

実験力学の援用による数値応力解析の高度化に関する研究 ーデジタル画像相関法の利用ー

山口 篤志*1, 山際 謙太*1, 本田 尚*1, 佐々木 哲也*1

産業機械の破損によって被災者が出るなどの災害が発生した場合、災害の発生原因究明や再発防止対策を目的として、数値解析が利用される。数値応力解析の中で、特に有限要素解析は、破損原因となった箇所を視覚的に捉え、破損原因の究明に有効である。しかし、有限要素解析は解析モデル作成に多大な労力と時間が必要なだけでなく、実構造物の応力分布を得るために、実働荷重や境界条件を正確に決定することは困難である。一方で、有限要素解析による変位分布が、実験力学によって得られた変位分布と一致するように、有限要素解析の荷重境界条件を決定することで得られる応力分布は、妥当性のある境界条件によって得られた解析解として、荷重入力のみ为数値解析に比べて高度化が図れる。近年、CCD カメラや画像処理技術の向上の背景を受け、デジタル画像相関法(DIC)と呼ばれる、変形前後のデジタル画像を用いて、撮影された範囲における変位分布が取得できる方法が注目されている。本稿では、DIC を利用して実荷重を受ける構造物の変位分布を取得し、得られた変位情報を有限要素解析に援用することで、構造物の実際の変形を考慮した数値応力解析が行えることを報告する。

キーワード: デジタル画像相関法(Digital Image Correlation, DIC), 有限要素解析, キャリブレーション

1. はじめに

クレーンをはじめとする建設機械やプレス機をはじめとする工作機械などの多種多様な産業機械が破損することによって被災者が出るなどの災害が発生した場合、災害発生の原因究明、または同種災害の再発防止対策を目的として、実験力学や数値解析を利用した調査が行われる。その中で、有限要素解析などの数値解析は、破損原因となった箇所を視覚的に捉えることが可能であり、破損原因の究明に貢献している^{1), 2)}。しかし、有限要素解析を実行するにあたり、解析モデルの作成に多大な労力と時間が必要となる。また、実構造物の応力分布を得るために、実稼働荷重や境界条件を正確に決定することは困難である³⁾。解析モデル作成の負担を軽減させる方法として、評価対象部位(例えば、破損部)近傍のみの解析モデルを作成し、評価対象部位近傍の応力状態を推定する方法があるが、全体解析モデルに比べて荷重境界条件の設定がより複雑になる。一方で、適切な荷重境界条件を設定するためには、実験力学で得られた構造物などの変位分布などを利用すればよい。実験力学によって得られた変位分布が一致するように、数値応力解析における荷重境界条件が決定された数値応力解析によって得られる応力状態は、妥当性のある境界条件によって得られた(実験力学によって得られた変位分布を有した)数値応力解析の解として有効であると考えられる。

これまで、実験力学における構造物の応力測定には、赤外線応力画像法^{3), 4)}や光弾性法^{5), 6)}などが用いられてきた。赤外線応力測定法は、物体に作用している応力の

変動やき裂先端の位置や応力拡大係数の推定が可能であるが、被測定物周囲の環境および荷重の周波数によっては、物体の熱伝導や物体表面からの熱伝達の影響により、応力計測を十分な精度で行うことができないといった報告がある^{4), 7)}。また、光弾性法は物体の内部の応力状態を調査する手法として有効であるが、可視光を透過させる材料が必要⁵⁾である。不透明な材料に光弾性皮膜を貼り、応力状態を調査する方法もあるが、光弾性皮膜の厚さは測定精度に影響するだけでなく、厚さが薄すぎると皮膜が破損する⁶⁾、などの懸念がある。さらに、実験力学における構造物の変位やひずみ測定には、ひずみゲージを貼付する方法が広く行われているが、貼付した箇所、いわゆる局所的な箇所の計測しか行えず、変形が大きい場合はひずみゲージの剥離や切れが発生する。

一方で、近年、CCD カメラや画像処理技術の向上の背景を受け、構造物の変位を計測する方法として、デジタル画像相関法^{8), 9)}が注目されてきている。デジタル画像相関法では、CCD カメラやデジタルカメラにより得られたデジタル画像を利用する。変形前のデジタル画像と、変形後のデジタル画像を用いて、数値解析を行うことにより、撮影された範囲における変位量やひずみ量の分布やその方向、ひいては局所的な変位やひずみを取得できる。画像の変化から変形の状態を検出できることから、非接触かつ広範囲に変位測定が可能となっているだけでなく、材料を選ばずに変位測定が行える。さらに、デジタル画像相関法によって得られた変位分布を元に、有限要素解析において荷重境界条件を適切に設定すれば、構造物の応力状態を得ることが可能となる。有限要素解析により得られる応力状態は、構造物内部の応力状態を確認することができ、赤外線応力測定など部材表面の応力状態のみ得られる測定方法よりも、有効と考えられる。

そこで本稿では、デジタル画像相関法を利用して実荷重を受ける構造物などの変位情報を取得し、さらに、得

*1 労働安全衛生総合研究所 機械システム安全研究グループ

連絡先: 〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6

労働安全衛生総合研究所 機械システム安全研究グループ

山口篤志

E-mail: yamaguchi@s.jniosh.johas.go.jp

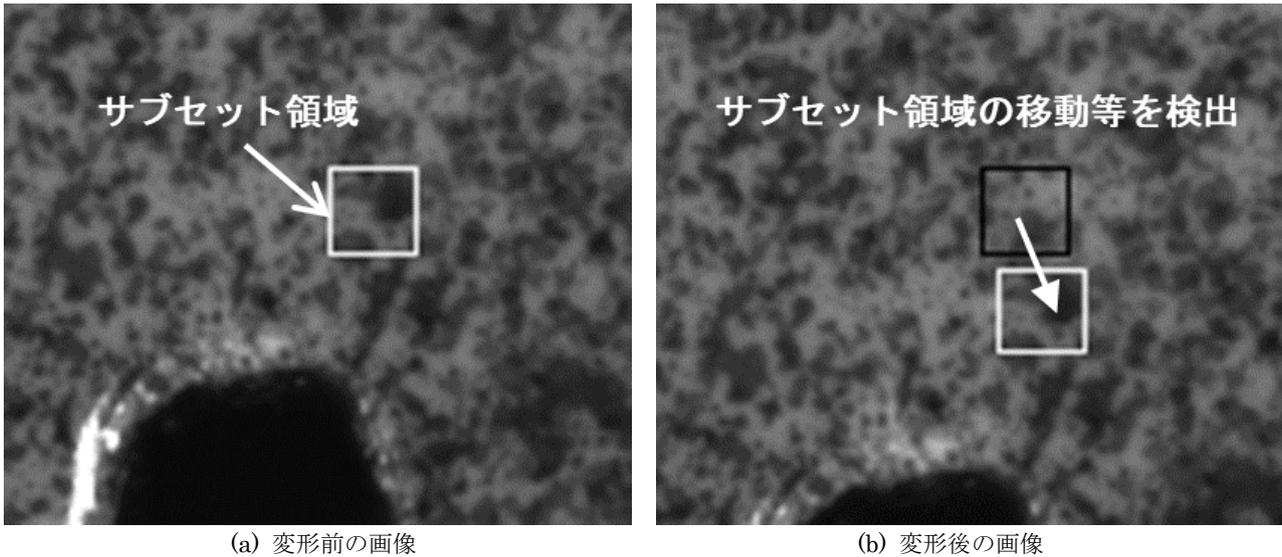


図1 DICにおけるサブセットの検出

られた変位情報を有限要素解析に援用し、応力分布を取得した。デジタル画像相関法と有限要素解析を利用して、構造物における実際の変形が考慮された応力分布が得られることを報告する。

2. デジタル画像相関法による変位およびひずみの計測

2.1 デジタル画像相関法の概要

デジタル画像相関法は、Digital Image Correlation method と英訳され、DIC⁸⁾や DICM⁹⁾と呼ばれる。デジタル画像相関法(以下、DIC)では、CCD カメラやデジタルカメラ(以下、撮影装置)により、測定対象物の変形前における状態を基準画像として撮影し、その後、例えば負荷を受ける同対象物の同じ画像を取得する。変形前後の画像から得られる輝度値の相関を計算することにより、撮影された範囲における面内の変位量の分布、およびひずみ量の分布を求めることができる。なお、1台の撮影装置から得られた変形前後の画像を用いた場合は、2次元の変位量やひずみ量の分布が得られ、2台以上の撮影装置から得られた変形前後の画像を用いた場合は、3次元の変位量やひずみ量の分布が得られる。

DIC では、図1(a)に示すような、変形前の基準画像において撮影されたランダムパターンにおいて、サブセットと呼ばれる任意の大きさの画素の領域を決定する。次に、図1(b)に示すような変形後の画像と比較(以下、パターンマッチング)することで、サブセットの変位や回転などが計算される。なお、図中のサブセットは1枠だけで示しているが、実際は画像全体に適用され、各サブセットの変位などの情報が計算されることで、変形前後における画像全体の変位などの情報が計算される。撮影装置が2台以上の場合は、これに奥行き方向の要素が加わり、画像全体における3次元方向の変位量やひずみ量が計算される。

DIC の測定原理は、論文など^{9), 10), 11)}で報告されている。本稿においては、実験力学で使用する DANTEC

DYNAMICS 製 Q400 system^{12), 13)}における原理に則っている。測定対象物の変形前後の画像のパターンマッチングにおいては、以下の式(1)~式(4)により、S が最小化される値が計算され、輝度値のマッチングが実行される。

$$S = \sum_{x,y} (G_t(x_t, y_t) - G(x, y))^2 \quad (1)$$

$$G_t(x_t, y_t) = g_0 + g_1 G(x_t, y_t) \quad (2)$$

$$x_1 = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy \quad (3)$$

$$y_1 = a_4 + a_5 x + a_6 y + a_7 xy \quad (4)$$

ここで、S は変形前後のサブセット内の輝度値の差、G(x, y) は変形前画像のサブセット内の座標(x, y)における輝度値、G_t(x_t, y_t) は変形後画像の座標(x_t, y_t)における輝度値である。また、(g₀, g₁)は撮影パラメータ、a_i はアフィン変換パラメータを表している^{12), 13)}。

前述したように、被測定対象物が2台の撮影装置によって異なる方向から撮影される場合、3次元の面外変形の測定が可能となる¹⁰⁾。被測定物上の座標位置は各撮影装置における仮想投影面の座標に置き換えられる。2台のカメラの相対的な位置、レンズの倍率およびすべての撮影パラメータが既知である場合、空間内の任意の箇所の3次元絶対座標を計算することが可能となる。

図2は2台の撮影装置で測定している状況を示している。測定対象物の空間座標系を(x, y, z)とし、仮想投影面の座標系を(u, v)で表している。点Pは測定対象物上の点、点O_A, O_Bはそれぞれ撮影装置A, Bの投影中心点、点P_A, P_Bは点Pの仮想投影面上の点である。ここで、(u_A, v_A), (u_B, v_B) を決定し、空間内の任意の箇所の3次元座標を計算するためには、撮影装置間の相対的な位置、レンズの倍率および諸々の撮影パラメータを得る必要があり、これらはキャリブレーション作業により決定される¹¹⁾。

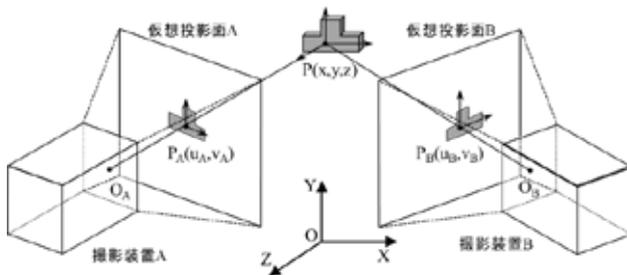
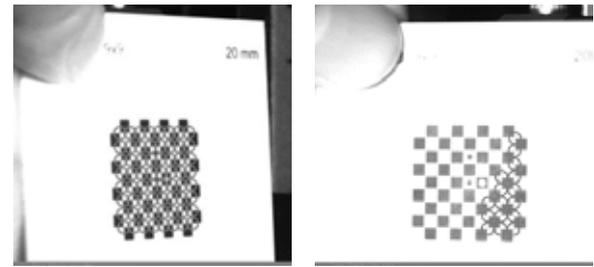


図2 DICによる三次元形状および変位測定の原理^{11), 13)}



(a) マーカー率 100% (b) マーカー率 50%未満

図3 キャリブレーションの様子

2.2 キャリブレーション作業

図3に示すように、キャリブレーション作業は両方の撮影装置でキャリブレーションターゲット(以下、ターゲット)を同時に撮影することによって行われる。本稿において、実験力学で使用される Q400 system 用のターゲットは、既知の幾何形状を有するチェスパターンとなっている。ソフトウェア上ではターゲット上の四角形の角、および中心付近にある3つの円形によって、ターゲットの中心と X, Y, Z 方向が定義される。キャリブレーション作業において、これら特徴点は PC モニタ上で自動的に検出される。なお、Q400 system におけるキャリブレーション作業では、測定結果において一定の精度を確保するために、ターゲット上の四角形の角の検出率(以下、必要マーカー率)が最低でも50%検出されていること、キャリブレーションに使用する画像が5枚以上使用することを推奨している。

2.3 DICによる変位量の取得

図4にDICによる変位量の測定フローチャートを簡易的に示す¹⁰⁾。2台の撮影装置を使用するステレオ法では、2.2で述べたキャリブレーション作業を実施することで、各撮影装置の内部パラメータの決定およびグローバル座標系に対する外部パラメータ(撮影装置の位置および向き)の情報)が決定される。次に、撮影された変形前の左右のカメラのパターンマッチングなどを行い、変形前の3次元形状を計算し、同様に変形後の3次元形状を計算する。その後、変形前後の画像からパターンマッチングを行い、サブセットの変位や回転など大きさを計算することで、3次元方向の変位量を計算することが可能となる。

3. DICによる変位およびひずみ計測に及ぼす影響

3.1 キャリブレーション画像の影響

本稿では、DICにより得られた変位分布を有限要素解析(以下、FE解析)に援用することを目的としており、荷重を受ける構造物の変位量を利用することから、3次元の変位量が測定可能となるよう2台の撮影装置を用いることとした。

3次元の計測における各撮影装置の内部パラメータおよびグローバル座標系に対する外部パラメータは測定精度に影響することから、重要な要素である。したがって、2台のカメラを利用して、精度良く変位量を得るために

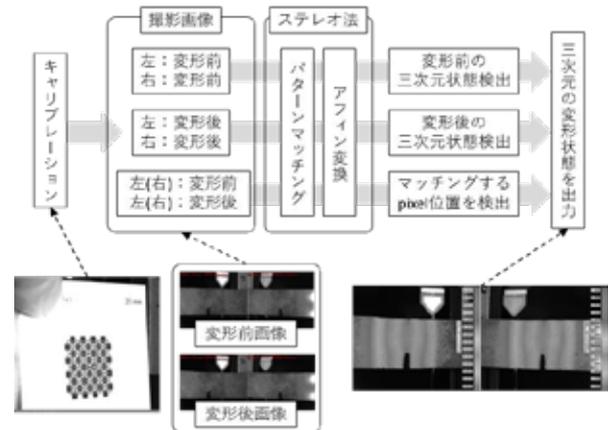


図4 DICにおける変位測定のプロフローチャート¹⁰⁾

は、図3で示したようなキャリブレーション画像を複数枚使用する必要がある。キャリブレーション画像の精度はDICにおける変位の測定精度に影響し、真値に対する誤差として影響する。そこで、キャリブレーションに使用する画像において、撮影枚数と必要マーカー率を変化させ、キャリブレーションに使用する画像が、変位測定精度におよぼす影響を調査した。

本稿では、図5に示すような切欠きを有する3点曲げ試験片を使用した。試験片の材料はPVC-U(無可塑ポリ塩化ビニル)である。次に、図6に示すように、試験片の表面側はDICにより変位量を測定するため、黒色スプレーによりランダムパターンが形成されている。一方、試験片の裏面側は、切欠き先端の変位量を測定するため、切欠き先端にはピアノ線が取り付けられており、ピアノ線の変位量をKeyence社製レーザ変位計LS-7070により測定した。

図7に試験概略図を示す。試験は3点曲げ試験であり、支点間距離は100mmである。試験片の表面側は、DICによる変位測定のための試験構成であり、2台の撮影装置と制御装置、解析用のPCで構成されている。一方、試験片の裏面側は、ピアノ線がレーザ変位計のレーザ光を遮蔽するように、レーザ変位計が設置されている。変位表示器では、ピアノ線の移動量が表示される。図中の荷重は、初期荷重を20Nとして、10Nずつ負荷を上げ、250Nまで負荷した。250N到達後は10Nずつ、

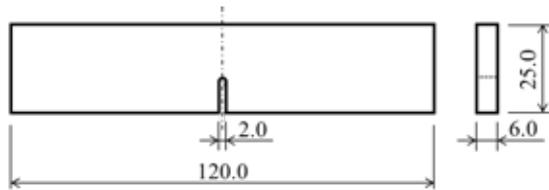
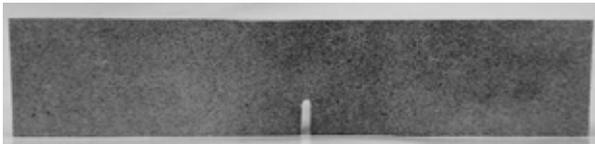
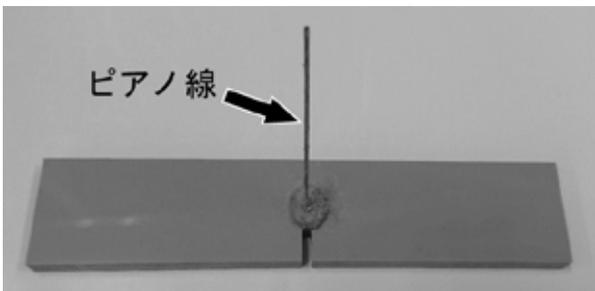


図5 試験片寸法 (単位: mm)



(a) 表面側



(b) 裏面側

図6 切欠きを有する3点曲げ試験片

20 Nまで除荷した。初期荷重 20 Nは、治具などによる遊び影響を除去するために負荷する。次に、表1にDICにおける撮影条件およびキャリブレーション条件を示す。サブセットサイズは 21×21 pixel であり、キャリブレーションに使用する画像枚数を 5枚から 25枚まで5枚ずつ変化させ、且つキャリブレーションにおける必要マーカ率の下限値を 50, 70%, 90%, 100%と変化させた。なお、例えば、必要マーカ率 70%とした場合、使用されるキャリブレーション画像のマーカ率は 70%から 100%のものとなる。

図8にDICにより計測されたY方向の変位分布を示す。変位の分布は、20 Nの荷重を負荷された際の画像と 250 Nの荷重を負荷された際の画像から計算されたものである。切欠近傍の変位が最も大きく、-0.64 mmであった。(a), (b)ともに、画像の両端の計測が行われていない。これは、撮影装置の焦点距離による影響であり、両端の画像はぼやけてしまっていることから、ランダムパターンの変化を解析することができなかった箇所となる。このことから、2台の撮影装置の角度を広く取りすぎると、両者の撮影画像の差異が大きくなり、ひいては計測領域が狭まることから撮影装置の角度の設定には留意が必要である。

図9は必要マーカ率およびキャリブレーションに使用する画像枚数を変化させ、切り欠き先端の変位を計測

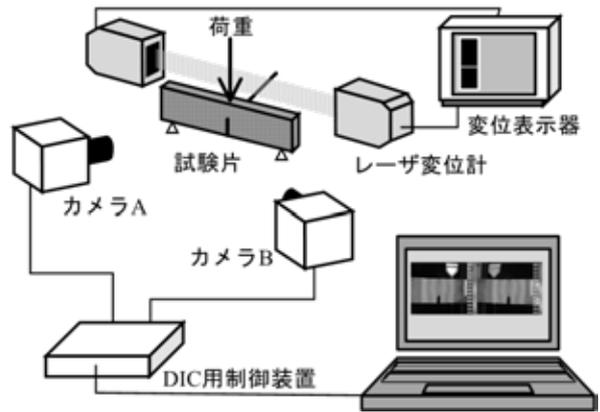
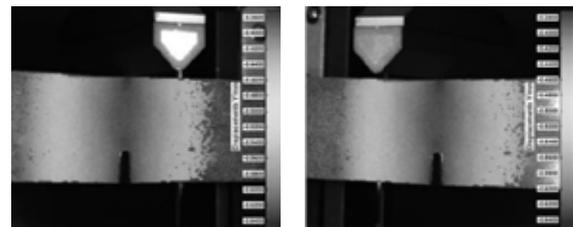


図7 計測装置概略図

表1 撮影条件およびキャリブレーション条件

シャッタースピード	10 msec
F値	8
サブセットサイズ	21×21 pixel
キャリブレーション画像枚数	5, 10, 15, 20, 25
必要マーカ率	50%, 70%, 90% 100%

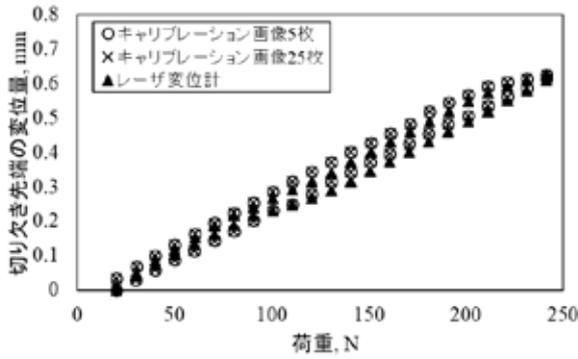


(a)カメラ A側

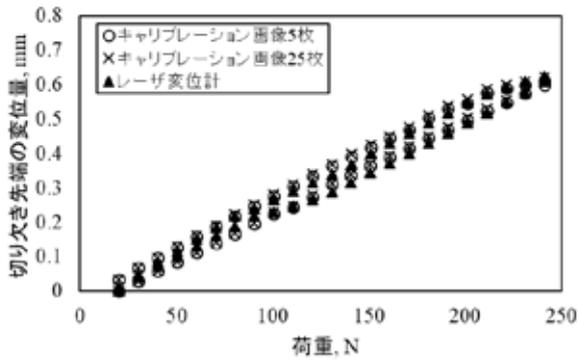
(b) カメラ B側

図8 DICにより計測された変位分布 (20 Nと 250 Nの荷重が負荷された際の画像から計算)

したものを示している。横軸は切り欠き先端のY方向の変位、縦軸は荷重である。図9(a)は必要マーカ率 50%のときのキャリブレーション画像 5枚および 25枚使用した際のDICにより計測された変位量、およびレーザ変位計により計測された変位量の挙動を示している。図9(b)は必要マーカ率 100%のときのキャリブレーション画像 5枚および 25枚使用した際のDICにより計測された変位量、およびレーザ変位計により計測された変位量の挙動を示している。必要マーカ率、キャリブレーション画像の枚数に関わらず、DICで計測された変位量が、レーザ変位計で計測された変位量と比べて若干大きめに出現しているが、200 N以上においては、よく一致している。図9(a)においては、キャリブレーション画像の枚数による差異は見られなかったが、図9(b)においてはキャリブレーション画像枚数が多いほうが計測される変位量が大きくなる傾向が見られ、最大荷重 250 Nにおいては、レーザ変位計により計測された変位量と



(a) 必要マーカー率 50%



(b) 必要マーカー率 100%

図9 キャリブレーション画像枚数と必要マーカー率の影響

よく一致した。200 N未満の荷重において、DICにより計測された変位量が、レーザ変位計により計測された変位量と差異が現れた要因として、試験片の変位量に対してサブセット領域が大きいことが原因と考えられる。DICによる計測においては、変位量が小さいほど、使用するキャリブレーションに使用するターゲットのパターンを小さくし、また、測定対象領域のランダムパターンをより細かく、さらにサブセットを小さくすることが必要と考えられる。本実験で検証された条件においては、200 N以上の荷重を受けたときの変位量において、よい精度で計測可能であることが分かった。

表2に、切り欠き先端部におけるDICで計測された変位とレーザ変位計で計測された変位の絶対誤差を必要マーカー率、キャリブレーション画像枚数で整理したものを示す。誤差の総和は、試験荷重毎の絶対誤差を総和したものであり、最も大きい誤差の総和は、必要マーカー率70%、キャリブレーション画像10枚としたときで、0.7916であった。なお、必要マーカー率が同じであるとき、各必要マーカー率において、誤差に一貫性がないことから、キャリブレーション画像の枚数の影響はないと考えられる。誤差の平均値は、誤差の総和を測定回数で除したものである。必要マーカー率が50%、70%、90%のときにおいては、キャリブレーション画像枚数に係わらず、誤差の総和が0.7から0.8程度、誤差の平均が0.15から0.17程度であり、大きな差はない。

表2 必要マーカー率、キャリブレーション画像枚数により生じる誤差の傾向

必要マーカー率 50%						
キャリブレーション画像枚数	5	10	15	20	25	
誤差の総和	0.7911	0.7731	0.7579	0.7430	0.7803	全平均 0.0163
誤差の平均	0.0168	0.0164	0.0161	0.0158	0.0166	
必要マーカー率 70%						
キャリブレーション画像枚数	5	10	15	20	25	
誤差の総和	0.7901	0.7916	0.7541	0.7232	0.6952	全平均 0.0160
誤差の平均	0.0168	0.0168	0.0160	0.0154	0.0148	
必要マーカー率 90%						
キャリブレーション画像枚数	5	10	15	20	25	
誤差の総和	0.7422	0.7754	0.6863	0.7850	0.7745	全平均 0.0160
誤差の平均	0.0158	0.0165	0.0146	0.0167	0.0165	
必要マーカー率 100%						
キャリブレーション画像枚数	5	10	15	20	25	
誤差の総和	0.5667	0.7304	0.6465	0.7129	0.6714	全平均 0.0142
誤差の平均	0.0121	0.0155	0.0138	0.0153	0.0143	

一方、必要マーカー率が100%のときにおいては、キャリブレーション画像枚数に係わらず、誤差の総和が0.55から0.73、誤差の平均が0.12から0.15程度であり、他の必要マーカー率よりも誤差が15%ほど小さくなった。以上のことから、DICによる変位の測定においては、キャリブレーション画像の枚数よりも、必要マーカー率を100%とするほうが高い測定精度を得られると考えられる。一方で、200 N以上の負荷においては、キャリブレーション枚数および必要マーカー率に係わらず、DICにより測定された変位とレーザ変位計により測定された変位はよく一致した。このことから、DICによる変位の計測においては、必要マーカー率を100%にして計測を行うよりも、変形量に対して適切なランダムパターンのサイズおよびサブセットサイズを設定することが重要と考えられる。

3.2 ランダムパターンおよびサブセットサイズの影響

切り欠きを有する3点曲げ試験の結果から、DICによる変位量の計測においては、変形量に対して、適切なランダムパターンのサイズやサブセットサイズがあると推定された。そこで、図10に示すように、2種類のランダムパターンが形成された円孔を有する試験片に荷重を負荷し、DICによる変位の計測結果に及ぼす影響を調査した。ランダムパターンは、図中の試験片左側が黒色スプレー、右側が油性ペンにより形成されている。黒色スプレーによりランダムパターンが形成されている面(以下、スプレードット面)のドットサイズは約0.05 mm、油性ペンによりランダムパターンが形成されている面(以下、ペンドット面)のドットサイズは約1.4 mmである。試験片におけるDIC計測面の裏側には、図中に示すように、円孔端部から5 mm離れた位置にひずみゲージが貼付されている。DICによる変位の計測は、サブセットサイズが13×13 pixel, 17×17 pixel, 21×21 pixel, 25×25 pixel, 29×29 pixelの5種類で行われ、それらの条件から得られた変位分布を比較する。図11

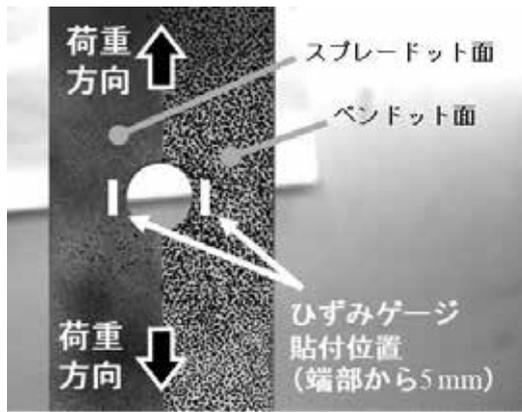
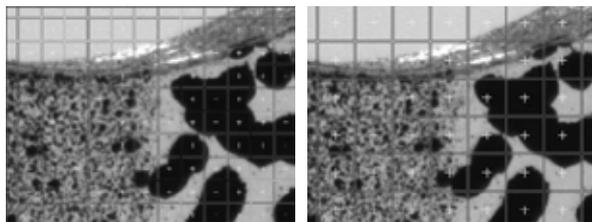
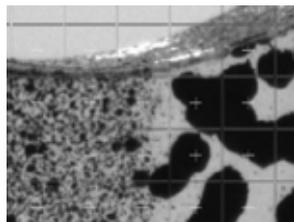


図 10 2種類のランダムパターンが形成された試験片



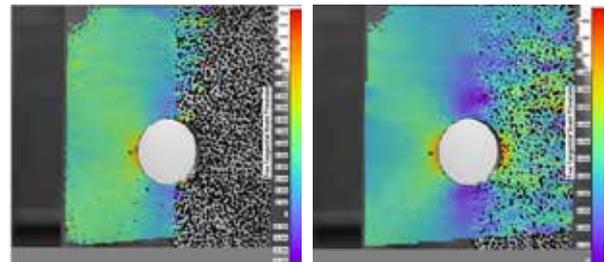
(a) 13×13 pixel (b) 21×21 pixel



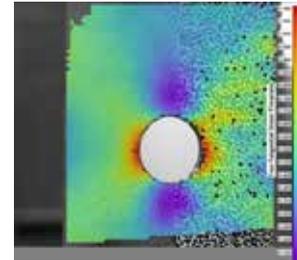
(c) 29×29 pixel

図 11 サブセットサイズの表示

(左側：スプレードット，右側：ペンドット)



(a) 13×13 pixel (b) 21×21 pixel



(c) 29×29 pixel

図 12 変位分布の測定結果

(左側：スプレードット，右側：ペンドット)

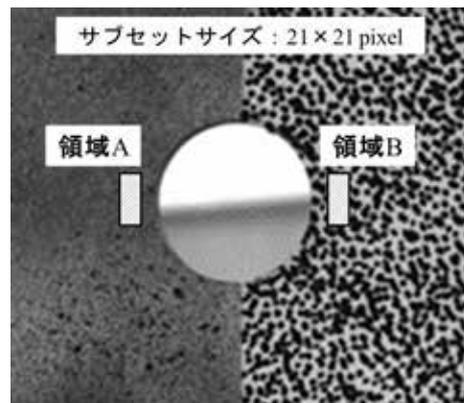


図 13 DICにおけるひずみ計測位置

に、代表例として 13×13 pixel, 21×21 pixel, 29×29 pixel のサブセットサイズを示す。サブセットサイズが 13×13 pixel の場合、一部のサブセット内はペンドットのみで覆われており、多くのサブセットはペンドットよりも小さい。一方、サブセットサイズが 21×21 pixel 以上の場合、サブセット内がペンドットのみで覆われていることはほとんどない。

試験片には、50 kN の荷重を負荷し、DIC により変位分布を計測し、サブセットサイズの影響を調査した。図 12 に、代表例としてサブセットサイズが 13×13 pixel, 21×21 pixel, 29×29 pixel としたときに計測された荷重方向の変位分布を示す。スプレードット面においては、サブセットサイズにかかわらず変位の計測が可能であったが、ペンドット面においては、サブセットサイズが 13×13 pixel では、変位が計測されなかった。一方で、サブセットサイズ 21×21 pixel 以上では、変位が計測されたことから、ドットサイズに対して適切なサブセットサイズがあるといえる。

次に、ランダムパターンが形成されている面の裏側に貼付しているひずみゲージにより検出されたひずみ量と、DIC により計測されたひずみ量を比較した。図 13 にランダムパターンが形成されている面における、ひずみ計測箇所として領域 A, B を示す。領域 A, B は、貼付したひずみゲージと同じ大きさである。DIC によるひずみ量の計測においては、サブセットサイズは両ランダムパターンにおいて変位分布が計測可能となる 21×21 pixel とした。試験荷重は、50 kN まで 5 kN ずつ負荷し、50 kN 到達後は 5 kN ずつ、5 kN まで除荷した。ひずみ量は荷重が 5 kN 変化するごとに計測した。図 14 に領域 A, B における荷重方向のひずみ量の挙動を示す。縦軸はひずみ量、横軸は荷重である。スプレードット面のひずみ量は、荷重の増加に比例して緩やかに上昇している。一方、ペンドット面で計測されるひずみ量は、全体としては荷重の増加に伴い上昇しているが、スプレードット面で計測されるひずみ量の挙動よりも変動が大きく、実

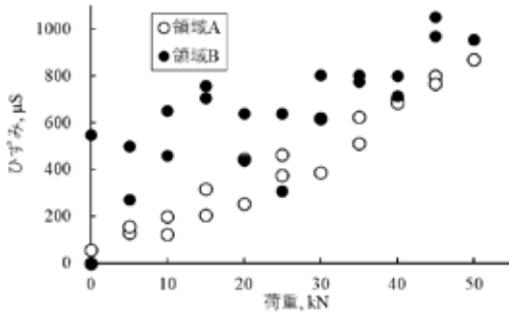


図 14 DIC により計測された領域 A, B の挙動

表 3 50 kN 負荷時のひずみ量の差

	ひずみ, μS	誤差, %
ひずみゲージ	0.845	-
領域A	0.869	2.8
領域B	0.956	13.1

際の挙動と一致していないものと推察される。次に、表 3 に荷重 50 kN が負荷されたときの、ひずみゲージから得られたひずみ量と、DIC により計測された領域 A, B における荷重方向のひずみ量を示す。ひずみゲージにより得られたひずみ量に対して、領域 A で計測されたひずみ量は非常によく一致し、誤差は 3% 以下であった。

以上のことから、DIC による変位量およびひずみ量の計測においては、測定対象物の変形量に対して、適切なランダムパターンのサイズやサブセットサイズがあり、これらは測定精度に影響を及ぼすことが分かった。なお、測定範囲に対してランダムパターンが小さすぎる場合（例えば、撮影装置の画素数よりも小さくなってしまう場合）、ランダムパターンの検出が困難となる傾向にある。また、焦点に対する影響が敏感になり、奥行方向に対する変形の測定が困難となる。一般に、サブセットサイズが大きくなるほど、変位算出精度は高くなる一方で、サブセット内の空間分解能は低下する⁸⁾。測定対象物の全体の変位計測する場合や、局所的な箇所を計測する場合で、サブセットサイズやランダムパターンの大きさを変える必要がある。さらには、前述したように撮影装置が有する画素数の影響を受けることから、測定対象部位の形状や使用する撮影装置の画素数なども考慮してランダムパターンのサイズやサブセットサイズを決定する必要がある。

4. DIC による変位測定と有限要素解析への援用

4.1 脚立への適用

DIC による変位測定においては、測定対象物の変形量に対して適切な撮影条件を設定することができれば、精度良く測定できることが確認された。したがって、DIC によって得られた測定対象物の変位量を、FE 解析に援用することで、妥当性を有する応力状態を計算できると考えられる。そこで、複雑な形状である実構造物を

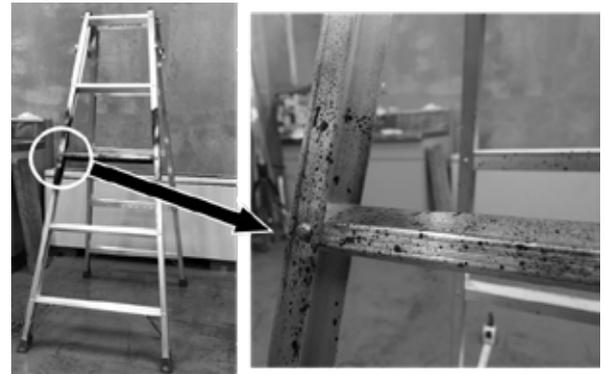
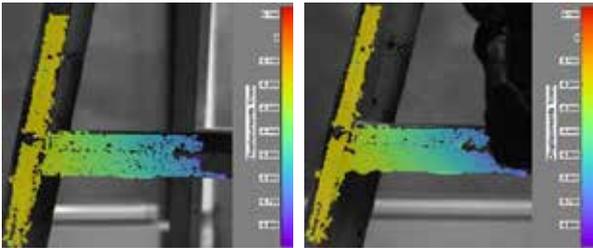


図 15 DIC における変位測定箇所のランダムパターン

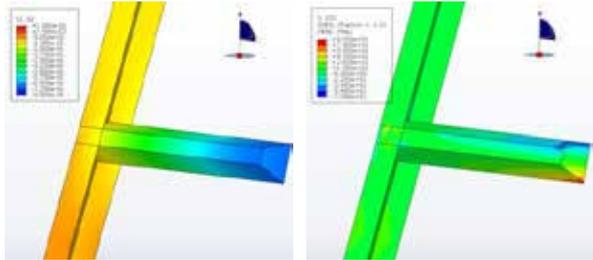


図 16 脚立使用時において発生する変位の測定

対象に、実構造物が使用されている状態で DIC による変位の計測を行い、得られた変位分布を FE 解析に援用することで、実構造物に発生する応力を評価した。図 15 に簡易的な実構造として、本実験で使用する脚立を示す。DIC による撮影箇所は、3 段目の踏ざんと支柱、およびそれらの接合部である。撮影箇所のランダムパターンは黒色スプレーにより塗布されている。サブセットサイズは 21×21 pixel、キャリブレーション画像の撮影枚数は 10 枚とした。図 16 に、実験の様子を示す。作業者が脚立を使用した際の状況を想定しており、2 台の CCD カメラによって 3 段目の踏ざんと支柱の近傍を撮影し、DIC により変位を測定する。作業者の体重は約 600 N であるが、左足は 2 段目の踏ざんに、右足は 3 段目の踏ざんにあることから、3 段目の踏ざんに作用する正確な荷重は不明である。DIC により測定された Y 方向の変位分布を図 17 に示す。踏ざんは最大で、約 0.8 mm 変位しており、踏ざんおよび支柱ともに変位分布が得られた。得られた変位分布と一致するように、FE 解析において境界条件を設定し、応力解析を実施した。解析コードは ABAQUS 6.14 である。要素はシェル要素



(a) カメラ A 側 (b) カメラ B 側
 図 17 DIC により計測された脚立の変位分布



(a) 変位分布 (b) 応力分布
 図 18 FE 解析結果

(SR4)である。脚立の材料はアルミニウムであるが、応力-ひずみ関係が不明なことから、縦弾性率を 70 GPa と仮定した。したがって、弾性解析となる。図 18 に FE 解析結果を示す。図 18 (a)に示すように、当然のことながら、FE 解析により得られた変位分布は、DIC で得られた変位分布とよく一致している。次に、図 18 (b)に FE 解析により得られた Y 方向の応力分布を示す。当然のことながら、踏ざんには曲げ応力が発生している。また、支柱と踏ざんはリベットにより接合されており、支柱側に応力集中が発生していることが確認できる。以上のように、DIC により脚立に生じる変位量を測定し、得られた変位量を境界条件として FE 解析に援用することで、実際の変形を考慮した応力解析、ひいては、妥当性のある脚立の応力評価を行えることが確認できた。

4.2 天井クレーンへの適用

次に、大型構造物を対象として、天井クレーンに発生する応力の評価を、DIC および FE 解析を利用して行った。図 19 に、本実験で使用した天井クレーンを示す。天井クレーンは、つり上げ荷重 2.8 tonf である。DIC による変位の計測箇所は走行レールの端部とした。試験は図 19 に示したように、900 kg の荷をつり上げ(試験 A)、その後、図中左方向へ荷を走行させる(試験 B)。図 20 に、天井クレーンにおける DIC による測定箇所の写真を示す。測定箇所のランダムパターンは、水性塗料を含ませた水溶液を霧吹きによって塗布されている。

図 21 は、試験 B において、計測箇所に吊り荷が最も近づいたときの DIC により計測された鉛直方向の変位分布である。測定された範囲において、0.7 mm から 0.9 mm の変位が測定された。図 22 は、図 21 中にお

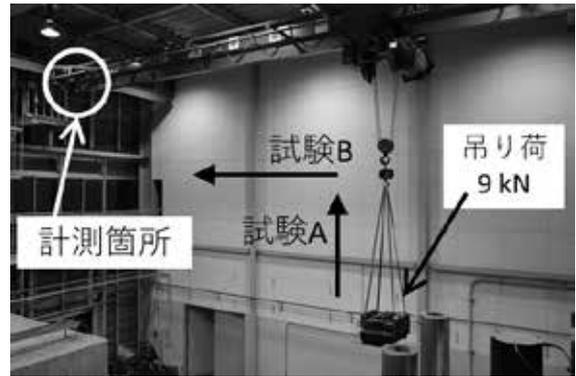


図 19 測定対象とした天井クレーン

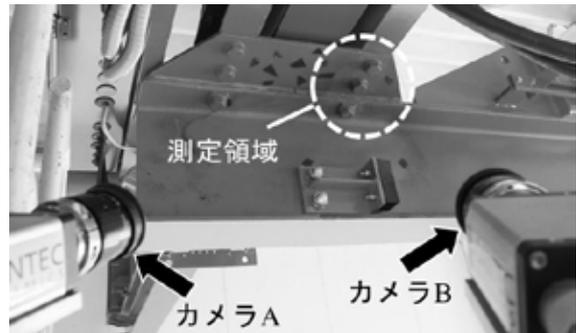


図 20 天井クレーンにおける測定領域

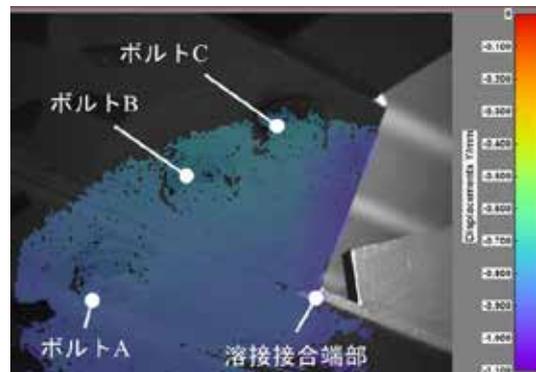


図 21 鉛直方向の変位分布

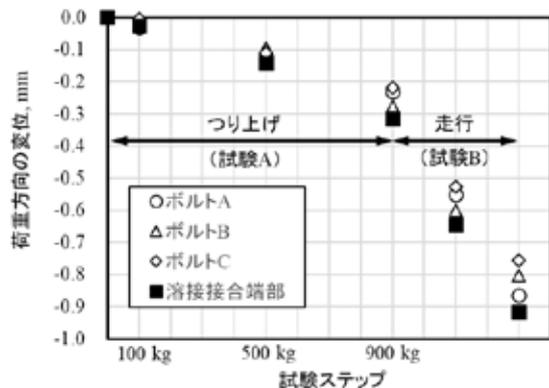


図 22 試験 A および試験 B における各測定点の鉛直方向の変位量

る4箇所の変位量の変化を表したものである。試験Aにおいて、吊り荷による荷重の増加に伴い、すべての計測点において変位量が増加していることが確認できる。最も変位量が小さいのはボルトC部であった。計測された範囲における最大の変位量は約 0.9 mm であり、走行レールと走行レールの支持プレートとの溶接端部で発生した。

3.2と同様に、DICにより得られた変位分布がFE解析結果一致するように、FE解析において境界条件を設定し、応力解析を行った。FEモデルは簡易的に作成しており、走行レールの支持プレートおよび走行レールの要素は、それぞれシェル要素(SR4)、ソリッド要素(C3D4)とした。天井クレーンに使用されている材料は鉄鋼材料であるが、当該材料の応力-ひずみ関係が不明なことから、縦弾性係数を200 GPaと仮定した。したがって、応力解析は弾性解析で計算される。図23にFE解析結果として、Mises応力の分布を示す。最も応力が高い箇所はBolt B近傍であった。簡易モデルによる評価ではあるが、実際にクレーンを使用した際に生じる変位分布を利用して応力解析を行うことによって、妥当性のある応力分布の取得や危険部位の推定ができる。3次元要素のみでFEモデルの作成を行うことにより、より詳細な応力分布や内部応力が得られると推察できる。以上のように、大型の構造物に対してもDICによる撮影条件が整えば、大型構造物の一部分の変形を非接触で測定することが可能である。同様の手法を用いれば、大型構造物の全体の変形から、FE解析に援用することで、実際の変形を考慮した応力解析が行えると推察できる。

5. おわりに

本稿では、実荷重を受ける実構造物を対象に、デジタル画像相関法を利用した実験力学により得られた変位分布を、FE解析に援用し、妥当性のある応力分布を取得する方法を示した。以下に得られた成果を示す。

- 1) DICを利用した変位およびひずみの測定においては、測定物の変形量に対して、適切なランダムパターン サイズおよびサブセットサイズがあり、これらは測定精度に影響を及ぼすことが分かった。
- 2) 作業者が脚立を使用した際に生じる脚立の変位量をDICにより測定した。さらに得られた変位量を境界条件としてFE解析に援用することで、実際の変形を考慮した応力解析、ひいては、妥当性のある脚立の応力評価を行えることが確認できた。
- 3) 天井クレーンの稼働を実験力学により再現し、天井クレーンの走行レール端部に生じる変位量をDICにより測定した。FE解析による応力解析においては、簡易モデルを使用した検討ではあるが、実際にクレーンを使用した際に生じる変位分布を利用して応力解析を行うことによって、妥当性のある応力分布の取得や危険部位の推定ができた。
- 4) 構造物の大きさによらず、DICにより変位量の測定が行える環境であれば、実荷重を受ける構造物全体

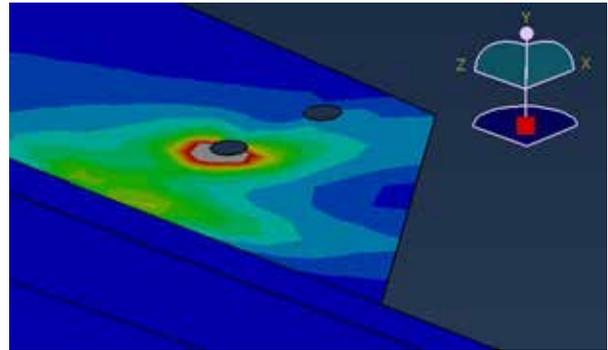


図 23 測定領域の応力分布

の変形から構造物の一部分の変形を非接触で測定することが可能であり、FE解析に援用することで、実際の変形を考慮した応力解析が行えることが確認できた。

以上のように、DICを利用したFE解析を行うことによって、妥当性のある境界条件をもとに計算された応力分布を得ることができ、ひいては、DICを利用したFE解析は従来から多く行われてきた荷重入力のみ为数値解析に比べて高度化が図れたといえる。一方で、構造物に対するDICの活用においては、大型構造物として橋梁を対象としたもの¹¹⁾や、溶接構造物の溶接部からの疲労き裂の発生評価¹⁴⁾などがある。今後は、各種構造物を対象に、DICをはじめとする実験力学により得られた変位分布、および得られた変位分布を境界条件として援用したFE解析を実施することで、き裂の発生やき裂の進展など、破壊に至る直前の変形状態および応力状態の取得方法について検討していく。本稿で述べた方法は非接触にて構造物の変形を、FE解析を活用することで構造物の応力分布を取得できることから、供用中の構造物の変位分布や応力分布を得ることができ、応力集中部の特定期間やき裂発生箇所の推定および特定などが可能となる。これらは、構造物の供用中の破壊を防止することに寄与できる。加えて、ある構造物が災害を起こした場合において、同種の構造物を利用して災害発生前の稼働状況を再現し、本稿で述べたDICとFE解析を活用することで、災害発生箇所の推定や原因究明に寄与することが可能と推定される。さらには、設計の見直しや、同種の構造物の点検につながり、災害の防止に寄与できると考えられる。

謝 辞

本稿で記載されている実験力学の実施においては、東京電機大学大学院 大口浩平 君にご協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) シールドトンネル施工技術安全向上協議会 報告書 3.5 事故発生時のシミュレーション解析(2014) 国土交通省「技術調査関係」。

- <https://www.mlit.go.jp/tec/sekisan/sekou/pdf/2603houkokuusyo0305.pdf> (2020年7月1日 URL 確認)
- 2) 鉄道重大インシデント調査報告書(2019) 運輸安全委員会, RI2019-1.
<https://www.mlit.go.jp/jtsb/railway/rep-inc/RI2019-1-1.pdf> (2020年7月1日 URL 確認)
 - 3) 阪上隆英(2003) 赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力測定. 溶接学会誌, Vol. 72, No. 6, pp. 511-515.
 - 4) 本田尚, 佐々木哲也, 大塚輝人, 橋内良雄(2001) 赤外線応力測定における測定精度に及ぼす熱伝導の影響. 日本機械学会論文集(A編), Vol. 67, No. 659, pp. 1248-1254.
 - 5) 梅崎栄作(2013) 光弾性法による応力分布測定技術の現状と展望. 精密工学会誌, Vol. 79, No. 7, pp. 607-611.
 - 6) 柴田蔵六 (1966) 光弾性による胴締の締付応力の測定. ばね論文集, Vol. 1966, No. 11, pp. 65-68.
 - 7) 阪上隆英(2001) 赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力測定の最近の進歩. 実験力学, Vol. 1, No. 3, pp. 120-126.
 - 8) 有川秀一, 村田学, 吉田陸, 米山聡, 藤本慶久, 大本洋平(2016) 画像相関法の測定精度に対するサブセットサイズとゲージ長の影響. 実験力学, Vol. 16, No. 2, pp. 162-167.
 - 9) 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(2012) 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, pp. I_683-I_690.
 - 10) 柴原正和, 河村恵里, 生島一樹, 伊藤真介, 望月正人, 正岡孝治(2010) ステレオ画像法に基づく三次元溶接変形計測法の開発. 溶接学会論文集, Vol. 28, No. 2, pp. 108-115.
 - 11) DIC (デジタル画像相関法) の基礎と応用 講習会教材 (2019), (一社)日本機械学会, No.19-49, pp. 1-14.
 - 12) DANTEC DYNAMICS, Error Estimations of 3D Digital Image Correlation Measurements, Technical Note, T-Q-400-Accuracy-3DCORR-003-EN.
 - 13) DANTEC DYNAMICS, Measurement Principles of DIC
<https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/stress-strain-espi-dic/digital-image-correlation-dic/measurement-principles-of-dic/> (2020年7月1日 URL 確認).
 - 14) 大口浩平, 山口篤志, 山際謙太, 佐々木哲也, 辻裕一(2019) デジタル画像相関法による溶接継手の疲労発生寿命の推定. 第52回安全工学研究発表会講演予稿集, pp.115-118.