

デジタル画像相関法を用いたひずみ分布計測

朝倉 悠太^{*1} 及川 秀行^{*2}
Asakura Yuta Oikawa Hideyuki

近年、非接触で変位やひずみの分布が計測可能な手法として、デジタル画像相関法 (Digital Image Correlation) が注目されている。本稿では、デジタル画像相関法の概要について紹介する。また、鉄鋼材の引張試験を実施し、デジタル画像相関法により算出した引張方向のひずみ、ポアソン比および応力について、ひずみゲージや計算値と比較した結果について報告する。

キーワード：デジタル画像相関法 (DIC)、ひずみ分布計測、非接触、画像解析

1. はじめに

ひずみ計測では、センシング部にひずみゲージを使用するのが一般的である。しかしながら、ひずみゲージは局所的なひずみの計測となるため、ひずみゲージの位置、点数、間隔などの事前検討は極めて重要である。また、ひずみゲージを多点貼り付ける場合、配線作業が複雑になるため、設置に時間を要する問題点がある⁽¹⁾。

なお、ガスタービンやジェットエンジンなど高温でのひずみ計測の需要は多いが、約700℃以上におけるひずみゲージを用いた計測は困難である⁽²⁾。

そこで、近年、ひずみゲージに替わる手法として、デジタル画像相関法 (Digital Image Correlation、以下 DIC) が注目されている。DIC は、試験体表面に塗装されたスペckルパターンをカメラで撮影し、変形前後の画像の相関から変位分布やひずみ分布を計測する手法である⁽³⁾。DIC は、ひずみゲージと比較して、以下の特長を有している。①非接触で広範囲のひずみ分布を計測できる、②短時間

で設置できる、③ゲージの接着不良などによる計測への影響がない、④700℃以上の高温環境でも計測可能である⁽⁴⁾。

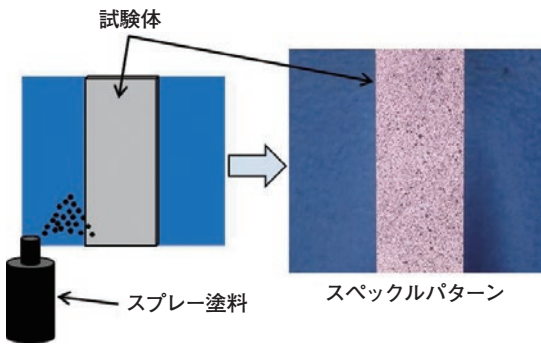
本稿では、DIC の概要および鉄鋼材を用いた引張試験を実施し、引張方向のひずみ、ポアソン比、応力について、DIC とひずみゲージや計算値とを比較した結果について紹介する。

2. DIC の概要

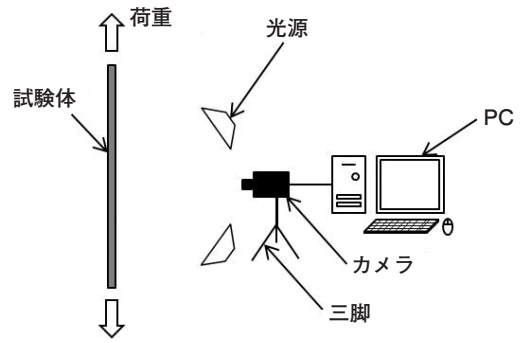
図1にDICの計測原理の概略図を示す。はじめに、試験体表面にスペckルパターンと呼ばれるランダムな斑点模様をスプレー塗料で塗布する(図1(a))。次に、CCDやCMOSカメラを用いて、変形前後のスペckルパターンを撮影する(図1(b))。最後に、撮影した画像をサブセットと呼ばれる微小領域(例えば13×13pixel、23×23pixelなど)に分割し、変形後の画像について、変形前のサブセット内のパターン分布と同じ分布のサブセットを画像解析により探査する(図1(c))。これにより、変形前後のサブセットの移動量から、その点にお

*1：研究開発センター 研究開発グループ 一般計量士 環境計量士(騒音・振動関係)

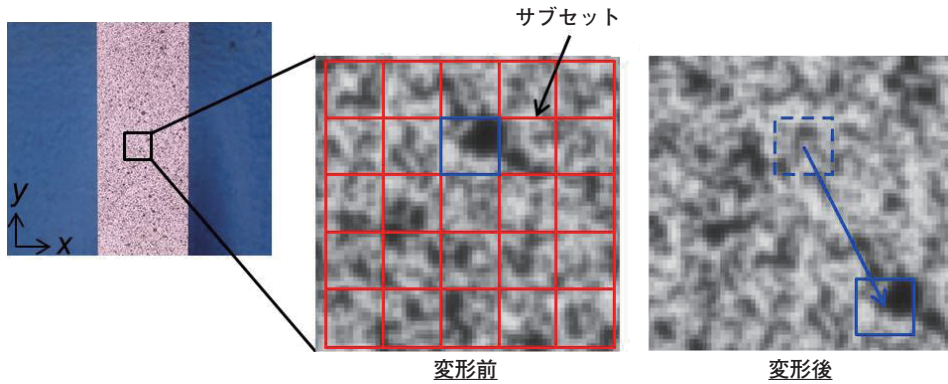
*2：計測事業部 計測技術部 福浦グループ 次長



(a) スペックルパターンの作成



(b) パターンの撮影



(c) サブセット分割および解析

図 1 DIC の計測原理概略

る変位を算出する。それを撮影した画像全体に行うことで、変位やひずみ分布を算出する⁽³⁾⁽⁵⁾。カメラを1台使用した場合には、面内変形を計測することができる。また、カメラを2台使用した場合、視差を利用することで面内変形に加え、奥行き方向、つまり、面外変形も計測することができるが⁽⁶⁾、校正プレートを用いて、2台のカメラの位置関係を校正する必要がある。図2に校正プレートの写真を示す。

3. 実験方法

引張試験では、JIS 1B 号試験片 (材質 SCM440、標点距離 200mm、幅 25mm、厚さ 3mm) を使用した。試験片中央には、ゲージ長 1mm の 2 軸ひずみゲージを貼り付け、ひずみゲージ貼付け面と同じ面にスプレー塗料を用いて、図 1 (a) と同様のス

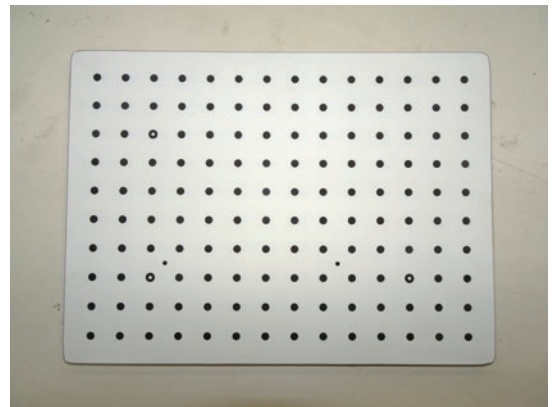


図 2 校正プレート

ペックルパターンを塗装した。図3に塗装前の引張試験片の写真を示す。DICには、Correlated Solutions 社製の VIC-3D コリレーションシステムを使用した。図4にDIC装置設置時の写真を示す。VIC-3Dは、カメラを2台使用することで、面外方

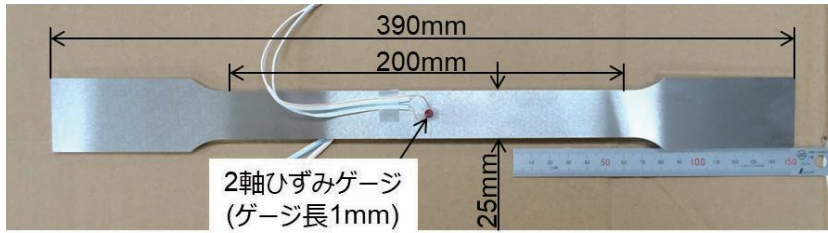


図3 引張試験片

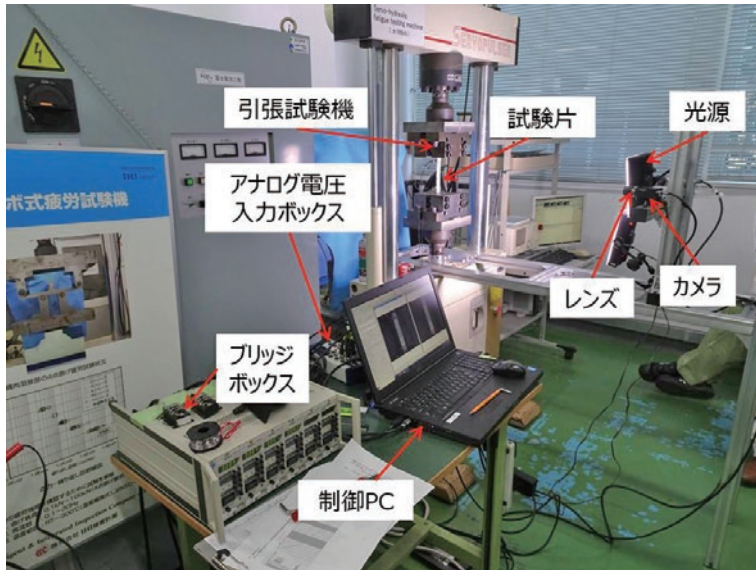


図4 DIC装置設置写真

向のひずみ分布も計測可能なものである。DIC システムは、カメラ、レンズ、光源、アナログ電圧入力ボックスおよび制御 PC から構成される。カメラの解像度は 2448×2048 pixel の 5M ピクセルであり、使用したレンズは、焦点距離 35mm の単焦点レンズである。アナログ電圧入力ボックスは、引張試験時の荷重や変位などの電圧データを A/D コンバータおよび DIC の制御 PC を介して、カメラと同期して計測可能にしている。本試験では、荷重、変位、ひずみ 2ch の合計 4ch の電圧データを計測した。

試験条件としては、視野範囲を約 84×70 mm (分解能 0.034 mm/pixel)、試験速度を 2 mm/min、およびサンプリングレートを 10 Hz とした。本試験で

は、サブセットサイズを 17×17 pixel に設定して解析を行い、ひずみ分布を算出した。

4. 試験結果

図5は、引張試験時における破断直前の引張方向のひずみ分布である。この図より、ひずみゲージ下部にネッキングが発生し、ほぼ 45° 方向のすべりやネッキング部中央でひずみが高くなっていることが確認できる。また、図6に $10000 \mu\epsilon$ までの引張方向のひずみの時間変化を示す。ここで、赤線部の DIC のひずみは、図5で示している試験片全体の引張方向の平均ひずみを示している。図7に DIC とひずみゲージにおける引張方向のひずみの関係を示す。これらの図より、弾性域であ

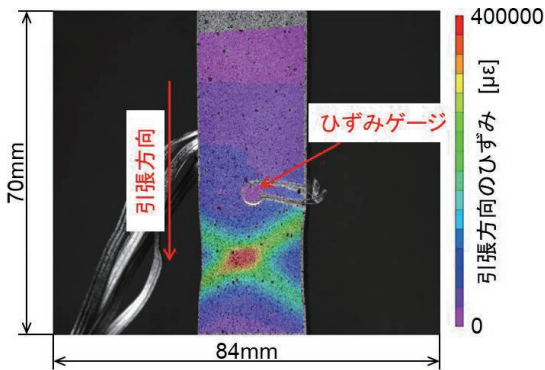


図5 破断直前の引張方向ひずみ分布

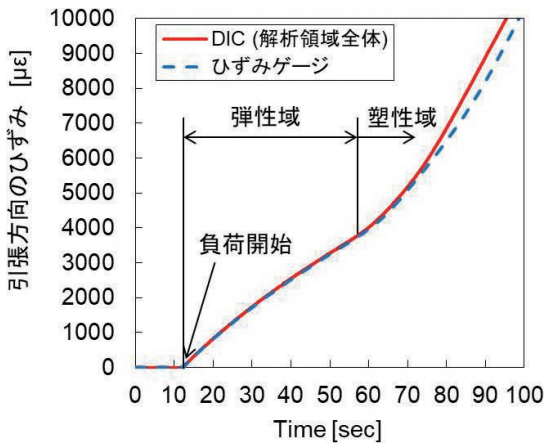


図6 引張方向ひずみの時間変化

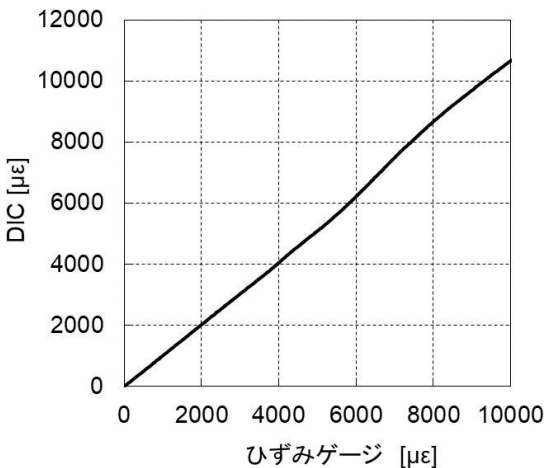


図7 DIC とひずみゲージにおける引張方向のひずみの関係

る約 $4000\mu\epsilon$ 以下では、ひずみゲージと DIC は精度良く追従できているが、ひずみが $6000\mu\epsilon$ を超えると差異が生じた。また、図8に応力ひずみ線図を示す。ここで、応力は、DIC およびひずみゲージともに試験機荷重を試験片の初期断面積（幅 $25\text{mm} \times$ 厚さ $3\text{mm} = 75\text{mm}^2$ ）で除した値を使用した。この図に示したとおり、DIC およびひずみゲージの応力ひずみ線図は、非常に良く一致している。

次に、DIC は引張方向のひずみだけでなく、圧縮方向のひずみも算出することが可能である。そこで、DIC およびひずみゲージそれぞれについて縦ひずみと横ひずみの比であるポアソン比を算出し、その結果を比較した。図9に、弾性域におけるDIC およびひずみゲージで計測した縦ひずみと横ひずみの関係を示す。この図に示したとおり、DIC、ひずみゲージともに縦ひずみと横ひずみの関係が線形であった。線形近似した場合の傾きがポアソン比であるが、その値はそれぞれ約 0.283 および 0.275 であり、相対誤差は約 3% であった。このことから、DIC は、ポアソン比も精度良く計測可能であることがわかる。

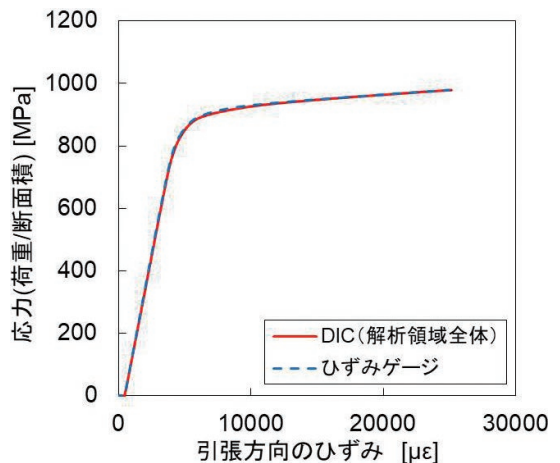
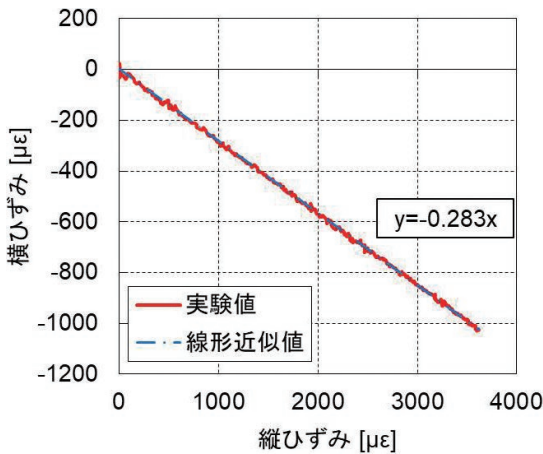
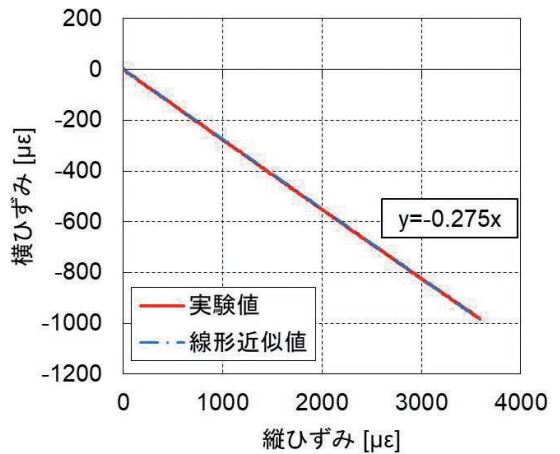


図8 応力ひずみ線図



(a) DIC



(b) ひずみゲージ

図9 縦ひずみと横ひずみの関係

最後に、DIC から算出した引張方向および圧縮方向のひずみを使用して、弾性域における応力を算出した。図 10 に DIC と計算により求めた引張方向の応力との関係を示し、図 11 に計算値の応力と絶対誤差(DIC で算出した応力と計算値の差分)の関係を示す。ここで、DIC で算出した引張方向の応力 σ_{eyy} および計算値 σ_{th} は以下の式を用いて算出した⁽⁷⁾。

$$\sigma_{\text{eyy}} = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{th}} = \frac{P}{A} \quad (2)$$

ここで、 E はヤング率 [GPa]、 ν はポアソン比 [-]、 ε_y は引張方向のひずみ [-]、 ε_x は圧縮方向のひずみ [-]、 P は試験機荷重 [N] および A は初期断面積 [mm²] である。ヤング率 E は、SCM440 材のヤング率 210 [GPa]、ポアソン比 ν は、前述でひずみゲージから求めた値 0.275、断面積 A も前述同様、荷重負荷前の 75mm² を使用した。また、引張方向のひずみおよび圧縮方向のひずみは、図 5 に示した解析領域全体の平均値を用いた。そのため、DIC で算出した引張方向の応力は、解析領域全体の平均応力を示している。これらの図から、荷重

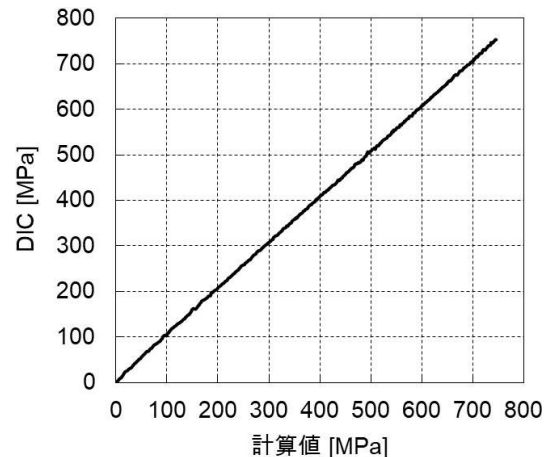


図 10 DIC と計算値における応力との関係

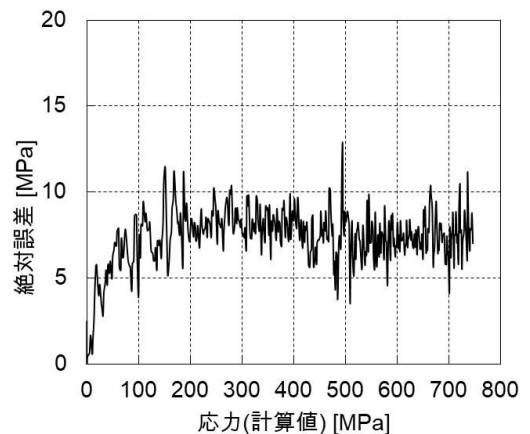


図 11 計算値の応力と絶対誤差の関係

増加後の誤差は、最大約 13MPa であり、DIC から算出した応力は、計算値と良く一致している。

ただし、式 (1) より、DIC を用いた応力の算出は、既知の試験体のヤング率およびポアソン比が必要なため、弾性域のみに限定される。

5. まとめ

DIC の計測原理の概要について紹介し、JIS 1B 号試験片を用いた引張試験結果から DIC とひずみゲージでの計測を比較した。その結果、解析領域全体における引張方向の平均ひずみは、塑性域では差異が生じたが、弾性域では $50\mu\epsilon$ 以内の誤差で計測可能であった。また、ポアソン比および応力についてもひずみゲージや計算値と良く一致した。このことから、ひずみゲージに替わるひずみ分布計測技術として、DIC の有効性を確認することができた。本稿では、カメラの視野範囲など 1 条件のみについて紹介したが、DIC の計測精度は、視野の大きさ、スペックルパターン、サブセットサイズ、試験体の形状および環境温度などの条件によって大きく変化する。今後は、高温環境下での計測を含めたさまざまな条件下でも高精度な計測結果を提供できるよう、DIC の計測精度向上に向けた研究開発を進めていく予定である。

参考文献

- (1) 出水亨、松田浩、戸次翔、森崎雅俊、内野正和、伊藤幸広、森田千尋：デジタル画像相関法のひずみ計測向上に関する基礎的研究、土木学会論文集 A2 (応用力学)、Vol.68、No.2、2012、pp.L_683-I_690
- (2) 菅原敏博：溶射ゲージによる静ひずみ測定技術、IIC REVIEW、No.58、2017/10、pp.12-17
- (3) 李志遠、王慶華、有川秀一、米山聡：面内変位分布計測におけるデジタル画像相関法とサンプリングモアレ法の比較研究、実験力学、Vol.15、No.4、2015、pp.303-308
- (4) 禹明勳：デジタル画像相関法による高温環境下の変位・ひずみ分布計測、第 51 回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム講演論文集、2020、pp.1-4
- (5) 鈴木尚之、小柳潤、有川秀一、米山聡：画像相関法を用いた一方向 CFRP の機械的特性逆解析における試験条件の検討、日本複合材料学会誌、Vol.40、No.4、2014、pp.160-169
- (6) 川久保政洋、釜谷昌幸：3 次元デジタル画像相関法による溶接部における不均一強度分布の同定、日本機械学会論文集 (A 編)、Vol.79、No.806、2013、pp.107-119
- (7) 樋口盛一、斎藤秀雄：弾性および材料力学、養賢堂、第 29 版、1987、pp.14-19



研究開発センター
研究開発グループ
一般計量士 環境計量士(騒音・
振動関係)

朝倉 悠太

TEL. 045-791-3522
FAX. 045-791-3547



計測事業部 計測技術部
福浦グループ
次長

及川 秀行

TEL. 045-791-3518
FAX. 045-791-3541