



デジタル画像相関法 (DIC) を用いた ひずみ分布計測事例の紹介

Asakura Yuta

朝倉 悠太*1

近年、ひずみゲージを用いたひずみ計測の代替手法として、非接触で変位やひずみの分布が計測可能なデジタル画像相関法が注目されている。本稿では、デジタル画像相関法を使用した計測事例として、熱ひずみ計測、CFRP 材のひずみ計測、ウレタンシートのひずみ計測、コンクリートの亀裂検出の 4 種類について紹介する。

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

1. はじめに

非接触でひずみ分布が計測できることから、近年ひずみゲージに替わる代替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、図 1 に示すように試験体表面に白と黒から構成されるランダムに塗装されたスペckルパターンをカメラで撮影し、荷重負荷に伴う試験片の変形前後の相関から変位分布やひずみ分布を画像解析により計測する

手法である⁽¹⁾。一般的なひずみ計測では、ひずみゲージを用いることが多いが、熱ひずみ計測、薄膜などの板厚が薄い試験体、100% 伸びを超えるような高伸長材のひずみ計測、クラックが入る試験体などへの適用は難しいのが現状である。しかしながら、DIC 計測では、試験体表面にスペckルパターンを塗装することにより、上記に示すようなひずみゲージでは計測が難しい試験体のひずみ分布や変位分布を計測することが可能である。

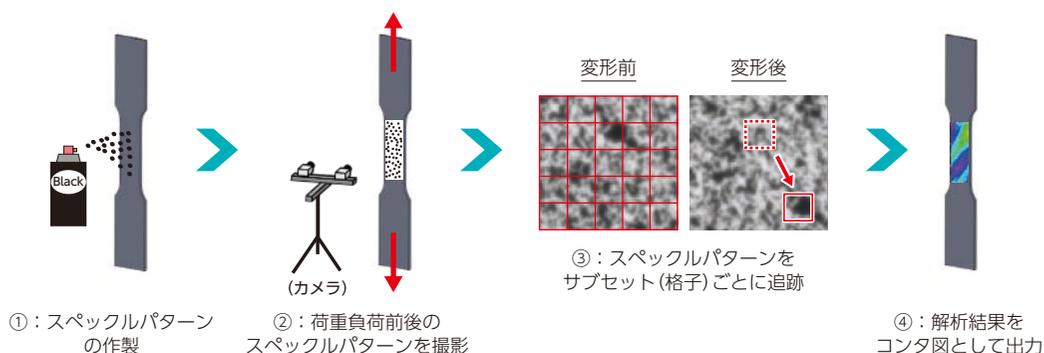


図 1 DIC 計測方法概略図

*1：計測事業部 計測技術部 磯子グループ 一般計量士、環境計量士 (騒音・振動関係)

本稿では、DICを用いた、熱ひずみ計測、CFRPのひずみ計測、ウレタンシートのひずみ計測、コンクリートの亀裂検出の4種類の計測事例について紹介する。

2. 熱ひずみ計測

一般的に材料の線膨張係数を計測する場合、熱機械試験機などを使用するが、単純形状の試験片の全体の平均的な熱ひずみしか計測ができず、加工済みの試験体などの熱ひずみ分布を計測することは難しい。また、温度補償ゲージを用いて熱ひずみを計測した場合、ひずみの温度によるドリフトを完全に除去できないため、定量的な計測がで

きない。DICは、撮影した1枚目の画像をリファレンス (Ref) として、2枚目以降の撮影画像に対して、1枚目のRef画像と比較してどれだけ試験体に変形したかを画像解析によって算出している。したがって、昇温前の画像を撮影しておくことにより、温度補償ゲージとは異なり、温度による熱ひずみを分布として捉えることが可能である。本章では、熱ひずみ計測を実施した試験例を紹介する。

熱ひずみ計測は、万能試験機 (INSTRON 59 R5582) に高温用のスペckルパターンを塗装した試験片 (S45C 調質材、JIS5号試験片、標点間距離50mm、幅25mm、厚さ3mm) を取り



図2 熱ひずみ試験状況

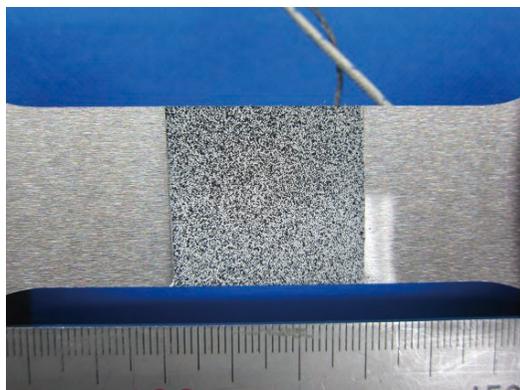
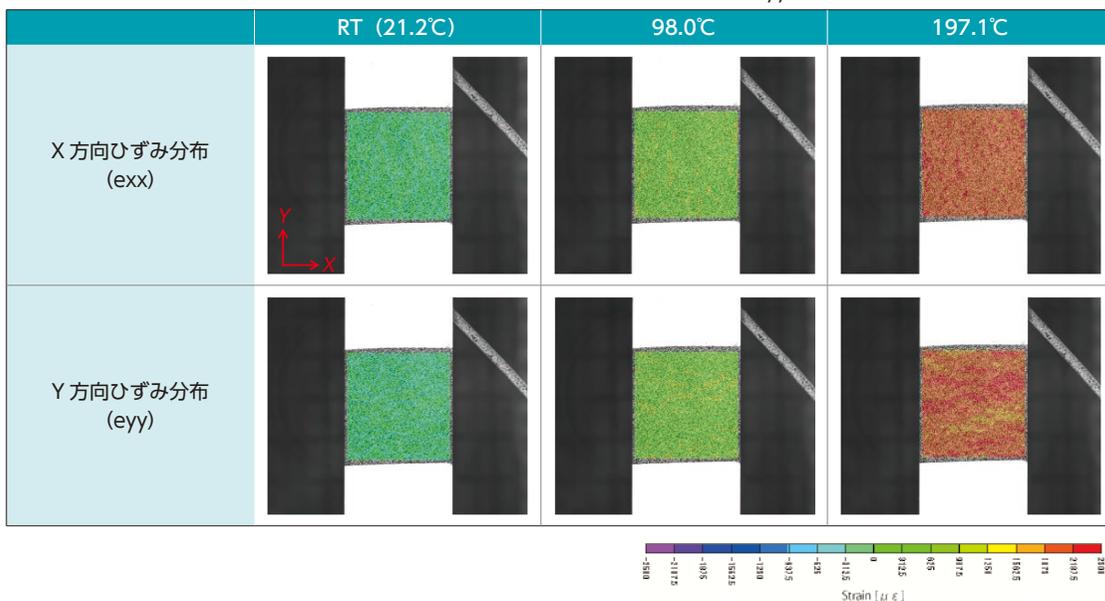


図3 試験片の高温用塗装部

表1 各温度における平均熱ひずみ分布 (exx, eyy)



付け、恒温槽で加熱することにより実施した。試験状況を図2に示す。スペckルパターンの塗装は、試験片中央の30×25mmの範囲に施工した。試験片の高温用塗装部写真を図3に示す。試験は、室温、100℃、200℃の3点の温度条件で実施した。計測は、カメラ1台の2D-DICで実施し、画角を60×50mm（分解能：0.0246mm/pixel）、サンプリングレートを5fps（fps: frames per second）とした。熱ゆらぎによる影響を緩和させるため、各温度につき101枚撮影し、サブセット（格子）サイズを21×21pixel（0.52×0.52mm）に設定して解析することで、101枚の平均熱ひずみ分布を算出した。

各温度における平均熱ひずみ分布（ ϵ_{xx} 、 ϵ_{yy} ）を表1に示す。温度上昇によって、ひずみが均一に増加していることがわかる。次に温度と平均熱ひずみの関係を図4に示す。線膨張係数は、アドバンス理工製の熱機械試験機（DL-7000型）を使用し、押し棒式にて計測した。DICの ϵ_{xx} はコンタ画像の水平方向の平均ひずみ、 ϵ_{yy} はコンタ画像の鉛直方向の平均ひずみを示す。本結果は、室温での平均熱ひずみがゼロとなるように補正をした結果である。結果として、線膨張係数から算出した熱ひずみとほぼ一致した。計測温度197.1℃における相対誤差は、 ϵ_{xx} で2.48%、 ϵ_{yy} で3.61%であり、どちらも5%以下の相対誤差で計測できていることがわかる。

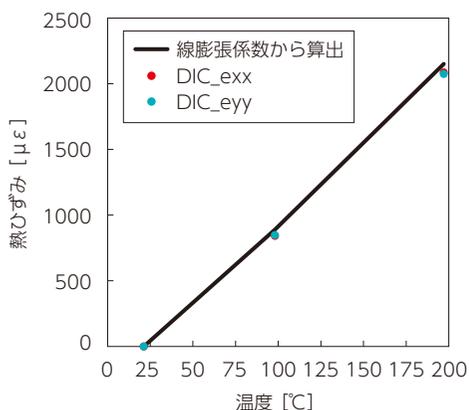


図4 温度と平均熱ひずみの関係

3. CFRP 板材

CFRPなどの複合材におけるひずみ計測では、複合材用のひずみゲージを用いるが、ひずみゲージを接着した箇所でクラックなどが発生した場合、ひずみゲージが断線する可能性がある。また、応力集中部などは、形状と繊維の配向による両方の影響を正しく評価する必要がある。本章では、CFRPの板材に円孔を設け、引張試験にて応力集中を発生させた場合のひずみ分布を計測した例を紹介する。

引張試験は、疲労試験機（島津製作所 EHF-FG05-4LA）を使用した。試験片は、長さ250mm、幅25mm、厚さ3mmのものであり、中心に直径2.5mmの円孔を設けた。プリプレグには東レ株式会社製P3252S-20の一方方向材を使用した。CFRPの繊維方向は45deg方向に様なものである。試験片の両端にはGFRP製のタブ（長さ50mm）を接着した。疲労試験機による引張試験状況を図5に示す。スペckルパターンの塗装は、試験片全体の150×25mmの範囲に施工した。試験片塗装状況を図6に示す。引張試験は



図5 CFRP 引張試験状況



図6 CFRP 試験片塗装後

室温環境かつ変位制御とし、変位速度を1mm/minとした。計測条件は、カメラ1台の2D-DICで実施し、DICの画角を120×100mm(分解能:0.0490mm/pixel)、サンプリングレートを10fpsとした。撮影した画像は、サブセットサイズを21×21pixel(1.03×1.03mm)に設定して解析し、ひずみ分布を算出した。

図7に破断直前の円孔周りの荷重軸方向ひずみ分布を示す。結果として、円孔部周辺で鉄鋼と同様の応力集中部とCFRPの繊維方向にひずみの高い箇所が同時に見られた。このことから、DICを用いることにより、CFRP特有の繊維方向の分布と円孔による応力集中の影響を同時に把握できることが確認できた。

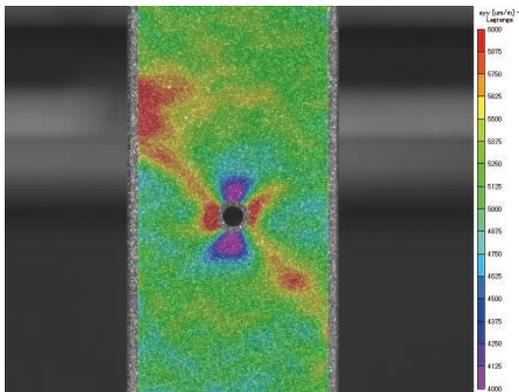


図7 破断直前の円孔周りの荷重軸方向ひずみ分布

4. ウレタンシート

シート状の厚さが小さいもののひずみや変位を計測したい場合、ひずみゲージの剛性による影響を考慮する必要があり、計測には注意が必要である。また、ゴム系の高伸長材料の場合にはひずみゲージではひずみを計測することができず、引張試験機のクロスヘッド変位や標点間に変位計を設置して伸びを計測しているのが現状である。本章では、引張試験にてウレタンシートの変位分布を計測し、標点間距離の変位量からひずみを算出した例を紹介する。

試験機は万能試験機 (INSTRON 59R5582)

を使用して、ウレタンでできたシート(厚さ0.19mm)をJIS K 6251 ダンベル状7号型(平行部幅2.0mm、標点間距離10mm)に打ち抜いて製作した試験片の引張試験を実施した。試験状況を図8に示す。スペckルパターン(両端長さ7mm)を除く試験片全域の範囲に施工した。本試験片は、厚さが0.19mmしかなく、塗膜剛性による影響を避けるため、ウレタンシートが黒色であったことから、白パターンのみを塗装した。試験片塗装状況を図9に示す。計測は、室温環境かつ変位制御とし、変位速度を15mm/minとした。カメラ1台の2D-DICで実施し、画角を82×69mm(分解能:0.0336mm/pixel)、サンプリングレートを5fpsとした。撮影した画像は、サブセットサイズを11×11pixel(0.37×0.37mm)に設定して解析した。

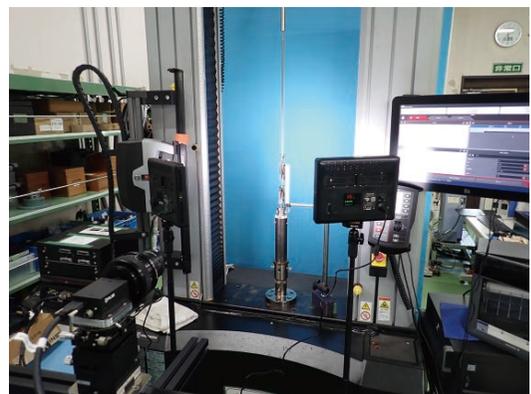


図8 ウレタン引張試験状況

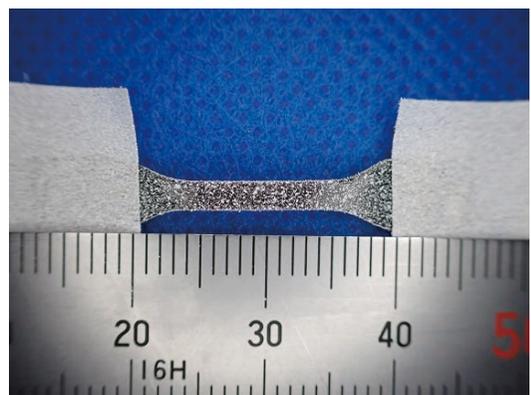


図9 ウレタン試験片塗装後

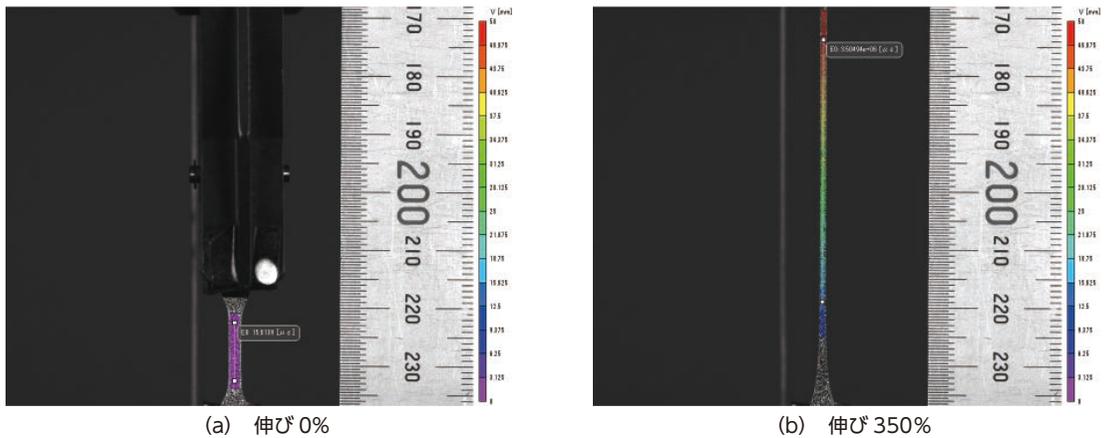


図 10 ウレタン試験片の荷重軸方向の変位分布

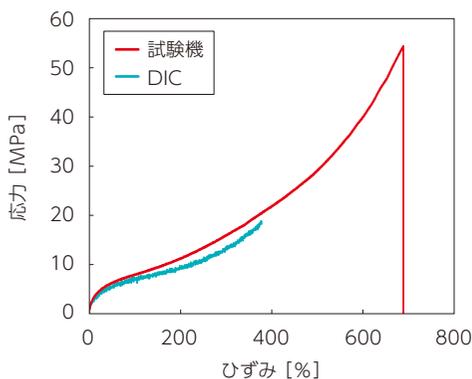


図 11 応力ひずみ線図

DIC の荷重軸方向の変位分布を図 10 に示す。350%伸びまでは、若干の解析欠けはあるものの標点間距離のひずみの算出は問題ないと考えられる。応力ひずみ線図を図 11 に示す。試験機の応力は荷重と平行部の公称断面積から算出し、試験機のひずみは、チャック間距離をクロスヘッド変位で除した値から算出した。DIC のひずみは、2 点間（標点間距離 10mm）の初期長さに対する伸び量から算出した。試験機荷重とクロスヘッド変位から算出した値では、標点間距離だけでなく、つかみ部の影響も含んでいることから、同じひずみ量でも応力が高めに出ていることを確認した。今回の計測では、約 350% 伸びまでは計測できたが、破断伸びを含む 350% 以上の伸びについては、さらに画角を広げる必要がある。また伸び

により幅方向の有効画素数が少なくなるため、幅方向は解析ができなかった。

5. コンクリート材のクラック検知

当社では、インフラ保全に関する計測技術に注力している。その中で、DIC は橋梁に用いられている鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版）などコンクリート材のひずみや変位分布計測技術の確立を目指している。RC 床版は内部に鉄筋を配置した構造であることから、その破壊挙動やひび割れが複雑であり⁽²⁾、ひずみの大きい（応力が集まっている）箇所を正確に把握することが難しい。そこで本章では、模擬 RC 床版の 4 点曲げ試験を実施し、RC 床版の曲げによるひび割れ検出について紹介する。

試験機は、株式会社 IHI 技術開発本部所有の大型疲労試験機（鷲宮製作所）を用い、高さ 200mm、奥行き 250mm、長さ 3000mm のコンクリート試験体について、4 点曲げ試験を実施した。4 点曲げのスパン長を 2400mm、押し治具間距離を 500mm とするよう試験体を設置した。試験状況を図 12 に示す。中央に幅 200mm、長さ 1000mm の範囲にスペックルパターン塗装を施工した。図 13 に塗装後の模擬 RC 床版の写真を示す。計測は、室温環境にて、7kN をプリロードとして、45.5kN になるよう荷重を負荷

した。カメラ1台の2D-DICで実施し、画角を1046×875mm（分解能：0.427mm/pixel）、サンプリングレートを2fpsとした。撮影した画像は、サブセットサイズを25×25pixel（10.7×10.7mm）に設定して解析し、荷重45.5kNにおけるひび割れの開口変位は、101枚の平均ひずみ分布から算出した。

結果として、各荷重における水平方向（exx）ひずみ分布を表2に示す。本結果から、荷重14kN付近からひび割れが発生し始め、荷重が

増加するごとにひび割れの数が増加していることが確認できた。また、図14に荷重45.5kN時のひび割れの開口変位をプロットした図を示す。開口変位は図15に示すクラック部をはさんだ15pixel（約6mm）間の変位を7点のひび割れに対して算出した。この図から最大で約0.18mmの開口変位が発生したことがわかる。目視では見落とす可能性があるひび割れの数、位置および開口変位について、1m程度の画角であればDICを使用することで評価可能であることを確認した。

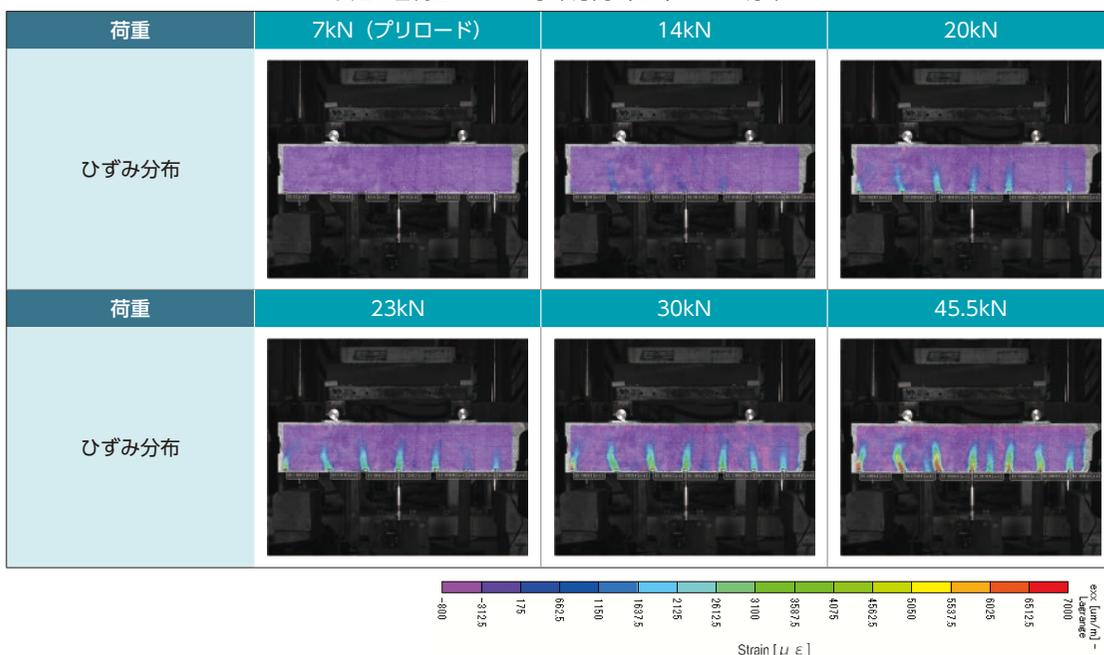


図12 模擬RC床版 4点曲げ試験状況



図13 塗装後の模擬RC床版

表2 各荷重における水平方向（exx）ひずみ分布



6. まとめ

本稿では、DIC を用いたさまざまな計測事例について紹介した。DIC はスペックルパターンの塗装や熱ゆらぎなど計測環境の外乱の影響により、ひずみゲージと比較すると精度は劣るものの、ひずみゲージでは計測できない対象物や条件、ひずみ分布や変位分布を1度の計測で算出できるメリットを有している。今後はひずみゲージか

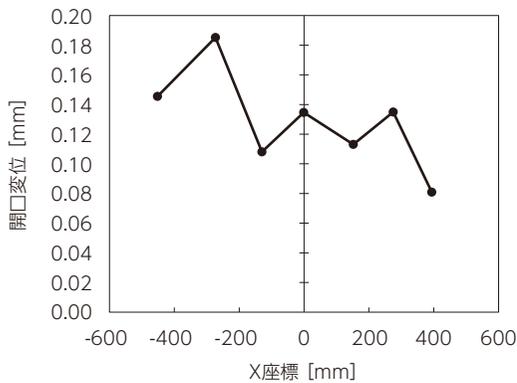


図 14 荷重 45.5kN 時のひび割れの開口変位

ら DIC などの画像計測技術にシフトしていくことが予想されていることから、当社でもより高精度、かつ多様な対象物に対して DIC 計測が可能となるよう技術検討を進めていく予定である。今後、さまざまな材料や対象物のひずみや変位計測に DIC 技術が採用されていくことを期待する。

7. 謝辞

本稿の執筆にあたり、ご協力をいただきました株式会社 IHI 技術開発本部 技術基盤センター 先進生産プロセス技術部、材料・構造技術部の皆さまに心より感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 朝倉悠太、及川秀行：デジタル画像相関法を用いたひずみ分布計測、IIC REVIEW、No.64、2020/10、pp.46-51
- (2) 吉田有希、竹嶋夏海、轟菁、木作友亮、岡田誠司：コンクリートのひび割れを考慮した道路橋床版の構造性能の解析評価、IHI 技報、Vol.62、No.1、2022、pp.30-40

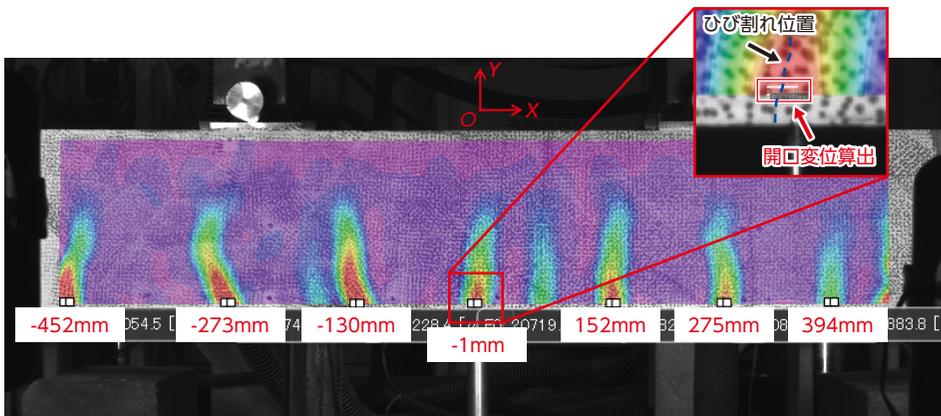


図 15 開口変位算出位置



計測事業部 計測技術部 磯子グループ
一般計量士、環境計量士（騒音・振動関係）

朝倉 悠太

TEL 045-759-2085

FAX 045-759-2119