

赤外線カメラによる疲労き裂の遠隔診断技術

Remote Diagnostic Technique for Fatigue Cracks by Infrared Camera

1. はじめに

赤外線カメラを用いた検査の特長は、遠隔から非接触・非破壊で高速に二次元の温度情報が得られる点にあり、この特長を生かした非破壊検査技術が開発されてきた。

JFE テクノリサーチでも、2006年より、赤外線検査法の1つであるアクティブサーモグラフィ法の開発に特に取り組んできた^{1,5)}。本稿では、当社がこれまで開発してきた独自のロックイン技術と、それを疲労き裂の遠隔診断へ応用した事例を中心に紹介する。

2. 赤外線ロックイン技術

2.1 応力と温度変化の関係

アクティブサーモグラフィ法は、検査対象に熱負荷を与えたときに得られる温度画像から欠陥の検出や応力の測定を行う方法であり、通常、周期的な熱負荷を与えながら連続計測を行うロックイン計測、およびロックイン解析が用いられる。熱負荷を与える方法には、温度波法、超音波加振法、電圧印加法などがあるが、疲労き裂の検出には、き裂先端近傍に生じる特異応力場発生に伴う温度変化が用いられる。

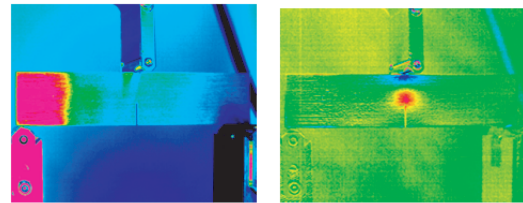
物質が断熱的に弾性変形する際、熱弾性効果により温度変化が生じる。金属など均質材料では、主応力の変動幅 $\Delta\sigma$ による対象物の温度変化 ΔT は(1)式で表される¹⁾。

$$\Delta T = -k \cdot T \cdot \Delta\sigma \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 T : 絶対温度、 k : 熱弾性係数である。これより、材料による固有の値である熱弾性係数 k に応じて、主応力の変動幅 $\Delta\sigma$ に対応した温度変化 ΔT が観測される。たとえば、炭素鋼の場合、1 MPaの応力を加えた場合の温度変化は、約1 mKと微小であるが、次節で述べるロックイン解析法を用いることにより、1 MPaの分解能で応力測定が可能となる。

2.2 ロックイン解析法

ロックイン解析法は、温度画像の時系列データを、温度変化の要因となる周期的な熱負荷を与えている参照信号で同期検波し、周期的な熱負荷による温度変化成分のみを抽出する方法である。これにより参照信号の周期とは無相関のノイズ成分が減ぜられ、S/Nの高い温度変化画像が得られ



(a) Thermal image (b) Lock-in analysis image

図1 3点曲げ試験におけるき裂先端応力の可視化

Fig. 1 Visualization of crack tip stress in three point bending test

る。

例えば、図1に繰り返し3点曲げ試験を行った際の温度画像とロックイン解析を行った画像の例を示す。ロックイン解析により、き裂先端に発生している応力分布が可視化できていることがわかる。

3. 新たに開発したロックイン技術

前述のロックイン解析による応力解析法は、繰返し生じる応力現象を解析するものであり、瞬間的に発生する応力現象(衝撃応力)を解析することはできなかった。そこで、新たなロックイン技術を考案した。

3.1 短時間ロックイン法と疲労き裂の遠隔診断

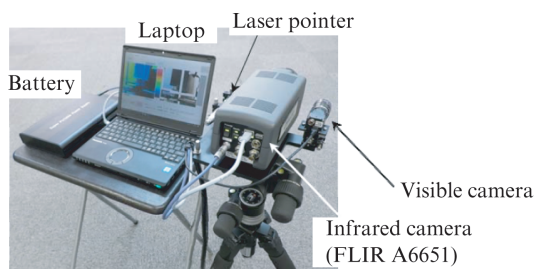
3.1.1 短時間ロックイン法

「短時間ロックイン法」は、一連の温度画像データを短時間の窓で切出し、それを少しずつ時間方向にずらしながらロックイン解析する方法である⁵⁾。時間軸の次元を持つことで、応力が生じた瞬間の解析結果が得られる。

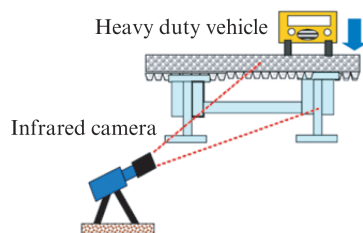
非定常応力現象は、多くの場合ロックイン解析に必須の参照信号を得ることは難しい。そこで短時間ロックイン法では、参照信号の不要な自己相関ロックイン解析¹⁾、もしくは後述する事例でも使用している参照信号の周波数を指定して解析する方法を採用することとした。参照信号の周波数を固定する場合は実際の応力現象との差が懸念されるが、短時間の窓で切出すことで周波数分解能が鈍くなるため、周波数の誤差はある程度許容される。このことから、応力値の正確な算出は困難でも、応力集中部を評価することは十分可能になる。

3.1.2 短時間ロックイン法による疲労き裂検出

この短時間ロックイン法は、構造物の溶接部などに生じるき裂の検出に非常に有効である。

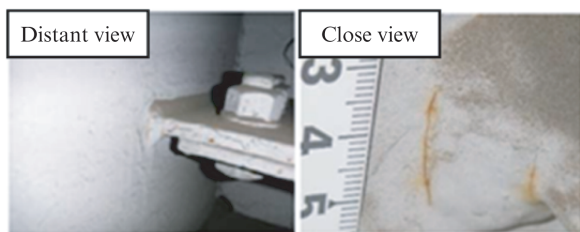


(a) Appearance of fatigue crack detection system⁶⁾

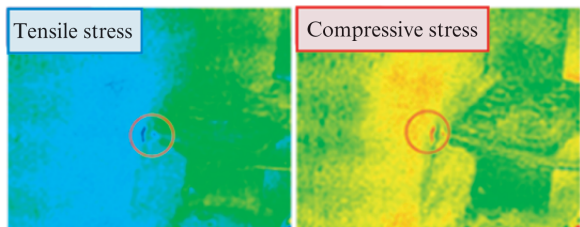


(b) Principle of fatigue crack detection system⁷⁾

図2 疲労き裂検出システム
Fig. 2 Fatigue crack detection system



(a) Coating crack



(b) Short time lock-in images

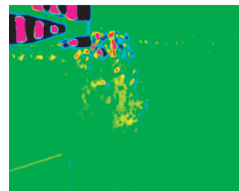
図3 疲労き裂検出例⁶⁾
Fig. 3 Fatigue crack detection⁶⁾

図2は、高速道路の鋼道路橋の疲労き裂の検出を目的に開発されたシステムである⁶⁾。従来、鋼道路橋の塗膜に生じる塗膜割れを目視点検し、磁粉探傷試験で疲労き裂であるかどうかを調査していたのに対し、疲労き裂検出システムでは、鋼道路橋を通過する大型車両の荷重を利用した応力による温度変化から疲労き裂を検出できる(図3)。

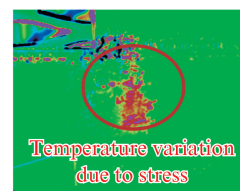
図4に、本手法を工場内天井クレーン構造物の疲労き裂に適用した例を示す。従来のロックイン法では温度変化は検知できない(図4(b))が、短時間ロックイン法では外部からの荷重に伴う温度変化がとらえられ、疲労き裂が可視化できることがわかる(図4(c))。



(a) Fatigue crack in crane structure



(b) Conventional lock-in analysis image



(c) Short time lock-in analysis image

図4 疲労き裂の検出⁸⁾
Fig. 4 Detection of fatigue crack⁸⁾

3.2 リアルタイムロックイン法

生産ラインや危険な場所での検査、あるいは探傷条件の検討時など、即座にロックイン解析結果を得たいケースがある。

前述の参照信号の周波数を指定した短時間ロックイン解析は、特定の周波数を通過させるバンドパスフィルターと等価の処理とみることができる。そこで、バンドパスフィルターを適用することで、リアルタイムでロックイン解析が可能なシステムを構築した。これにより、リアルタイムで温度変動(応力変動)画像を表示することができた。

この解析法では、演算される温度変化を介して気体の流れを可視化することもできることから、新たな応用も期待されている。

4. おわりに

新たなロックイン解析法として、短時間ロックイン法、リアルタイムロックイン法を開発した。これにより、これまで適用が困難とされていた衝撃応力を利用した疲労き裂の遠隔診断等が可能になり、赤外線サーモグラフィの可能性を大きく広げることができた。

参考文献

- 1) 西名慶晃, 今西大輔, 渋谷清. 高精度赤外線サーモグラフィを活用した各種測定技術(温度・応力・疲労・亀裂)とその応用. JFE 技報. 2011, no. 27, p. 9-14.
- 2) 渋谷清, 二村智昭. 高性能赤外線カメラによる応用技術. 溶接学会誌. 2012, vol. 81, no. 7, p. 25-28.
- 3) 赤外線サーモグラフィによる非破壊検査技術. JFE 技報. 2015, no. 35, p. 80-81.
- 4) 福田義徳. 赤外線非破壊検査における新ロックイン解析技術. 画像ラボ. 2017, vol. 28, no. 8, p. 54-56.
- 5) 福田義徳. 赤外線サーモグラフィにおけるロックイン解析技術. 検査技術. 2018, vol. 23, no. 8, p. 65-69.

- 6) 衣笠泰広, 大窪克己, 高橋徹. 赤外線カメラを用いた鋼橋疲労き裂検出の試み. 平成 30 年度土木学会全国大会. 2018, VI-444.
- 7) 赤外線カメラによる疲労き裂の遠隔検査技術. JFE テクノリサーチ技術事例集. 2017, Cat. No 3E5J-030-00-171206.
- 8) 福田義徳. 赤外線カメラによる疲労き裂の遠隔検査技術～短時間ロックイン解析による欠陥検査技術～. JFE-TEC News. 2018, vol. 55, p. 2.

〈問い合わせ先〉

JFE テクノリサーチ 営業本部

TEL: 0120-643-777

ホームページ: <https://www.jfe-tec.co.jp/inspection/>