.W.Hutchinson: *Acta Metall. Mater.*, **42**(1994), 475. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(94\)90502-9](https://doi.org/10.1016/0956-7151(94)90502-9)
- 6) C.C.Tasan, M.Diehl, D.Yan, M.Bechtold, F.Roters, L.Schemmann, C.Zheng, N.Peranio, D.Ponge, M.Koyama, K.Tsuzaki and D.Raabe: *Annu. Rev. Mater. Res.*, **45**(2015), 391. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070214-021103>
- 7) F.D.Fischer, G.Reisner, E.Werner, K.Tanaka, G.Cailletaud and T.Antretter: *Int. J. Plast.*, **16**(2000), 723. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(99\)00078-9](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(99)00078-9)
- 8) A.Pineau, A.A.Benzerga and T.Pardo: *Acta Mater.*, **107**(2016), 424. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.12.034>
- 9) A.Kumar, A.Dutta, S.K.Makineni, M.Herbig, R.H.Petrov and J.Sietsma: *Mater. Sci. Eng. A*, **757**(2019), 107. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.04.098>
- 10) C.C.Tasan, J.P.M.Hoefnagels, M.Diehl, D.Yan, F.Roters and D.Raabe: *Int. J. Plast.*, **63**(2014), 198. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2014.06.004>
- 11) H.Kim, J.Lee, F.Barlat, D.Kim and M.-G.Lee: *Acta Mater.*, **97**(2015), 435. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.06.023>
- 12) R.Becker: *Acta Mater.*, **46**(1998), 1385. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(97\)00182-1](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(97)00182-1)
- 13) K.Takashima, K.Hasegawa, Y.Toji and Y.Funakawa: *ISIJ Int.*, **57**(2017), 1289. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-086>
- 14) K.Mori, Y.Abe and Y.Suzui: *J. Mater. Process. Technol.*, **210**(2010), 653. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.11.014>
- 15) J.Kang, Y.Osokov, J.D.Embury and D.S.Wilkinson: *Scr. Mater.*, **56**(2007), 999. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.01.031>
- 16) F.Di Gioacchino and J.Q.da Fonseca: *Exp. Mech.*, **53**(2013), 743. <https://doi.org/10.1007/s11340-012-9685-2>
- 17) B.L.Boyce, P.L.Reu and C.V.Robino: *Metall. Mater. Trans. A*, **37**(2006), 2481. <https://doi.org/10.1007/BF02586221>
- 18) D.Yan, C.C.Tasan and D.Raabe: *Acta Mater.*, **96**(2015), 399. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.05.038>
- 19) T.Vermeij and J.P.M.Hoefnagels: *Scr. Mater.*, **208**(2022), 114327. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2021.114327>
- 20) Y.Osokov, D.S.Wilkinson, M.Jain and T.Simpson: *Int. J. Mater. Res.*, **98**(2007), 664. <https://doi.org/10.3139/146.101526>
- 21) N.Ishikawa, K.Yasuda, H.Sueyoshi, S.Endo, H.Ikeda, T.Morikawa and K.Higashida: *Acta Mater.*, **97**(2015), 257. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.06.037>
- 22) S.Ri, M.Fujigaki and Y.Morimoto: *Exp. Mech.*, **50**(2010), 501. <https://doi.org/10.1007/s11340-009-9239-4>
- 23) S.Ri, T.Muramatsu, M.Saka, K.Nanbara and D.Kobayashi: *Exp. Mech.*, **52**(2012), 331. <https://doi.org/10.1007/s11340-011-9491-2>
- 24) H.Fudouzi and T.Sawada: *Langmuir*, **22**(2006), 1365. <https://doi.org/10.1021/la0521037>
- 25) A.Chiappini, A.Piotrowska, M.Marciniak, M.Ferrari and D.Zonta: *Proc. SPIE*, **9435**(2015), 94350J. <https://doi.org/10.1117/12.2086281>
- 26) H.Fudouzi, T.Sawada, Y.Tanaka, I.Ario, T.Hyakutake and I.Nishizaki: *Proc. SPIE*, **8345**(2012), 83451S. <https://doi.org/10.1117/12.914689>
- 27) Z.Yang, M.Koyama, H.Fudouzi, T.Hojo and E.Akiyama: *ISIJ Int.*, **60**(2020), 2604. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-223>
- 28) Y.Tanaka, H.Fudouzi and T.Hyakutake: *ISIJ Int.*, **62**(2022), 257. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2021-383>
- 29) R.Kristianto, F.D.Handayani and A.Wibowo: Proc. 3rd International Conference on Informatics and Computational Sciences, ICICoS, (Semarang) IEEE, New York, NY, (2019), 19323556. <https://doi.org/10.1109/ICICoS48119.2019.8982516>
- 30) Digital Color Imaging Handbook, ed. by G.Sharma, CRC Press, Boca Raton, FL, (2003), 272.
- 31) B.Hwang, T.-H.Lee, S.-J.Park, C.-S.Oh and S.-J.Kim: *Mater. Sci. Eng. A*, **528**(2011), 7257. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.06.025>
- 32) H.Li, X.Sun and H.Peng: *ChemPhysChem*, **16**(2015), 3761. <https://doi.org/10.1002/cphc.201500736>