

# 応力発光による工業製品の経年劣化診断への応用

前 田 一 輝<sup>\*1</sup>

杉 浦 弘 忠<sup>\*2</sup>

倉 橋 直 也<sup>\*3</sup>

藤 田 寿 広<sup>\*4</sup>

## [要 旨]

応力発光塗料を工業製品に適用し、画像処理により応力発光による輝度値を時系列評価、フレーム内の応力分布評価することにより、繰り返し荷重による発光や応力集中や発生タイミングなどの定性的な評価を行った。

## 1 はじめに

工業製品はその使用期間中に故障や破損などのトラブルが起きないように事前に数多くの検証が行われている。その中でも物理的な強度評価は、その製品の安全性を確認するために極めて重要な評価である。どの部品にどのような力が加わっているか、どこに注意すべきかなど、事前に経験や有限要素法 (FEM) などから検証を行うが、最終的には実製品の試験での評価が必要になる。強度試験における評価方法としては過去から様々な試験手法が考案され、各々の特徴に応じて現在も使用されている。<sup>1)</sup> その中でも応力発光塗料は新しい技術で今後の活用が期待される評価手法の一つである。応力発光塗料は外部からの機械刺激により発光する発光体を樹脂と混合させたものが市販されており、被試験体に塗布することによって容易に利用できる。その発光の特徴は既報<sup>2)</sup> によると“ひずみ量”と“ひずみ速度”に比例して発光強度が大きくなり、通常は蛍光体として燐光しているが一定ひずみ以上の力が加わる発光を始める性質がある。

\*1 中丹技術支援室 主任研究員

\*2 中丹技術支援室 会計年度職員

\*3 基盤技術課 副主査

\*4 企画連携課 技師

本研究では市販されている応力発光塗料を形状や材質の異なるものに塗布し、発光を撮像したものの画像解析で評価を行う。

## 2 実験方法

### 2.1 応力発光塗料塗布処理

事前に被試験体の汚れを落とし、白色水性スプレーでサーフェイス処理を行ったのち、応力発光塗料 (エポキシ樹脂: 二液硬化型、堺化学工業株式会社製) を塗布する。これは応力発光の微弱な発光をとらえやすくするためであり、その効果は後述する。発光塗料はシンナーで薄めたのちエアブラシを使用して均一に塗布する。その後、樹脂の硬化のため1週間以上養生する。

### 2.2 実験及び発光解析方法

応力発光の発光条件を得るために、万能材料試験機を用いて、引張速度及び荷重条件を調べた。動画撮影には家庭用ビデオカメラ (SONY 製 4K ビデオカメラ: 型式 FDR-AX45) 画素数 1280×720 撮影速度 29.7Hz (0.0367 fps) とし、撮影時の条件を、絞り F3.7、フォーカス及び明るさはマニュアル設定した。また試験時に他光源からの光が入らないように覆い、消灯下の条件で試験を行った。発光解析方法は既報<sup>1)</sup> による方法を参

考として画像処理は得られた動画はグレースケール (256 階調) に変換後、各フレーム内の輝度値から次の処理を行った。

- (1) 時系列 (フレーム間) 評価
  - ・ノルム (ユークリッド距離) (Det)
  - ・相関係数(Rt)
  - ・輝度値の総和(H0)

$$\hat{I}_t(x, y) = I_t(x, y) - \bar{I}_t$$

$$D_{et} = \sqrt{\sum_{x,y} \{\hat{I}_t(x, y) - \hat{I}_{t-1}(x, y)\}^2}$$

$$R_t = \frac{\sum_{x,y} \hat{I}_t(x, y) \hat{I}_{t-1}(x, y)}{\sqrt{\sum_{x,y} \hat{I}_t(x, y)^2} \sqrt{\sum_{x,y} \hat{I}_{t-1}(x, y)^2}}$$

$$H_0 = \sum_{x,y} I(x, y)$$

- (2) フレーム内評価 (発光箇所の輝度値比較)
 

任意のフレームの発光箇所の輝度値を取り出し、FEM と比較する。

### 3 結果及び考察

#### 3.1 丸棒繰返試験

応力発光塗料の試験を行うに当たり基礎的な情報を得るため、万能材料試験機を用いて、表1に示す条件で10往復の発光状態を調べた。

表1 試験条件

材質:	SWCH-6A
形状:	φ5.37 mm
つかみ具間距離	100mm
荷重	5kN, 2kN
引張速度	30mm/min, 20mm/min, 10mm/min

各条件における解析結果を図1～4に示す。最も発光量が大きくなる条件の[5kN 30mm/min]時は目視でも明確に発光が確認でき、画像処理による結果でも発光が捉えられている。

[2kN 30mm/min]の場合は目視では確認できず、画像処理でも明確な発光は確認出来なかった。[2kN 20mm/min], [2kN 10mm/min]の場合、目視ではわからなかったが、画像処理では発光を捉えることできた。

また1回目は大きく発光するが、2回目以降は著しく発光量が減ることがわかった。発光により蓄光量が減少したことによるものと考えられる。

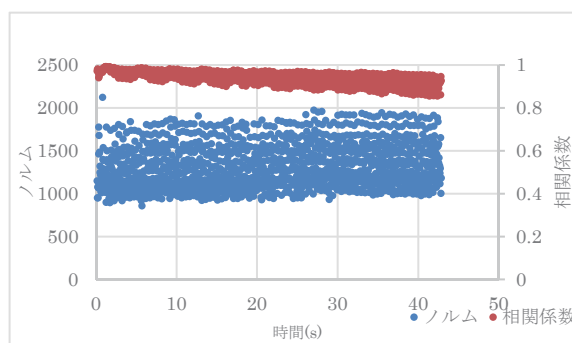


図1-1 ノルム及び相関係数(5kN 30mm/min)

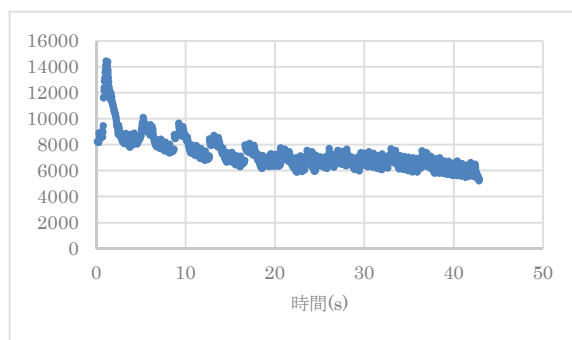


図1-2 輝度値の総和(5kN 30mm/min)

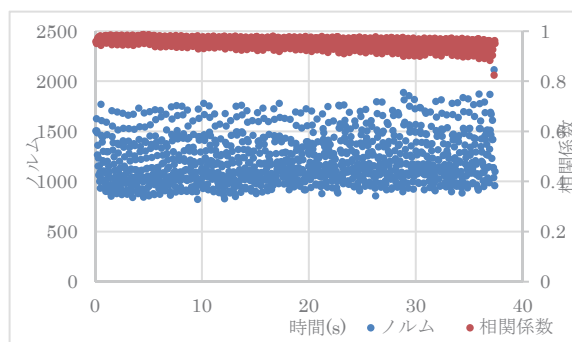


図2-1 ノルム及び相関係数(2kN 30mm/min)

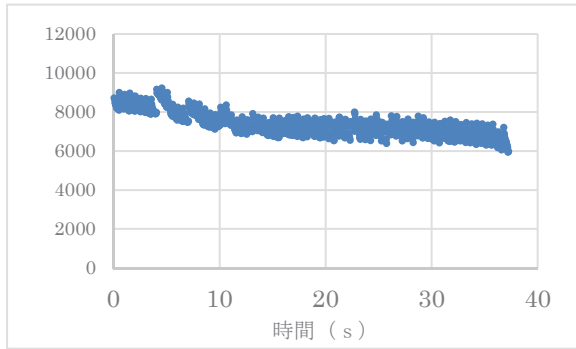


図2-2 発光量の総和(2kN 30mm/min)

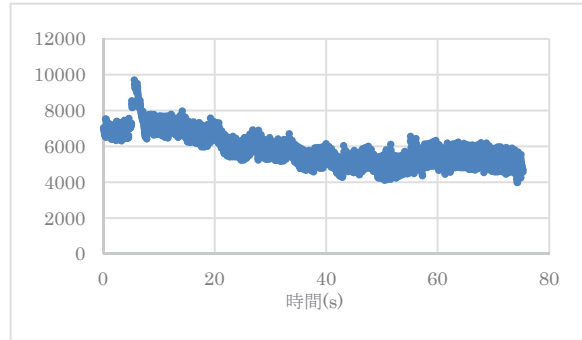


図4-2 発光量の総和(5kN 10mm/min)

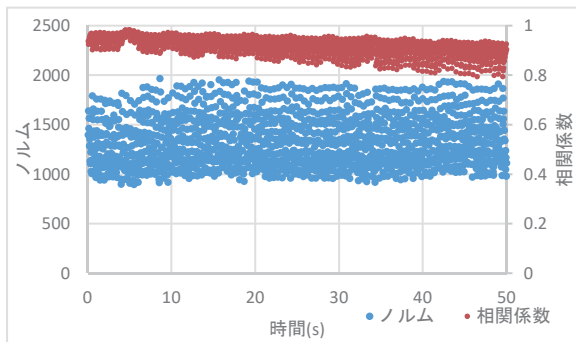


図3-1 ノルム及び相関係数(5kN 20mm/min)

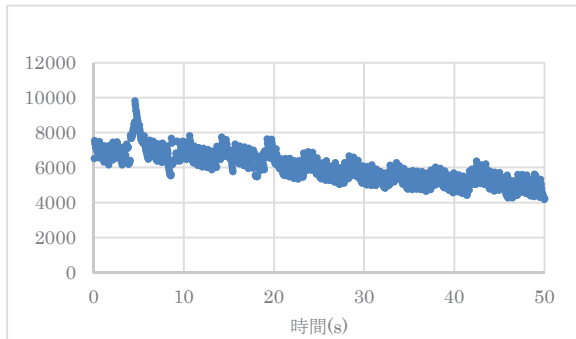


図3-2 発光量の総和(5kN 20mm/min)

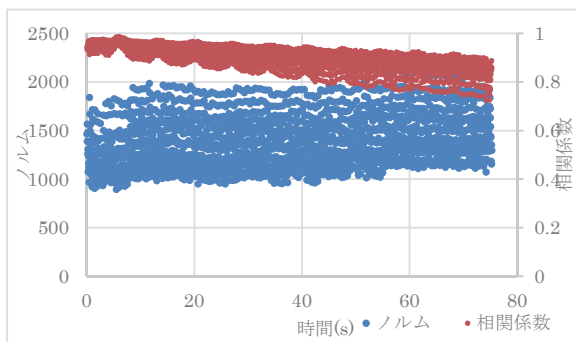


図4-1 ノルム及び相関係数(5kN 10mm/min)

### 3. 2 下地による影響評価

発光塗料の下地による影響を調べるため、樹脂試験片の半分には水性白色スプレーを塗布し、十分に養生を行ったのち、全体に応力発光塗料の塗布を行い、表2の条件で発光量を測定した。

表2 試験条件

材質	PMMA (3D プリンタ)
形状	樹脂引張試験片
つかみ具間距離	100mm
荷重条件	変位量 1mm
引張速度	10mm/min

図5は試験を行った動画を抜き出したものであり、目視においても1秒後の状態と6秒後の状態の違いが確認できる。図6は白色スプレー塗布部(白色部)と無処理部の発光量の解析結果であり、白色部の発光が鮮明となり、微弱な発光が捉えやすいことが定量的に示された。

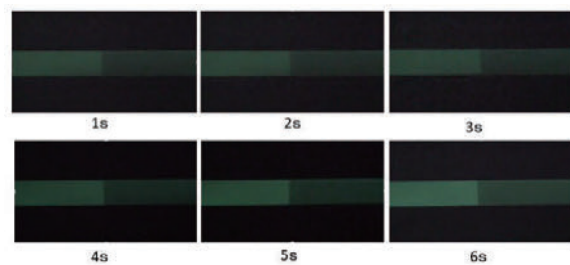


図5 発光状態 (左: 白色部有、右: 無処理)

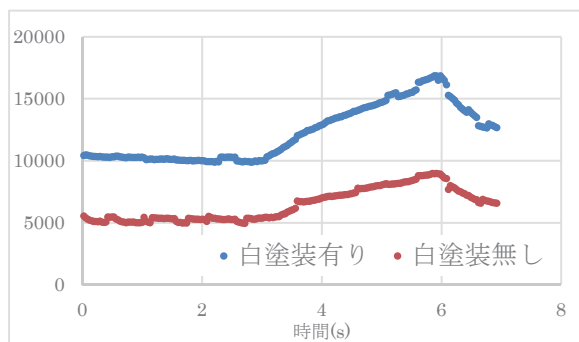


図6 発光量の総和

### 3.3 2円孔付き樹脂引張試験

応力集中を明確にするため、図7に示す樹脂試験片に二つの円孔（φ2.5mm）を設け、これまでと同様に応力発光塗料を塗布し表3に示す条件で引張試験を行った。

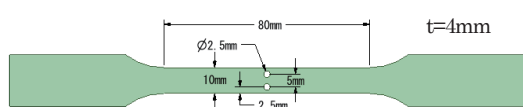


図7 2円孔付き樹脂引張試験片

表3 試験条件（樹脂試験片2円孔）

材 質	PMMA (3Dプリンタ)
形 状	樹脂引張試験片 (図7参照)
つかみ具間距離	100mm
荷重条件	変位量 1mm
引張速度	10mm/min

試験時の発光状態を図8示す。

全体が徐々に発光が始まり約3秒後では円孔に応力集中による発光が始まる。また約4秒付近では部分的に発光量が大きくなり、約6秒付近では発光塗料の亀裂による発光が始まっている。約6秒付近の発光はそのまま画面上下に亀裂が進展していく。11.8秒では樹脂試験片の破断による衝撃が発生し、大きな発光が生じている。

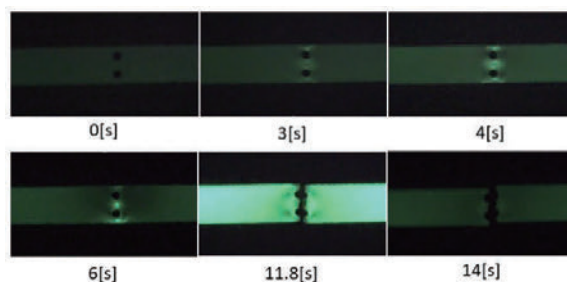


図8 発光状態

解析結果を図9-1、9-2に示す。11.8秒の破断時にノルム、相関係数ともに大きく反応し、また輝度値の総和も大きく増加している。

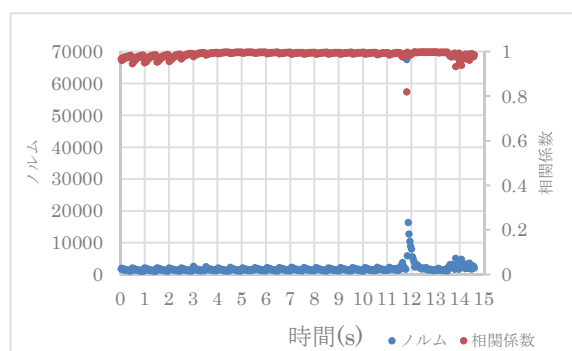


図9-1 ノルム及び相関係数

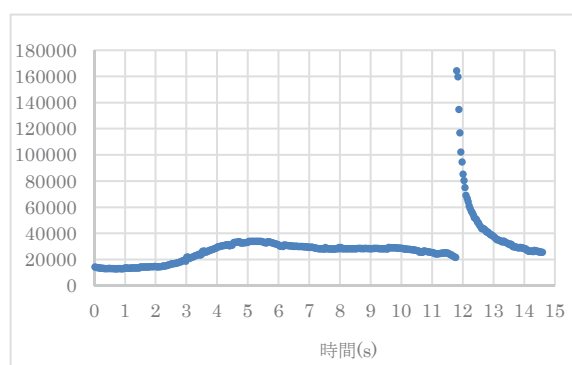


図9-2 輝度値の総和

弾性域内の応力集中による発光を見るため、3秒付近のデータを詳細に解析した結果を図10-1、2に示す。一部、発光が始まることにより若干の上昇傾向はあるがノルム及び相関係数はノイズによる変動に埋もれていた。また発光量の総和では

上昇の変動は捉えられるが、破断時のような特徴的な上昇は見られなかった。

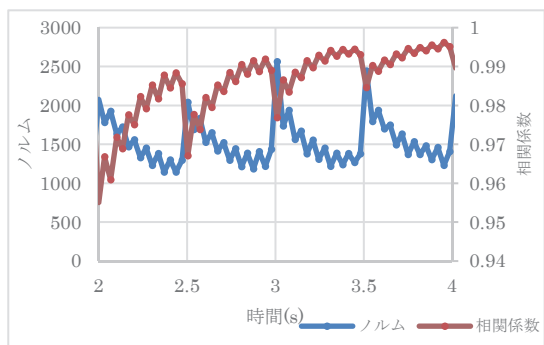


図10-1 ノルム及び相関係数

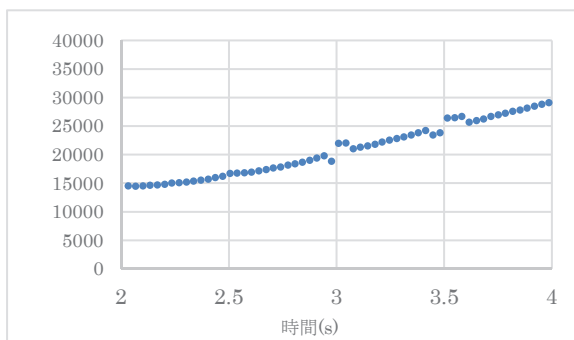


図10-2 発光量の総和

次に3秒付近のフレームから代表的なポイント3点の抽出位置、その時の条件のFEMの結果を図11に示す。また抽出したポイントの輝度値及び応力値を比較したものを図12に示す。

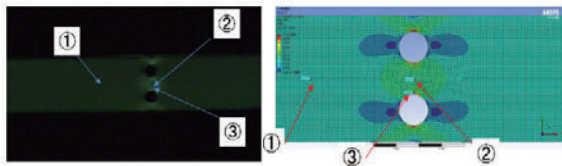


図11 左:発光状況 右:応力コンター (3s)

FEMでの応力値がポイント①～③の順に大きくなったことに対して応力発光の解析値もポイント①～③の順に大きくなっており、傾向が一致していることを確認できた。発光のタイミングを上手

く捉えられればFEMの妥当性の検証にも使用ができる。

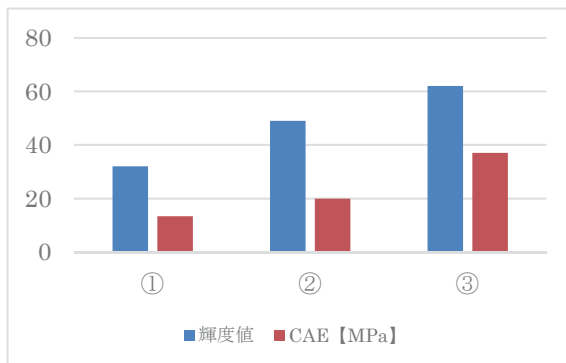


図12 輝度値と応力値比較

### 3.4 リフター試験

当センターで製作した万能材料試験機の金属製チャックを取り替えるためのリフター (図13左図) に対して、持ち上げ部 (図13右図) に応力発光塗料を塗布して実使用時の持ち上げ部の発光を測定した。持ち上げ部の材質はSS400であり、持ち上げ部にかかる荷重は60kg (片側30kg) とした。

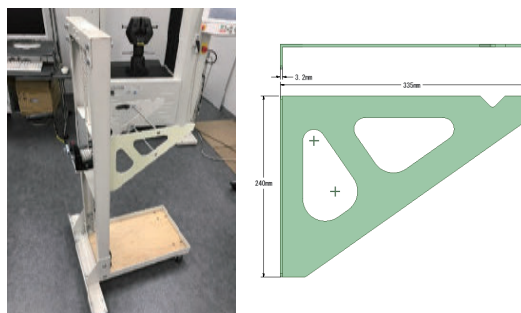


図13 左:チャックリフター  
右:持ち上げ部設計図面

試験時の発光状況を図14に示す。持ち上げ前後の差異は観察できなかった。この解析結果を図15-1、15-2に示す。画像処理による解析でも優位な発光は捉えられなかった。これは十分な安

全率を持ってリフターが設計されており、通常の使用条件では発光するほどのひずみが生じなかったためと考えられる。一般的な工業製品を通常条件で使用した場合には同様のことが生じうると考える。なお、発光量の総和が減少しているのはバックグラウンド燐光が減少していることによるものと考えられる。



図14 発光状態 (左:持ち上げ前  
右:持ち上げ後)

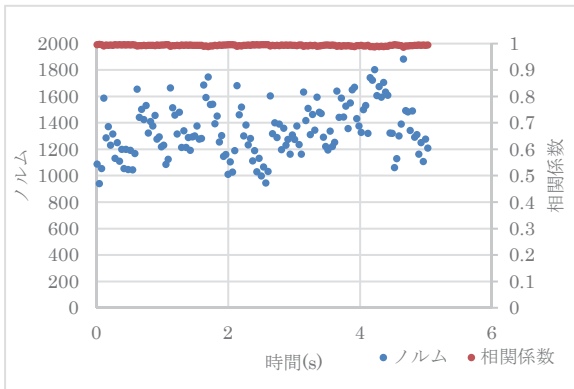


図15-1 ノルム及び相関係数 (リフター)

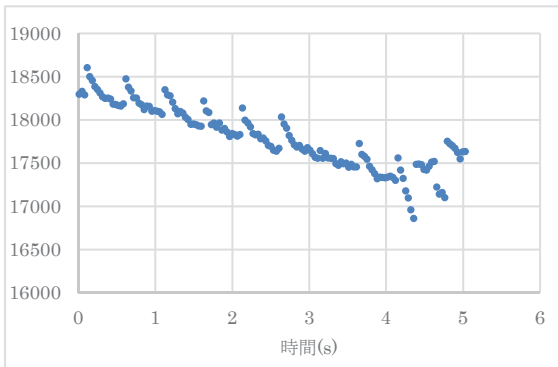


図15-2 発光量の総和 (リフター)

なお確認のため図16に示すとおり、引張と圧縮の生じる箇所の2か所にひずみゲージを用いて測定を行った結果、図17に示すとおりとなった。引張ひずみで約 $10\mu\epsilon$ 、圧縮ひずみで $-25\mu\epsilon$ であり、材料の強度と比較してかなり低い値であり、これが有効な発光を捉えられなかったことを整合した結果であった。

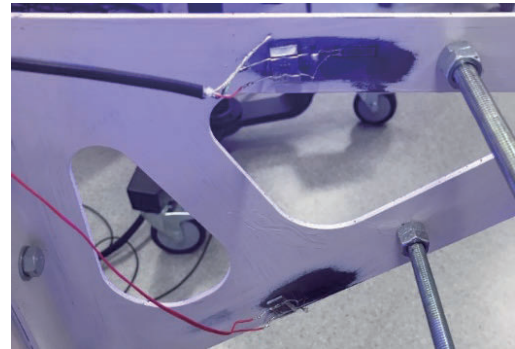


図16 ひずみゲージの貼り付け位置

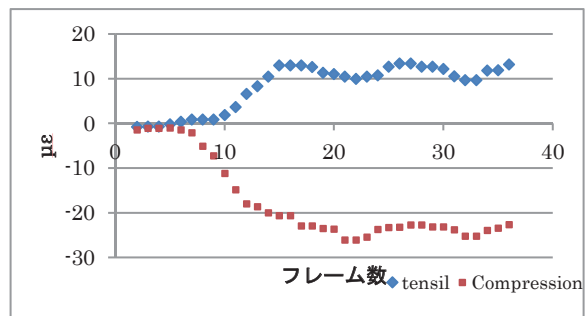


図17 ひずみゲージによる結果

### 3.5 考察

画像処理による解析では、発光量の総和による評価ではノイズの影響を受けにくく、フレーム内に占める発光範囲に大きな変動が無ければ目視では確認しにくい微弱な発光も捉えることができた。ノルムと相関係数はフレーム間の差から算出するため、バックグラウンド燐光を減じて発光状態を捉えやすいと考えていたがノイズが大きくなり微弱な変化を捉えるのは難しい。原因としては機材や実験条件等も考えられるが特定はできなかった。ま

た今回はFEMとの相関性を導くところまではできていないが相対的な数値としてはおおむね一致しており、今後さらに詰めていく。

#### 4. まとめ

工業製品に対して応力発光塗料を塗布し、試験時の映像から画像処理を行い評価した。2液性樹脂を均一に塗装することや養生への時間など準備作業や低ひずみ・低速度では発光しにくいなどの制約はあるものの、その特徴を理解して使用することができれば他のひずみ測定方法と比較しても

有効な測定方法となり得る。画像処理の技術は著しく進んでおり、複雑な手法も容易に扱えるようになっているため、今後、他の画像処理も試していきたい。

#### (参考文献)

- 1) 材料力学〈応用編〉1995 尾田十八、鶴崎明、木田外明、山崎光悦
- 2) 上野直広・小野大輔・徐超男 構造物の応力分布に起因した応力発光のパターン検出