

130 き裂先端特異温度場のロックインサーモグラフィ計測 によるき裂検出手法の提案

大阪大学
大阪大学

正 ○阪上隆英
手嶋康博

大阪大学 正 久保司郎

1. はじめに 赤外線サーモグラフィを用いた物体表面の温度分布計測に基づく非破壊検査手法において、ロックイン・赤外線サーモグラフィ法が注目を集めている⁽¹⁾。ロックイン・赤外線サーモグラフィ法は、物体に一定周期で変動する熱負荷を与えた時、物体表面で計測される温度変動の振幅分布および位相分布を、変動熱負荷に関する参照信号に同期させて高精度に計測し、これをもとに高分解能かつ高精度に欠陥計測を行う手法である。本報では、著者ら⁽²⁾が提案したき裂周りの特異温度場計測に基づくサーモグラフィ法に、ロックイン・赤外線サーモグラフィ計測を応用した新しい非破壊検査手法の提案を行うとともに、手法の有用性を実験的に検証した結果について述べる。

2. 特異温度場法によるサーモグラフィック NDT

き裂を含む導電体に電流を負荷した時には、き裂先端での電流密度が原理的に無限大となる特異電流場がき裂先端近傍に形成される。ジュール発熱率は電流の2乗に比例するため、き裂先端近傍には特異電流場に起因する発熱集中による特異温度場が形成される。したがって、き裂が被検査物の表面に開口している場合には、発熱集中部が温度分布画像中に検出されるので、これをもとにき裂を検出することが可能である。

特異温度場法において、検査対象に負荷する電流を周期的に変動させた場合には、き裂先端近傍に負荷電流と同じ周期で変動する特異電流場および特異

温度場を形成させることができる。したがって、負荷電流信号を参照信号として、ロックイン・赤外線サーモグラフィ計測を行うことにより、き裂先端近傍の特異温度場に関して、温度変動の振幅および位相の分布を高精度に計測することが可能となる。

3. 実験装置 本実験で用いた計測装置を図1に示す。実験に使用したロックイン・赤外線サーモグラフィは、256×256画素のInSb赤外線アレイセンサを搭載した赤外線カメラに、熱弾性応力測定のためのデジタルロックイン信号処理装置を付加したものである。

検査対象への電流負荷方式としては、直接通電および電磁誘導の二つが考えられる。本実験では、提案する手法の実用性を考慮し、検査対象への非接触電流負荷が可能な後者を検討した。2系統の出力が可能な信号発生器の一方において、250kHzの高周波信号を発生させ、その振幅を他方で発生させた低周波の電流変動信号に同期させて変動させた。電流変動信号は、0.5Hz~5Hzの正弦波信号とした。さらに、この電流変動信号を、ロックイン計測における参照信号として、前述のデジタルロックイン信号処理装置に入力した。

このようにして作られた、振幅が周期変動する高周波電流を、高速電力増幅器で増幅した後、試験片下部に設置したパンケーキ型コイル(巻数88,直径100mm)に負荷した。この時、試験片にはドーナツ状の渦電流が誘導される。本実験では、渦電流の強度

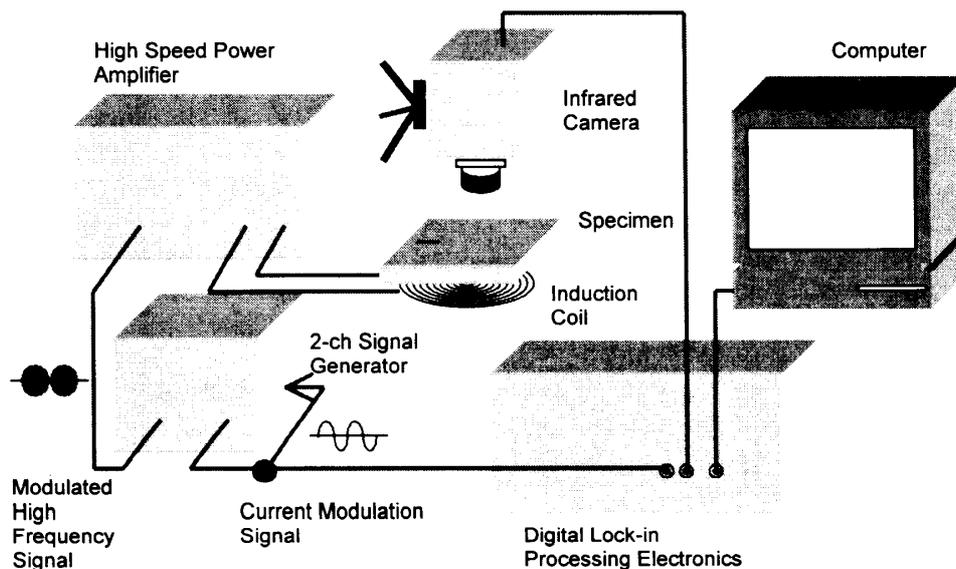


Fig. 1 Illustration of the proposed singular method thermographic NDT system combined with lock-in thermography.

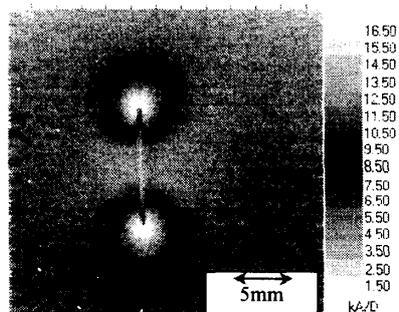
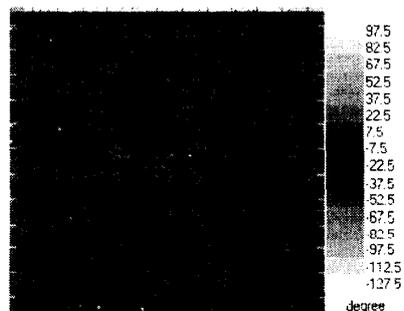
(a) Distribution of amplitude of oscillated temperature ΔT (b) Distribution of phase θ

Fig. 2 Lock-in thermal images taken for stainless steel plate. (Crack length : 10mm)

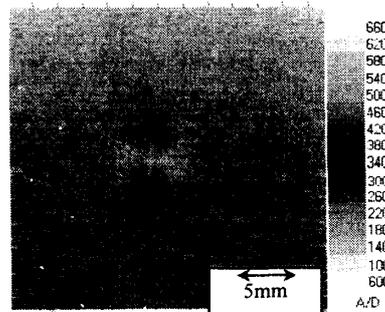
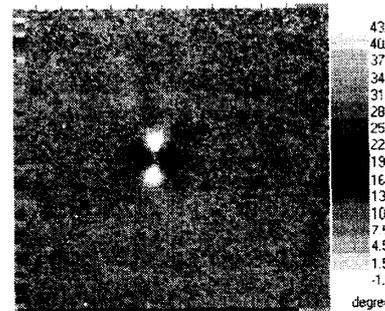
(a) Distribution of amplitude of oscillated temperature ΔT (b) Distribution of phase θ

Fig. 3 Lock-in thermal images taken for stainless steel plate. (Crack length : 3mm)

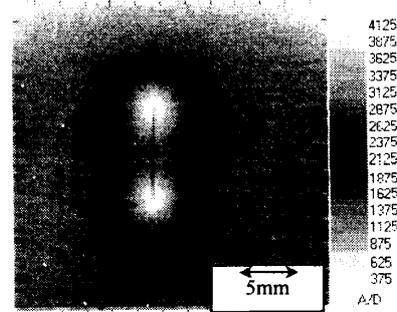
(a) Distribution of amplitude of oscillated temperature ΔT (b) Distribution of phase θ

Fig. 4 Lock-in thermal images taken for aluminum alloy plate. (Crack length : 10mm)

が比較的一様な部分を利用して、き裂検出を行った。
4. 実験結果 本実験では、ステンレス鋼およびアルミ合金の平板を試験片として用いた。試験片寸法は、幅 110mm、長さ 140mm であり、試験片厚さは 0.5mm および 1mm の 2 種類とした。試験片には放電加工により貫通き裂を導入した。き裂長さは、3mm、5mm および 10mm の 3 種類とした。また、試験片表面の放射率を高めるため、試験片にはつや消し黒色塗料を塗布した。コイルに負荷した周期変動電流については、変動周期を 1Hz および 3Hz、電圧の最大振幅を 92V とした。

まず、長さ 10mm のき裂を有する厚さ 1mm のステンレス鋼試験片に 1Hz の周期変動電流を負荷した場合に得られた、温度振幅 ΔT および位相 θ の分布を、図 2(a) および (b) にそれぞれ示す。 ΔT 分布画像においては、き裂先端近傍の特異電流場に起因する、き裂先端における顕著な ΔT の上昇が見られ、これをもとにき裂の位置・寸法が容易に同定できる。さらに、 θ 分布を見ると、き裂先端から周囲の領域に向かうにつれて、温度変動の位相にずれが生じていることがわかる。したがって、 θ 分布を用いた場合にも、き裂先端位置の同定が可能であることがわかる。この位相のずれは、き裂先端の発熱集中部から周囲への熱拡散の影響によるものと考えられる。

次に、長さ 3mm のき裂を有する厚さ 0.5mm のステンレス鋼を用いて、電流変動周波数 3Hz でき裂検出を行った結果を図 3 に示す。き裂先端位置を示す特異性は、 ΔT 分布画像および θ 分布画像両方に現れており、これらをもとにき裂の検出が可能であることがわかる。短いき裂の場合には、特異電流場の強度

が低下するとともに、熱拡散による特異温度場消失の影響により、 ΔT 分布画像のコントラストが低下するため、き裂の検出性は悪化する。このような場合には、電流変動周波数を高くして、電流変動の 1 周期の時間内における熱拡散の影響を低くすることにより、 ΔT 分布画像のコントラストを改善できることがわかった。さらに、 θ 分布画像によるき裂先端位置の同定も、き裂同定に効果的であることがわかった。

さらに、長さ 10mm のき裂を有する厚さ 1mm のアルミ合金試験片を用いて、電流変動周波数 3Hz でき裂検出を行った結果を図 4 に示す。図より、 ΔT 分布画像および θ 分布画像において、き裂先端位置を同定することが可能であることがわかる。アルミ合金は、ステンレス鋼に比べて熱拡散性が高く、特異温度場が消失しやすい材料である。このような場合においても、電流周波数を高くすることによる ΔT 分布画像のコントラスト改善、および θ 分布画像の利用が、き裂同定に効果的であることがわかった。

上記の実験においては、ロックイン・データ処理を用いない赤外線カメラによる熱画像も同時に取得した。しかしながら、これらの画像においてはき裂同定に十分な特異温度場を検出することができなかった。したがって、ロックイン・サーモグラフィによる特異温度場の計測が、低い負荷電流密度および高い熱拡散といった、特異温度場法によるき裂検出における悪条件の下でのき裂検出精度の向上に効果的であることが確認できた。

文献 (1)例えば, Proceedings of SPIE Volume 3056, 1997. (2)阪上, 小倉, 日本機械学会論文集(A編), 58 巻, 555 号, 1992, pp.2224-2231.