破壊の発生・進展とその評価および抑制

4. 赤外線温度計測に基づく非破壊評価[†]

阪上 隆英*

Fracture, Its Evaluation and Suppression

IV : Nondestructive Evaluation Technique Using Infrared Thermography

by

Takahide SAKAGAMI*

Key words : Nondestructive evaluation, Infrared thermography, Temperature measurement, Structural integrity

1 緒 言

赤外線サーモグラフィは、物体表面から放射される赤外線の強度を赤外線センサにより計測し、その分布を温度分布に換算・画像表示する装置である。近年、赤外線サーモグラフィの性能が急速に向上し、高分解能・高精度かつ高速での温度計測が可能となった。同時に赤外線サーモグラフィの低価格化・小型化も進み、赤外線サーモグラフィは科学技術の様々な分野での温度計測に応用されている。物体表面温度分布計測に基づく非破壊材料評価技術は、赤外線サーモグラフィの応用が成功を取めた分野の一つである。赤外線サーモグラフィによる材料評価技術は、欠陥検出・計測のための非破壊検査技術と、赤外線応力測定技術に大別される。前者は、欠陥の存在に起因する材料表面の温度変化領域を検出・計測することにより、その変化の原因である欠陥を同定する熱的非破壊検査手法である。また、後者は、材料に荷重が負荷されたときの熱弾性効果による準可逆状態の温度変動を赤外線サーモグラフィにより計測することにより、材料に作用している応力分布を計測するものである。

本講座では、このような赤外線サーモグラフィによる温度分布計測に基づく、材料・構造物の非破壊評価技術について解説する。まず、赤外線サーモグラフィの開発動向・性能について簡単に解説する。次に、赤外線サーモグラフィによる熱的非破壊検査手法すなわち赤外線サーモグラフィ法について解説するとともに、赤外線サーモグラフィ法による構造物中の欠陥・損傷の非破壊検査事例を示す。最後に、赤外線サーモグラフィを用いた熱弾性応力計測法について解説する。

2 赤外線サーモグラフィの開発動向

1960年代に赤外線サーモグラフィが開発されてから現在に至るまで、優れた赤外線センサの開発とデジタル信号処理技術の進展を背景に、赤外線サーモグラフィは進歩を遂げてきた。¹⁾初期の赤外線サーモグラフィは機械走

査型と呼ばれ、単一または少数の赤外線検出素子を用い、2枚の平面鏡の揺動あるいは多角形鏡の回転による領域走査を行い、温度分布画像(熱画像)を構成していた。高性能な赤外線検出素子の選択により、温度分解能は0.1℃程度を達成することができた。しかしながら、2次元走査により画像を構成するため、1枚の熱画像内での計測値に関する同時性が低く、時間変動する温度場の計測、移動する物体の温度場計測を行う場合の測定精度に問題があった。

1980年代の後半、赤外線検出素子をマトリックス状に配置したフォーカルプレーン・アレイセンサを搭載した赤外線サーモグラフィが開発された。アレイセンサでは赤外線検出素子からの信号を電子走査により読み取るため、熱画像データの同時性は機械走査型と比べて著しく向上した。1990年代には、アレイセンサの画素数も増加し、さらに素子からの信号を電子走査する技術が進歩したため、同時性に優れた精細な温度分布画像を、高速かつ高分解能に計測することが可能になった。現在、InSb検出素子を用いたものでは、NETD値(ノイズ等価温度差)は0.025℃以下となっている。計測速度は、計測に使用する画素数によって異なる。256×256画素による計測時で140フレーム/秒、128×128画素計測時450フレーム/秒、64×64画素計測時には1400フレーム/秒の速度により、赤外線強度データをデータ長12～14ビットでデジタル計測することができる。

ここ数年の顕著な動向としては、非冷却型赤外線サーモグラフィの急速な進歩が挙げられる。これまでの赤外線アレイセンサには、冷却が必要な量子型の赤外線検出素子が使用されていたのに対し、非冷却型赤外線アレイセンサにはボロメータなどの熱型赤外線検出素子が使用されている。非冷却型赤外線センサの進歩は、赤外線サーモグラフィの小型・軽量化および低価格化を可能にした。最近では、0.06℃～0.08℃という優れたNETD値を有す

[†] 原稿受理 平成16年3月19日 Received Mar. 19, 2004

* 正会員 大阪大学大学院工学研究科機械システム工学専攻 〒565-0871 吹田市山田丘, Dept. of Mech. Eng. and Systems, Graduate School of Eng., Osaka Univ., Yamadaoka, Suita, 565-0871

る、マイクロボロメータ型赤外線アレイセンサを搭載した赤外線サーモグラフィが開発されている。

3 赤外線サーモグラフィによる非破壊検査

3・1 赤外線サーモグラフィ法の基本原理

赤外線サーモグラフィによる非破壊検査手法は、熱負荷を与えた時の欠陥による断熱温度場を検出する方法、および欠陥部位における自己発熱（吸熱）による温度場を検出する方法に大別できる。以下ではそれぞれの方法の特徴について簡単に説明する。

3・1・1 断熱温度場に基づく赤外線サーモグラフィ法 断熱温度場に基づく赤外線サーモグラフィ法は、最も広く用いられている一般的な手法である。図1(a)に示すように、被測定物に外部から熱負荷を与えた時、欠陥による断熱効果（熱流が欠陥により遮られる効果）により熱移動が妨げられた結果、サンプル表面に現れる温度変化領域を検出する。図1(a)のような、被測定物内部のはく離欠陥に対しては、面外方向の熱移動が用いられる。熱移動が表面から内部に向かう場合には、欠陥付近の被測定物表面には高温領域が現れ、反対に熱移動が内部から表面に向かう場合には、被測定物表面には低温領域が現れる。この温度変化領域の位置・形状は内部の欠陥を反映したものであるため、赤外線サーモグラフィによる温度変化領域の計測結果をもとに欠陥の位置および形状を同定することができる。さらに、加熱後の温度場変化に関する時系列情報を用いることにより、欠陥の深さ方向の位置の同定も可能になる。次に、図1(b)のような、被測定物表面に開口するき裂を考える。き裂に対しては、被測定物にき裂と交差する面内方向の熱移動を生じさせる。この時、き裂の断熱効果によりき裂面間には温度差が生じるため、これを赤外線サーモグラフィで検出することによりき裂の検出が可能となる。しかしながら、表面に開口するき裂に対しては、他にも有用な検査法があるため、塗装膜下のき裂検出など表面から目視等で確認できない場合に赤外線サーモグラフィ法が有効であろう。

断熱温度場に基づく赤外線サーモグラフィ法は、原理的にはどのような材料のものにも適用可能であるが、実際には材料内の熱拡散による局所的な温度変化部位の消失

により、欠陥検出精度は大きく影響を受ける。一般に、熱伝導性の低い材料に適用した場合の方が、良好な欠陥検出感度が得られる。このため、高分子材料あるいはセラミックス系の複合材料、接合材料および被膜材料等の層間にはく離欠陥・損傷の計測に有効に適用できる場合が多い。金属材料や炭素系材料など、熱伝導性の高い材料に適用する場合には、急速な熱負荷直後、欠陥による断熱温度場が熱拡散により消失しない時間内に、温度分布計測を高速に行うことが要求される。

3・1・2 自己発熱温度場に基づく赤外線サーモグラフィ法 図1(c)に示すように、欠陥自身が発熱（吸熱）源となっている場合、あるいは外的負荷を与えることにより欠陥部位で発熱を起こさせた場合に、被測定物の温度変化に基づき欠陥を検出する方法である。

欠陥自身が熱源となっている場合の欠陥検出法が効果的に用いられた例としては、航空機構造における水浸入部の検出がある。航空機の機体は飛行中低温にさらされるため、浸入した水が氷結する。着陸後機体は徐々に暖められるが、氷結した部位はしばらくの間低温を保ち、温度分布画像において水が浸入した欠陥部位は局所的低温部として検出される。

3・2 赤外線サーモグラフィ法の発展

物体の表面温度分布が欠陥の存在により変化することを利用した熱的非破壊評価技術自体は、新しい手法ではなく、過去にも着霜、感熱材料あるいは液晶等による検査法が試みられてきた。しかしながら、これらの手法は、温度計測の分解能、精度の問題から、欠陥検出を高感度に行うことは不可能であり、低い熱拡散性を有する材料で作られたハニカムサンドイッチパネルの比較的大きなのはく離欠陥など、限定された測定対象にしか適用できなかった。ところが、赤外線サーモグラフィの登場により、物体表面温度を非接触かつ高精度に可視化計測できるようになったため、熱的非破壊試験法が赤外線サーモグラフィ法として再び注目されるようになった。

前述のように、初期の赤外線サーモグラフィは機械走査型であり、時間的変動が小さい定常的あるいは準定常的な温度分布であれば、良好な精度で熱画像を得ることができた。このため、機械操作型赤外線サーモグラフィによる非破壊検査は、準定常状態でも欠陥による温度場変化が明瞭に現れ、短時間のうちに温度場変化が消失しにくい場合を対象に効果的に用いられた。送電・配電設備の不良箇所の異常発熱検知、建築物のモルタル・タイル外壁やコンクリート法面のはく離検知などがその例として挙げられる。

高性能な赤外線サーモグラフィの登場は、物体表面温度を高分解能・高精度に計測すること、画像内での同時に優れた温度分布データを高速に計測することを可能にした。このため、従来は検出不可能であった、欠陥に起因する微小な温度場変化を捉えることが可能になったため、欠陥検出分解能は飛躍的に向上した。また、欠陥による温度変化が熱拡散により散逸・消失する前に計測を行うことが可能になったため、熱拡散性の高い金属材

図1 赤外線サーモグラフィ法による欠陥検出原理

料や炭素繊維系複合材料に存在する欠陥の検出も可能となった。

赤外線サーモグラフィ法は、(1) 遠隔からの検査が可能のため、検査のための足場や特殊装置が不要、(2) 対象物の2次元画像による検査なので短時間に広範囲の検査が可能、(3) 欠陥の位置や形状が視覚的に推定できる、(4) 赤外光学系の選択により測定視野を自由に変えられる、などの特長を有していることから、特に大型構造物の非破壊検査法として注目を集めている。

4 赤外線サーモグラフィ法による欠陥検出事例

4・1 き裂の検出

4・1・1 特異発熱場計測に基づくき裂検出²⁾ き裂状欠陥を含む導電体に電流を負荷した時には、き裂先端近傍にはき裂先端で電流場が原理的に無限大になる特異電流場が形成され、これによりき裂先端には発熱集中部が現れる。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、これをもとにき裂検出が可能である。き裂先端(前縁)が内部にある場合には、リガメント部の抵抗増大およびき裂前縁からの熱拡散による発熱集中部が背面に現れるため、これをもとにき裂の検出が可能になる。

本手法において、負荷する電流を周期的に変動させることにより、き裂先端近傍に周期変動する特異発熱場を形成させ、これを電流変動の信号をもとにロックイン計測した場合の赤外線強度振幅および位相の分布をもとに高感度にき裂検出を行うことが可能となる。³⁾また、周期的に出力が変動する高周波電流をコイルに供給し、被測定物に誘導電流を負荷した場合に被測定物に形成される周期変動特異発熱場を計測することもできる。

一例として、長さ10mmの貫通き裂を有する厚さ1mmのステンレス鋼試験片に、1Hzで出力が周期変動する高周波誘導電流(250kHz)を負荷した場合に得られた、赤外線強度振幅 ΔR および位相 θ の分布を図2に示す。 ΔR 分布画像においては、き裂先端近傍の特異発熱場に起因する、き裂先端における顕著な ΔR の上昇が見られ、これをもとにき裂の同定が可能である。また、 θ 分布においても、き裂先端から周囲の領域に向かうにつれて位相が変化しているため、き裂の同定が可能である。

4・1・2 断熱温度場計測に基づくき裂検出 断熱温度場計測に基づくき裂検出を高精度に行う方法として Coating Tolerant Thermography 法 (CTT 法) が提案さ

れている。⁴⁾CTT 法では、検査領域の左側および右側から加熱を行った場合に得られた、二つの温度勾配分布に関するデータを減算処理することにより、断熱温度場におけるき裂部分の温度変化を強調するとともに、放射率が異なる部分などき裂以外の温度変化の影響を取り除くことにより、高感度なき裂検出を可能にしている。CTT 法によるき裂検出の一例を図3に示す。CTT 法は、これまでに高速道路鉄橋など経年構造物に存在するき裂の検出などに実績をあげている。

4・2 はく離欠陥の検出

4・2・1 建築・土木構造物のはく離欠陥検出 はく離欠陥の検出には、通常、断熱温度場計測に基づく赤外線サーモグラフィ法が用いられる。建築構造物の内部に存在するはく離欠陥の検出には、断熱温度場計測に基づく赤外線サーモグラフィ法が早くから適用され、成果を収めている。⁵⁾建築・土木構造物のはく離欠陥検出は、通常、構造物表面の1日の温度変化をもとに行われる。日中には太陽光照射や外気温上昇により、構造物は表面から加熱され、構造物には表面から内部に向かう熱移動が生じる。このため、はく離が存在すれば、はく離部分の表面温度は健全部と比べ高くなる。夜間には、逆方向の熱移動が生じ、はく離部の温度は健全部に比べて低くなる。このような温度変化を、赤外線サーモグラフィを用いて検出することにより、構造物のはく離欠陥検出が可能となる。

特に最近、劣化したコンクリート構造物の剥落事故による第三者被害防止のため、コンクリート構造物のはく離欠陥を効率的かつ高精度に検出できる非破壊検査手法として、赤外線サーモグラフィ法に対する期待が高まっている。ここでは、コンクリート高架橋床版2径間に対し、赤外線サーモグラフィ法を適用してはく離欠陥検査を行った結果を示す。

赤外線サーモグラフィにより計測された、床版下面の赤外線画像を合成した、床版下面全域の赤外線画像を図4(a)に示す。赤外線画像において白く見える部分は高温部であり、はく離および補修のための充填材料の存在により温度が局所的に異なる領域を表している。赤外線画像をもとに検査員がはく離と判断した箇所を図4(b)に示す。さらに、打音検査により発見されたはく離箇所を図4(c)に示す。図4(b)および図4(c)を比較すると、両手法によるはく離欠陥検出結果は、良く一致しているこ

図2 特異発熱場のロックイン計測によるき裂同定

図3 CTT法によるき裂検出結果

図4 赤外線サーモグラフィ法によるコンクリート構造物のはく離欠陥検出

とがわかる。打音検査により検出されたはく離欠陥 31 箇所の中で、赤外線サーモグラフィ法で検出されなかったものが 1 箇所だけあったが、この欠陥は検出限界に近い深い欠陥であり直ちに補修の対象となるものではなかった。検査所要時間については、赤外線サーモグラフィ法が 35 分、打音検査が 120 分であった。赤外線サーモグラフィ法はさらなる時間短縮が可能であり、赤外線サーモグラフィ法によれば、検査所要時間を打音検査の 1/5 以下に短縮できることが明らかになった。

日照や外気温変動による熱移動が構造物に生じない場合には、構造物を強制加熱・冷却するアクティブ赤外線サーモグラフィ法が有効である。⁹⁾アクティブ加熱法は、単に構造物に熱移動を強制的に発生させるだけでなく、加熱時の熱応答の時系列情報を利用することによりはく離欠陥の深さを計測できるという特長を有している。著者⁷⁾は、コンクリート構造物をアクティブ加熱した後の温度変動をロックイン処理した際の位相情報をもとに、はく離欠陥深さを定量計測する手法を提案した。

人工はく離欠陥を有するコンクリート試験体を対象に、加熱周期 T を 10 分から 60 分まで 5 分きざみに設定し、試験体表面の温度変動をロックイン計測することにより、はく離深さと位相遅れの関係を調べた。はく離部における位相値を P_d 、試験体全表面の位相の平均値を P_m として、位相差 ΔP ($\Delta P = P_d - P_m$) を求めた結果を図 5 に示す。 ΔP は、加熱周期に依存しており、加熱周期を変化させな

がら ΔP の計測を行うことにより、はく離欠陥の深さを定量的に推定できる。本手法により、ボックスカルバート床版下面に実際に存在するはく離欠陥の深さ推定を行った結果を示す。加熱周期 T を 10 分、20 分および 30 分として赤外線サーモグラフィによる温度分布計測を行った結果をロックイン処理し位相分布を得た。加熱周期 T を 10 分および 30 分とした場合に得られた位相分布画像を図 6 に示す。 T を 10 分とした場合には、はく離部分における ΔP は、はく離輪郭部で負値を、中心部で正値をとった。 T を 20 分、30 分と長くするに従って、 ΔP が負値をとる領域は輪郭部から内部へと拡大した。図 5 に示した、加熱周期、位相差 ΔP 、および欠陥深さの関係をもとに、はく離深さを推定した結果を図 7 に示す。はく離深さの推定結果は、輪郭部で 0 ~ 5mm、はく離の中心付近では 20 ~ 30mm となった。この推定結果は、計測終了後にはく離片を取り除くことにより、はく離深さを実測した結果とよく一致した。

4・2・2 複合材料のはく離損傷検出 前述のように、炭素繊維強化複合材料のように高い面内熱拡散性を有す

図5 欠陥深さ、加熱周期および位相の関係

図6 時系列温度変化のロックイン処理により得られた位相分布画像

図7 位相に基づくはく離欠陥深さの推定結果

る被測定物に対しては、急速な熱負荷直後の断熱温度場の高速計測が有効である。これを実現するための加熱方法として、フラッシュランプによるパルス加熱が用いられる。⁸⁾パルス加熱によれば、高い熱流束を瞬時に被測定物に与えることが可能となるため、はく離欠陥・損傷による断熱温度場が被測定物表面に顕著に現れる。また、パルス加熱による赤外線サーモグラフィ法では、熱が被測定物を伝わりはく離欠陥に到達する過程の被測定物表面の温度変動に関する時系列データをもとに、欠陥の深さの推定が可能である。

一方向板を積層した炭素繊維強化複合材料平板の衝撃はく離損傷を計測した結果を図8に示す。はく離による断熱効果により生じた高温部位が白色の領域で示されている。パルス加熱後の時間経過に伴い、炭素繊維方向に広がったはく離損傷が、浅いものから順に反時計回りに検出されていることがわかる。さらに、このパルス加熱後の非定常断熱温度場の特徴を定量化することにより、はく離欠陥の深さを定量的に推定する手法が検討されている。^{9), 10)}

5 赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力計測¹¹⁾

5・1 熱弾性効果

固体に応力が急激に作用し変形が断熱的に行われる準可逆状態では、固体に引張応力を作用させれば応力変動に比例した温度降下が、逆に圧縮応力を作用させれば応力変動に比例した温度上昇が生じる。この現象は、熱弾性効果と呼ばれ、Kelvinによって可逆的熱弾性効果の理論として定式化されている。Kelvinの理論によれば、熱弾性効果による温度変動 ΔT は、等方均質な線形弾性体に対して次式で与えられる。

$$\Delta T = -kT\Delta\sigma = -\frac{\alpha}{\rho C_p} T\Delta\sigma \quad (1)$$

k は熱弾性係数であり、定圧比熱 C_p 、線膨張係数 α および密度 ρ により与えられる。また、 T は材料の絶対温度、 $\Delta\sigma$ は主応力の変化量である。作用応力の変動に伴う熱

弾性効果により物体に生じる温度変化 ΔT を計測することにより、主応力の変動 $\Delta\sigma$ を計測することができる。

5・2 赤外線応力測定装置

熱弾性係数 k の値は、軟鋼の場合 $3.5 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$ 、アルミニウムの場合 $8.8 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$ 程度であり、主応力の変動値を仮に10MPaとした場合の ΔT の値は、室温で軟鋼の場合約0.01K、アルミニウムの場合0.026Kとなる。熱弾性応力測定では、mKオーダでの高い分解能および精度での温度計測が要求される。これに対し、赤外線サーモグラフィのNETD値は、20mK程度であるため、そのままでは熱弾性温度変動計測に十分な温度分解能・精度を得ることができない。そこで、赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力測定においては、被測定物に繰返し変動荷重を与え、荷重信号に同期して変動する温度変動のみをロックイン処理により赤外線サーモグラフィの出力から抽出し、さらにこれを荷重サイクルごとに積算し平均化することにより、高分解能・高精度な温度計測を可能にしている。これにより、温度分解能約1mKでの熱弾性応力計測を可能にしている。これは軟鋼の応力測定分解能に換算して約1MPaとなる。

5・3 応力分布計測例

円孔を有する平板試験片に繰返し引張応力を加えた場合に、円孔まわりの主応力の変動値分布を計測した結果を図9に示す。円孔の周りの応力は遠方で作用する応力に比べ大きな値となっており、円孔周辺に応力集中が生じている状態が観察されている。さらに、温度変動の位相を荷重信号と比較することにより、円孔の上下で圧縮、左右で引張りの応力集中が生じていることがわかる。

5・4 赤外線応力測定技術の進展

赤外線応力測定技術は、①非接触による応力測定が可能、②応力分布が画像化されるので、応力集中部位の評価等に有用、③損傷による応力状態変化から非破壊評価ができる、④有限要素法等の数値計算が困難な問題への適用が可能、⑤被測定物の材質に制限が少ないなどの優れた特長を有する。しかしながら、①繰返し荷重負荷が必要、②撮像領域の変位によるずれによるエッジ効果、③計測される応力は主応力の変動分であり、個々の応力成分の分離ができないなどの問題点も有していた。近年、これらの問題点を解決するための新しい手法が多く、研究者によって検討されている。

図8 パルス加熱赤外線サーモグラフィ法による炭素繊維強化複合材料の衝撃はく離損傷検出

図9 熱弾性応力計測法による応力集中部位の計測

図10 熱弾性・光弾性ハイブリッド計測法によるき裂周りの応力分布の計測

(a) 負荷荷重の多様化

赤外線応力測定においては、周波数、振幅一定の正弦波荷重が負荷されることが多いが、実構造物にはランダム荷重や衝撃荷重が負荷されている場合が多い。Lesniakら¹²⁾は、ランダム負荷および衝撃負荷が作用する場合に、これらの荷重信号に同期する赤外線計測信号成分を求め、応力の相対値分布を可視化表示する手法を開発している。

(b) 応力成分の分離

応力成分を分離して直接計測できないことは、赤外線応力測定法の最大の短所であるとされてきた。この問題を克服するために、様々なアプローチから応力成分の分離法が検討されている。¹³⁾最近では、逆問題に基づく応力分離手法が注目されている。^{14), 15)}これらの手法では、まず主応力和に関する計測データに基づいて解析領域に作用する負荷等の未知境界値を逆問題的に同定し、次に求められた境界値に基づき順解析を行うことにより各応力成分を分離計測している。実験的な応力分離手法としては、光弾性応力測定法との併用による手法が検討されている。^{16), 17)}熱弾性計測による主応力差および主応力方向から、応力成分の分離を行うことができる。光弾性計測とのハイブリッド化により、き裂周りの特異応力場に関して、全応力成分分離計測を行った結果¹⁸⁾を、境界要素解析結果とともに図10に示す。

6 結 言

本講座では、赤外線サーモグラフィによる材料・構造物の非破壊評価技術として、赤外線サーモグラフィによる温度場計測に基づく非破壊検査手法、ならびに熱弾性温度変動計測による赤外線応力計測法について解説した。赤外線サーモグラフィによる非破壊評価の適用事例については、紙面の制限の関係で一部しか示すことができなかった。参考文献¹⁹⁾は、日本における赤外線サーモグラフィによる非破壊評価技術に関するState of the artsをまとめたものであり、適用事例が豊富に掲載されている。参考にしていただきたい。

参 考 文 献

- 1) 木股雅章、非破壊検査、**45**、772 (1996)。
- 2) 阪上隆英、小倉敬二、日本機械学会論文集、A-58、2224 (1992)。
- 3) T. Sakagami and S. Kubo, JSME Int. J., Ser. A, **44**, 528 (2001)。
- 4) J. Lesniak, D. Bazile and M. Zickel, Proceedings of SPIE, **3361**, 325, (1998)。
- 5) 阪上隆英、込山貴仁、非破壊検査、**47**、723 (1998)。
- 6) 阪上隆英、久保司郎、原文人、番匠谷隆、実験力学、**1**、34 (2001)。
- 7) T. Sakagami and S. Kubo, Infrared Physics and Technology, **43**, 311 (2002)。
- 8) S. M. Shepard, Proceedings of SPIE, **4360**, 511 (2001)。
- 9) X. P. V. Maldague and S. Marinetti, J. Appl. Physics, **79**, 2694 (1996)。
- 10) 阪上隆英、久保司郎、朝倉良章、兵藤幸夫、木村 真、白井 誠、並本文春、日本非破壊検査協会平成15年度春季大会講演概要集、149 (2003)。
- 11) 阪上隆英、実験力学、**1**、120 (2001)。
- 12) J. R. Lesniak, B. R. Boyce and G. Howenwater, Proc. of SEM Spring Conf., 504 (1998)。
- 13) 井上裕嗣、日本機械学会講演論文集、No.99-1 (Ⅲ)、479 (1999)。
- 14) 村上敬宜、吉村正昭、日本機械学会論文集、A-61、2482 (1995)。
- 15) 岸本喜久雄、井上裕嗣、新保英男、渋谷壽一、日本機械学会論文集、A-62、1204 (1999)。
- 16) S. Barone and E. A. Patterson, Experimental Mechanics, **36**, 318 (1996)。
- 17) 阪上隆英、藤浪康之、久保司郎、日本材料学第50期学術講演会講演論文集、127 (2001)。
- 18) T. Sakagami, S. Kubo, Y. Fujinami and Y. Kojima, Proceedings of ATEM '03, CD-ROM (2003)。
- 19) 寺田博之、阪上隆英 (監修)、“赤外線サーモグラフィによる設備診断・非破壊評価ハンドブック”(2004) 日本非破壊検査協会。