

## Recent progresses on nondestructive evaluation techniques using infrared thermography.

Takahide Sakagami

Dept. of Mechanical Engineering and Systems,  
Graduate School of Engineering, Osaka University

**Abstract:** Recent improvements of infrared thermography with high precision infrared detectors have brought about remarkable progresses into thermographic NDT and NDE techniques. Thermographic NDT has been developed as one of the powerful non-contact NDT techniques, and it made us possible to detect flaws and defects with good resolution. This paper describes recent topics in research and development of the thermographic NDT. First, newly developed thermographic NDT techniques, which utilize transient temperature data after thermal stimulation, are described. Several experimental results of a pulse heating thermography and a lock-in thermography developed by the present author are shown. Detection of delamination defects in concrete structures is receiving an increasing attention as one of the most successful applications of the thermographic NDT. Experimental investigations are made for detection and measurement of delamination defects in actual concrete structures by the conventional thermographic NDT and the lock-in thermographic NDT. Finally, recent progresses in infrared stress measurement based on thermoelasticity are shown. Full field stress separation techniques are reviewed and a hybrid stress separation technique using thermoelasticity and photoelasticity developed by the present author is shown.

**Keywords:** Nondestructive Testing, Temperature Measurement, Infrared Thermography, Transient Temperature, Pulse Heating Thermography, Lock-in Thermography, Delamination, Concrete, Thermoelastic Stress Measurement

## 1. はじめに

ここ数年の間に、赤外線サーモグラフィによる温度分布計測の精度・分解能がさらに向上するとともに、機器の小型・軽量化、低価格化が進んでいる。これを背景に、赤外線サーモグラフィによる温度分布計測に基づく非破壊材料評価技術は、様々な方面で研究・開発が進められている。材料中の欠陥検出のための非破壊検査技術においては、欠陥検出の精度向上、欠陥計測の定量化が進められている。また、コンクリート構造物の非破壊検査に代表されるように、従来から開発されてきた赤外線サーモグラフィによる非破壊検査技術の現場への普及も急速に進められてきている。熱弾性効果に基づく応力分布評価においては、応力計測の精度向上、応力分離計測など新しい技術の検討が行われている。このように、赤外線サーモグラフィによる非破壊評価技術は、様々な分野で進歩を続けている。本稿では、赤外線サーモグラフィおよび赤外線サーモグラフィによる非破壊評価についての最近の話題を紹介する。

## 2. 新しい赤外線サーモグラフィ

ここ数年における赤外線サーモグラフィの開発動向としては、赤外線アレィセンサを搭載した赤外線サーモグラフィの進歩が挙げられる。現在、日本国内で入手可能な赤外線サーモグラフィの仕様を Table 1 に示す。赤外線アレィセンサを搭載した赤外線サーモグラフィの最近の開発傾向としては、研究開発あるいは特殊用途のための高性能・高価格な機種と、監視用途あるいはプラント保守用途のための小型・軽量・低価格な機種に大別される。

前者としては、InSb あるいは QWIP アレィセンサの進歩が顕著であり、30mK 以下の高い温度分解能での安定した赤外線温度計測が可能となっている。アレィセンサから出力されるデジタル信号の収集も高度化され、64k ピクセル以上の温度分布画像を、ミリ秒オーダーで連続デジタル計測できる赤外線サーモグラフィも開発されている。一部の機種においては、アレィセンサの計測範囲を縮小することにより、さらに高速計測が可能となる。アレィセンサの画素数については、主な生産国であるアメリカ合衆国の輸出規制により、日本国内で入手可能な機種では、表 1 に示したものとどまっているが、アメリカ合衆国では 640×512 画素のアレィセンサを搭載した

赤外線サーモグラフィがすでに市販されている。

後者としては、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。これまでのアレィセンサには、冷却が必要な量子型の赤外線検出器が使用されていたのに対し、非冷却型赤外線アレィセンサにはボロメータ型あるいは焦電型といった熱型の赤外線検出器が使用されている。特に最近のマイクロマシン技術の発達により、集積度が高く優れた温度分解能を有するマイクロボロメータ型の赤外線アレィセンサが開発され、すでに赤外線サーモグラフィに搭載されている。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、赤外線サーモグラフィの応用技術をさらに普及させる原動力となっている。

Table 1 Specifications of newly developed infrared thermographies being available in Japan.

	Infrared Detector	Wave-length $\mu\text{m}$	Cooling	NETD $^{\circ}\text{C}$	Frame Rate Frames/s
A	InSb 256×256	3-5	Cooled	0.025	140
B	InSb 320×256	3-5	Cooled	0.025	345
C	QWIP 320×256	8-9	Cooled	0.03	60
D	Micro Bolometer 320×240	8-14	Uncooled	0.15	30
E	Micro Bolometer 320×240	8-12	Uncooled	0.1	30

## 3. 赤外線サーモグラフィによる非破壊検査法の展開

近年の赤外線サーモグラフィによる非破壊検査法に関する研究開発の動向としては、(1)赤外線サーモグラフィ法の現場への普及、(2)赤外線サーモグラフィ法による欠陥・損傷計測の高分解能・高精度化、(3)赤外線サーモグラフィ法による定量的な非破壊検査法の開発、(4)新しい赤外線サーモグラフィ法の開発、等が挙げられる。以下では、著者らによる研究を含め、最近の赤外線サーモグラフィによる非破壊評価法に関する研究開発事例を紹介する。

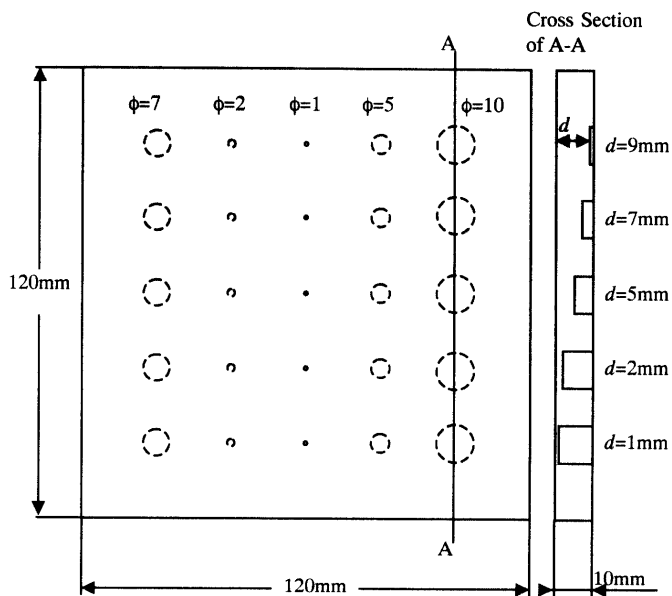


Fig.1 Standard specimen with flat bottom hole defects.

前述のように、赤外線サーモグラフィによる温度計測速度が向上し、30 フレーム/秒あるいはそれ以上の高速での熱画像計測が可能になったことにより、非定常温度分布すなわち熱拡散過程の温度分布の変動データを熱的非破壊検査に利用することが可能となった。定常状態の温度分布データを用いて欠陥検出を行う場合には、被測定物表面に現れた欠陥の存在による温度変化が熱拡散の影響により消失あるいは悪化するため、欠陥検出精度および分解能が低下する問題があった。これに対し、熱拡散による温度変化の消失が起こらない短い時間内の非定常温度分布の使用により、高い熱拡散性を有する材料に対しても良好な欠陥検出分解能および精度が得られるようになった。さらに、断熱温度場法を用いた赤外線サーモグラフィ法において、欠陥材の熱応答に関する非定常温度分布を用いることにより、単に欠陥を検出するだけでなく、欠陥の位置、寸法を定量的に評価できる可能性が生まれてきた。以下では、これまでに報告されている非定常温度分布を用いた非破壊検査手法について述べる。

**3.1 パルス加熱による赤外線サーモグラフィ法** 短時間のパルス状の熱負荷を被測定物に与えた直後の非定常温度分布をもとに欠陥を検出する手法は、多くの研究者により検討されている。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、欠陥による温度変化が被測定物表面に顕著に現れる。この非定常温度場を、熱拡散による温度変化の消失が起こらない短い時間内に計測することにより、高精度な欠陥検出が可能となる。また、一般にパルス加熱に用いられるキセノンフラッシュランプによれば、欠陥による温度場変化が明瞭となる均質な熱負荷を与えることが可能となる。

著者らは、軟鋼、ステンレス鋼、アルミニウム合金、銅、セラミックスおよびグラファイトで作製された、Fig.1に示すような標準試験片を用いて、パルス加熱による赤外線サーモグラフィ法による欠陥検出性を調べた。この標準試験片は、日本非破壊検査協会赤外線サーモグラフィによる非破壊評価特別研究委員会で作製された、種々の寸法および深さの平底穴欠陥を有するものである。出力3200JのXeフラッシュランプの閃光によるパルス加熱後の赤外線画像をFig.2に示す。実験結果より、熱伝導性が高い材料においては、パルス加熱直後の極めて短い時間の後、深さの小さな欠陥から順次検出されており、グラファイトでは、深さ7mmの欠陥まで検出が可能である。ところが、欠陥による断熱温度場により現れた欠陥部位を示すコントラストは早い経過時間で消失してしまう

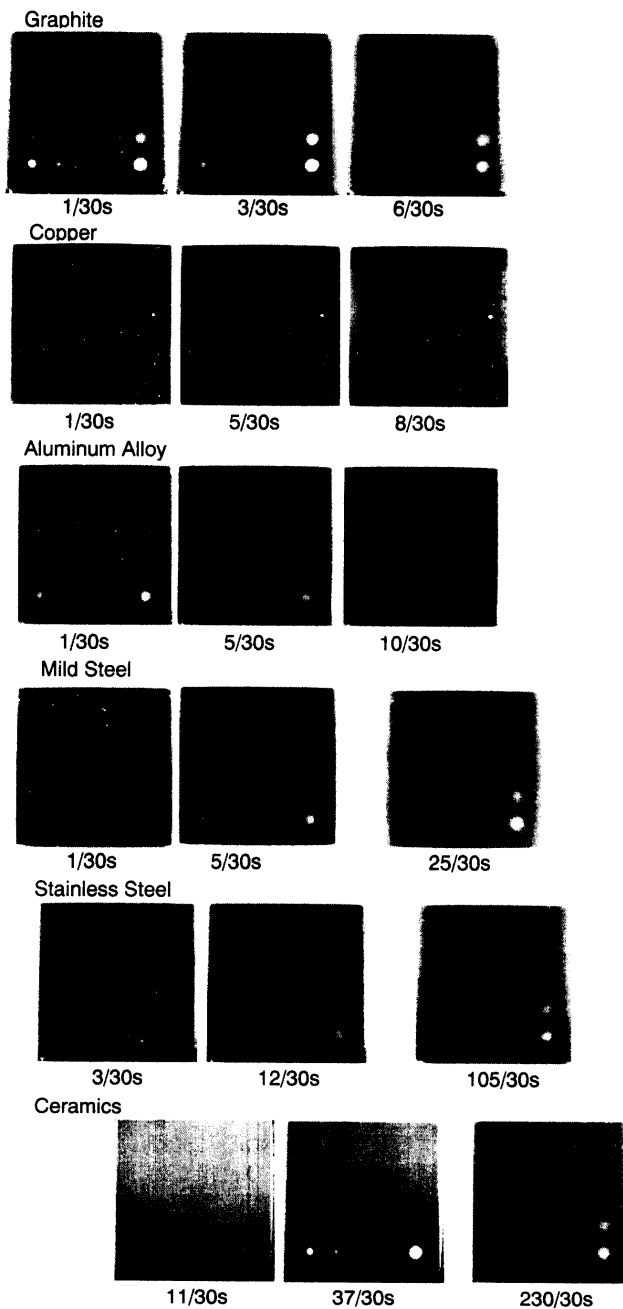


Fig. 2 Obtained thermal images after application of pulse heat flux for flat-bottom hole defects.

ため、寸法の小さな欠陥に対しては、検出感度が低下している。これに対し、熱伝導性が低い材料においては、パルス加熱後欠陥が検出されるまでの時間は長くなり、検出できる欠陥の深さは小さなものとなる。しかし、一旦現れた欠陥部位を示すコントラストは、比較的長い時間持続するため、浅い欠陥においては、寸法の小さな欠陥まで検出が可能であることがわかる。セラミックスの場合には直径2mmまで検出が可能である。

パルス加熱によるサーモグラフィ法を用いて欠陥の定量計測を行う試みは、Thermal Wave Imaging法として Favroら<sup>(1)</sup>によって行われている。同法では、キセノンフラッシュランプを用いて5ms以下の継続時間の短い熱パルスを計測対象領域に与えた後の、計測対象領域の温度変動を時間の関数として解析することにより欠陥同定が行われている。熱画像のコントラストおよびその時間変化の勾配が最大値となる時刻を欠陥同定の指標として用いることにより、欠陥の位置および寸法が評価されている。Thermal Wave Imaging法では時間

経過に伴う温度変化特性を評価しているの、サンプル表面の放射率の影響を受けにくい、検査者の主観を排除できるなどの特長を有している。

**3.2 ロックイン赤外線サーモグラフィ法** 物体に一定周期で変動する熱負荷を与えることにより、物体内部には波動状の熱移動が生じ、物体の表面温度も一定の周期・振幅で変動する。材料中に欠陥が存在すれば、当然波動状に変動する表面温度の分布にも欠陥の影響が現れる。このような一定周期の表面温度変動を、熱弾性応力測定システムのような相関信号処理装置を用いることにより高精度にロックイン計測し、これをもとに欠陥を同定するサーモグラフィ法が最近活発に検討されている。

**3.2.1 き裂検出** Lesniak<sup>(2)</sup>は、Forced Diffusion Thermography法(FDT法)と呼ばれる手法を開発している。この手法では、縞状の光を測定対象表面に照射することにより、材料に面内および厚さ方向の熱拡散を生じさせる。光の縞を一定速度で動かせば、材料表面には場所および時間により変動する波動状の温度分布が生じる。この波動状の温度分布を、熱負荷の時間変動すなわち縞の移動周期に同期させて高精度に計測し、これをもとに高い分解能・精度による欠陥検査を行っている。この手法は、加熱縞の間隔や移動速度を適切化することにより、面内および厚さ方向の熱拡散をコントロールできるという特色も備えている。

著者ら<sup>(3,4)</sup>は、き裂を含む導電体に電流を負荷した時、き裂先端近傍に形成される特異電流場に起因する、き裂先端近傍の発熱集中検出に基づくサーモグラフィ法すなわち特異温度場法にロックイン計測を適用した、新しい非破壊検査手法を提案している。特異温度場法において、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温度場を形成させ、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温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。また、同手法では、直接通電法によるき裂検出に加え、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温度場を計測する、誘導型特異温度場法も使用できる。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、温度振幅 $\Delta T$ および位相 $\theta$ の分布をFig.3に示す。 $\Delta T$ 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 $\Delta T$ 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、 $\theta$ 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、 $\theta$ 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。

**3.2.2 はく離および減肉欠陥の検出** はく離や減肉欠陥の検出に、ロックイン・赤外線サーモグラフィ法を適用する場合には、欠陥による断熱温度場が検出できるように、ランプ加熱の点滅などにより被測定物に面外方向の変動する熱流を形成させる。著者ら<sup>(6)</sup>は、深さの異なる平底穴を加工した軟鋼試験片を用いて、穴の反対側表面からキセノンランプの点滅による周期変動熱負荷を加えた場合に、同表面上に現れる周期変動温度場をロックイン計測した。腐食減肉欠陥を模擬した計測対象として、Fig.4に示すような深さの異なる4種類の平底穴欠陥を加工した鋼板試験片を用いた。キセノン断続光を、穴の反対側表面に照射することにより、試験片に周期的熱負荷を与え、同じ表面の周期変動する温度分布をロックインサーモグラフィにより計測した。計測装置の概要をFig.5に示す。キセノンランプの出力は500Wとした。また、加熱周期 $T$ は、0.5秒、1秒、2秒、3秒、4秒、5秒、6秒、8秒および10秒の9段階とした。データ取得方法としては、各加熱周期において150回の周期加熱を行い、その間すべての赤外線

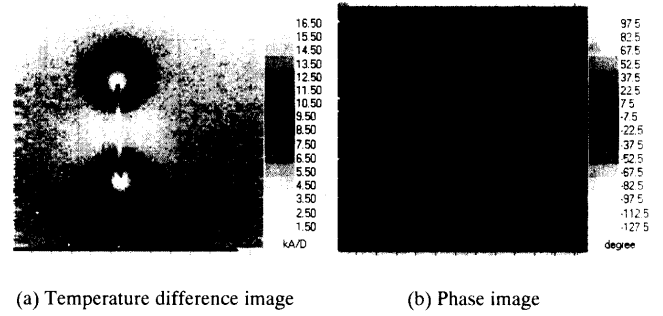


Fig. 3 Crack detection by lock-in thermography.

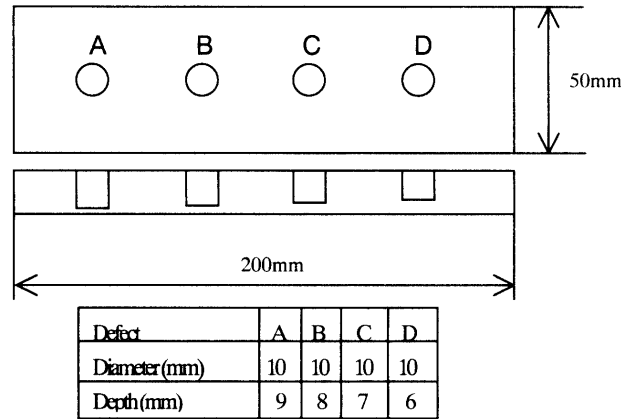


Fig. 4 Specimen with flat bottom hole defects.

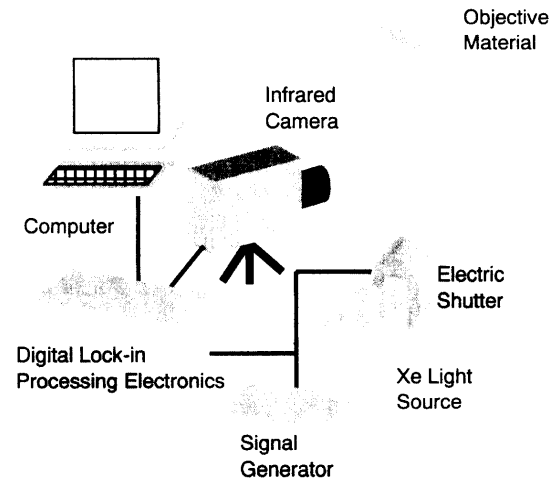


Fig. 5 Lock-in thermographic NDT system for detection of delamination or material-loss defects.

計測データをロックイン処理することにより位相遅れ分布を計測した。計測結果の中から、加熱周期 $T$ が1秒、2秒、5秒および10秒の場合に、ロックインサーモグラフィで計測された、位相遅れ分布画像をFig.6に示す。図よりわかるように、欠陥が存在する部分においては、位相遅れ分布に顕著なコントラスト変化が現れており、これをもとに欠陥の検出が可能であることがわかる。また、その変化領域は、平底穴欠陥の形状・寸法と対応していることがわかる。さらに、加熱周期の変化による欠陥検出性については、加熱周期を長くした場合のほうがより深い位置に存在する欠陥の検出が可能であることがわかる。このことは、ロックインサーモグラフィ法において、加熱周期による熱浸透深さの違いを利用することにより、欠陥深さの同定が可能であることを示唆している。

ロックイン・赤外線サーモグラフィ法は、複合材料のはく離検出法としても注目を集めている。Wuら<sup>(6)</sup>は、欠陥を有する複合材料に対し周期加熱を行い、周期加熱信号を参照信号

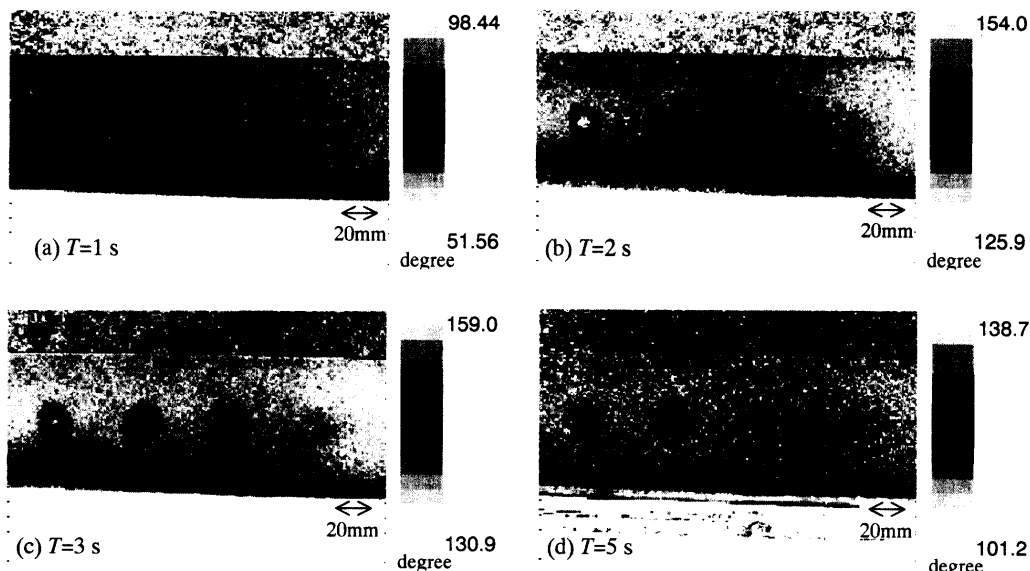


Fig. 6 Phase delay images for flat-bottom hole defects obtained by lock-in thermography under periodical heating.

として、欠陥による断熱温度場の変動をロックイン計測した結果に基づき欠陥同定を行っている。断熱温度場が周期変動する際の、参照信号からの位相遅れの分布が、欠陥検出に有効であることを示している。また、著者ら<sup>(7)</sup>は、周期加熱時の温度分布の相関信号処理に基づく高精度な計測データに、逆問題数値解析処理を施すことにより、はく離欠陥の形状および寸法の定量計測を行うサーマルウェーブ CT 法を提案するとともに、その有用性を数値シミュレーションで検証している。

### 3.3 音波による摩擦発熱を用いた赤外線サーモグラフィ法

自己発熱温度場に基づく赤外線サーモグラフィ法の新しい展開として、音波による摩擦発熱を用いたき裂検出法が、Favroら<sup>(8)</sup>により提案され、すでに実用に供される装置が作製されている。ホーンにより音波による高周波振動を、き裂を有する被測定物に負荷した際には、振動によるき裂面間の摩擦発熱が発生する。この摩擦発熱による温度場を赤外線サーモグラフィにより計測することにより、き裂の検出が可能となる。

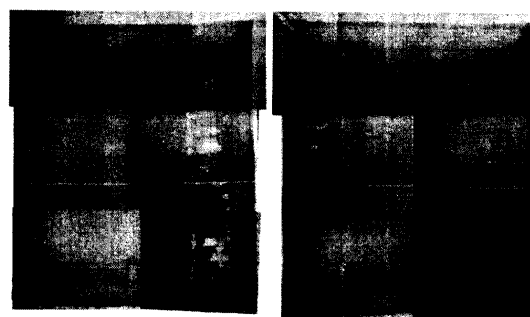
## 4. コンクリート構造物の非破壊検査

最近多発したコンクリート構造物の剥落事故をきっかけに、劣化したコンクリート構造物の診断・安全性保障技術の高度化が重要視されている。赤外線サーモグラフィ法は、(1)検査のための足場設営が不要、(2)短時間に広範囲の検査が可能、(3)欠陥が視覚的に同定できる、(4)光学系の選択により大型構造物にも適用可能、などの長を有していることから、建築・土木構造物の非破壊検査法として注目を集め、現場における非破壊検査技術の確立に向けて検討が進められている。

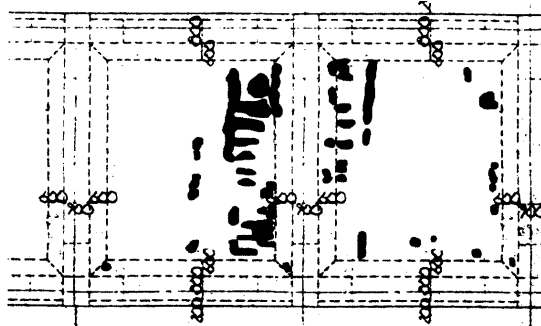
**4.1 パッシブ赤外線サーモグラフィ法** 昼夜の温度差あるいは日照などにより、構造物には自然に熱流が発生する場合がある。このような時、構造物中にはく離欠陥が存在するとその断熱効果により、構造物表面には局所的な温度変化が現れはく離欠陥の検出が可能となる。このような手法は、構造物をアクティブ加熱する手法に対して、パッシブ赤外線サーモグラフィ法と呼ぶことができる。はく離を有する可能性があるコンクリート高架橋床版に対し、パッシブ赤外線サーモグラフィ法およびテストハンマを用いた打音検査法を適用し、両者による検査結果を比較検討した結果について述べる。

**4.1.1 検査対象** 予備調査の結果をもとに、はく離が存在する可能性があるコンクリート高架橋 2 径間の床版下面を赤外線検査および打音検査の対象として選定した。

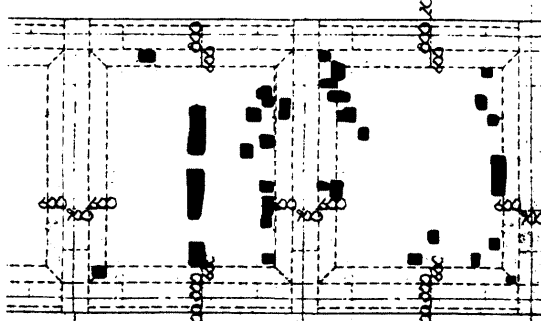
**4.1.2 赤外線検査** 赤外線カメラとしては、非冷却マイクロボロメータ赤外線センサを搭載した機種を用いた。赤外線カ



(a) Infrared images



(b) Delaminations defects detected by infrared thermography



(c) Delaminations defects detected by sonic inspection

Fig. 7 Comparison of NDT results between thermographic NDT and sonic inspection method.

メラ、テレビモニタを台車に取付け、台車を移動させながら床版下面を順次検査した。検査員としては、赤外線サーモグラフィ法によるはく離検査経験 1 年の 2 名の土木技術者を選

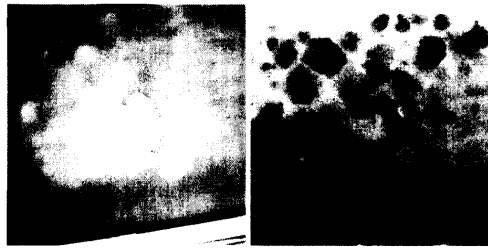


Fig. 8 Delamination defects detected by active thermography method.

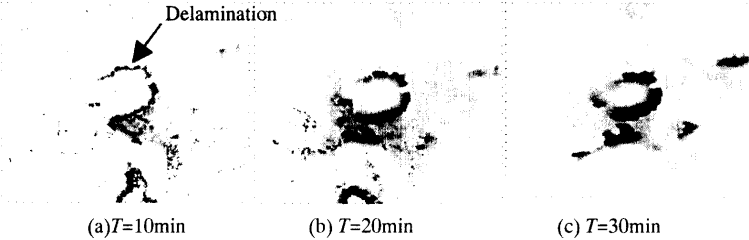


Fig. 10 Results of lock-in thermographic NDT of actual delamination defect.

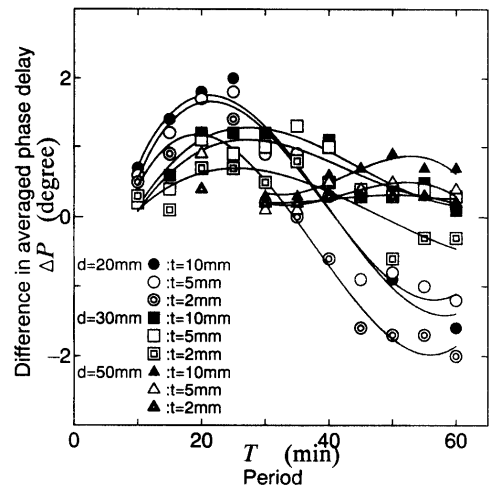


Fig. 9 Relationship between phase difference  $\Delta P$  and heating period  $T$  obtained for different defect depths.

んだ。2名の検査員が赤外線映像を撮影しながら、テレビモニタに現れた赤外線画像を評価し、はく離がある可能性があると判断した箇所を工事図面に記入した。

**4.1.3 打音検査** 打音検査は、高架橋保有会社が平素行っている保守検査法に従って行われた。高所作業車のゴンドラに2名の検査員が乗り、ゴンドラを移動させながらテストハンマにより床版下面の打音検査を行った。打音によりはく離が検出された箇所には、検査員がチョークで印をつけ、さらに剥落の危険性のある箇所については、ハンマによるたたき落しを行った。打音検査の終了後、マーキングおよびたたき落しが施された箇所を、地上の検査員が工事図面に記入した。

**4.1.4 検査結果** 赤外線カメラ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Fig.7(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Fig.7(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Fig.7(c)に示す。Fig.7(b)およびFig.7(c)を比較すると、両手法によるはく離検出結果は、良く一致していることがわかる。今回の検査に要した時間は、赤外線サーモグラフィ法が約30分、打音検査法が約120分であった。赤外線サーモグラフィ法による検査あるいは同手法の打音検査との併用により、検査所要時間を大幅に短縮できることが明らかになった。

#### 4.2 アクティブ熱負荷による実構造物のはく離計測<sup>(9)</sup>

トンネル等においては、上述の太陽光による加熱法が使用できないため、アクティブ加熱方法を検討する必要がある。アクティブ熱負荷サーモグラフィ法の実構造物への適用性を検討するため、コンクリート高架橋床版の下面に実際に発生したはく離を計測した。はく離は、中央部の鉄筋付近(深さ約30mm)を起点とし、そこから周辺部に向かって成長し部分的に表面に到達していた。コンクリート床版下面に対し、石油ヒータによるアクティブ加熱および水噴霧時の気化熱によるアクティブ冷却を行った。加熱時間は10分間とした。冷却については、水噴霧後15分経過した時に再び水噴霧を行った。

石油ヒータにより10分間加熱した直後に得られた赤外線画像をFig.8(a)に、2回目の水噴霧による冷却から8分経過時のサーモ画像をFig.8(b)にそれぞれ示す。加熱画像においては、顕著な局所的な高温領域、冷却画像においては顕著な局所的な低温領域が検出され、その位置・形状は打音検査および検査終了後の破壊試験により得られたはく離の位置・形状と一致し、アクティブ熱負荷赤外線サーモグラフィ法によるはく離診断の有用性が確認できた。

#### 4.3 ロックインサーモグラフィ法によるはく離計測<sup>(10)</sup>

**4.3.1 ロックイン赤外線サーモグラフィ法** ロックインサーモグラフィ法は、前述のように試験体表面に現れる時間変動する温度場を、変動に関する参照信号に同期させて高精度に計測し、これをもとに欠陥検出を行う非破壊試験法である。ロックイン計測のための参照信号には正弦波を用い、正弦値が正の時ヒータが点灯する加熱過程、負の時ヒータが消灯する冷却過程になるようにした。マイクロボロメータ赤外線カメラにより毎秒60フレームでデジタル計測された試験体表面温度に関するデータを、パーソナルコンピュータに取り込み、参照信号によりロックイン処理した。加熱装置として用いた石油ヒータから放射される赤外線には、赤外線カメラの計測波長領域の赤外線が含まれるため、加熱過程の計測データは、加熱装置から放射される赤外線の試験体表面での反射の影響を受ける。そこで、本実験では、冷却過程半周期分の赤外線計測データのみを有効データとしてロックイン数値処理を行う、半サイクルロックイン計測アルゴリズムを用いた。

**4.3.2 計測方法** まず、人工はく離欠陥を有するコンクリート試験体を計測対象として、加熱周期 $T$ を10分から60分まで5分さきみに設定し、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遅れの平均値を $P_d$ 、試験体全表面の位相遅れの平均値を $P_m$ として、位相差 $\Delta P$  ( $\Delta P = P_d - P_m$ )を計算した。種々の欠陥深さおよび加熱周期に対して得られた位相差 $\Delta P$ をFig.9に示す。図より、 $\Delta P$ は、加熱周期に依存していることがわかる。加熱周期が大きくなるにつれて $\Delta P$ は大きくなり、ある加熱周期でピークを取った後減少しさらに負の値をとる。また、 $\Delta P$ がピークを取る加熱周期は欠陥が深い程長くなる。このことは、ある深さのはく離欠陥検出を行う場合における最適加熱周期の存在を示すと同時に、加熱周期を変化させながら $\Delta P$ の計測を行うことにより、欠陥深さを定量的に推定できる可能性を示している。そこで、人工はく離欠陥に対して得られたこの関係をマスターカーブとして、実構造物のはく離欠陥の深さ推定に用いた。

**4.3.3 計測結果** ロックインサーモグラフィ法の実構造物への適用性を検討するため、ボックスカルバート床版下面に実際に発生したはく離を計測した。加熱周期 $T$ を10分、20分および30分とした場合に得られた位相遅れ分布画像をFig.10に示す。 $T=10$ 分とした場合には、はく離部分における $\Delta P$ は、はく離の輪郭部で負値を、中心部で正値をとっていることがわかる。また、 $T$ を20分、30分と長くするに従って、はく離の輪郭部で $\Delta P$ が負値をとる領域は内部へと拡大している。Fig.9で得られた加熱周期と $\Delta P$ の関係を参考に、はく離

深さを大まかに推定すると、はく離輪郭部で0~1cm、はく離の中心付近では2~3cm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ており、ロックインサーモグラフィ法によるはく離深さ計測の実現可能性が示された。

## 5. 赤外線応力測定法の最近の話題

**5.1 赤外線応力測定装置の高度化** 赤外線応力測定においては、一般には周波数一定、振幅一定の正弦波荷重が負荷され、荷重信号に同期した信号変動の振幅および位相が計測される。赤外線応力測定法を実機に適用する場合、実機の稼動状態では構造物に負荷される荷重は、ランダム荷重あるいは衝撃荷重が負荷されている場合が多い。このような場合にも、赤外線応力測定装置により、負荷応力の分布形が可視化計測できれば、実機の応力集中部の解析等、設計現場で有用な場合が多い。そこで最近では、荷重信号に同期する赤外線計測信号成分を最小二乗法により求め、応力の相対的分布を可視化表示する機能が赤外線応力装置に組み入れられている<sup>(11)</sup>。

赤外線応力測定装置による応力測定では、変動荷重負荷時の変位に注意が必要である。被測定物の変位による計測誤差は、可能な限り荷重荷重を小さくすることで軽減される場合もあるが、根本的に解決するためには、変位による計測位置のずれを何らかの手段で補正する必要がある。最近の赤外線応力測定装置には、計測位置のずれを計測視野が変位に追従するように光学的に補正する機能、あるいは計測後の応力分布をもとに被測定物の変位を解析し、ソフトウェアにより位置を補正する機能が組み入れられている。

**5.2 応力成分の分離** 熱弾性温度変動による赤外線応力測定装置により計測される力学量は、応力の第1不変量である主応力の変動量である。したがって、各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、多くの研究者が様々なアプローチで応力成分の分離法の開発に取り

組んでいる。

最近、逆問題解析に基づく応力分離手法が提案されている<sup>(12-15)</sup>。これらの手法では、まず主応力に関する計測データに基づいて解析領域に作用する荷重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。一般に境界値逆問題は、解の安定性に欠く不適切問題である場合が多く、特に主応力に関する計測データに誤差が含まれる場合などには逆問題解析はさらに悪条件化する。そこで、岸本ら<sup>(13-15)</sup>は、主応力に関する計測データから未知境界値を同定する境界値逆問題の数理構造を検討することにより、逆解析の高精度化を行っている。さらに、井上ら<sup>(16)</sup>は、弾性係数の温度依存性を考慮した基礎式を利用した、数値解析を要しない新しい主応力分離手法を提案し、その有用性を実験的に検討している。

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<sup>(17-19)</sup>。著者ら<sup>(18,19)</sup>は、赤外線応力測定による主応力に関する計測結果と、皮膜光弾性計測による主応力差および主応力方向に関する計測結果を用いて、全応力成分の分離計測を行っている。一例として、円孔を有する帯版に引張り荷重を与えたときの、円孔周りの応力分布を分離計測した結果を Fig.11 に示す。計測結果の精度を検討するために、境界要素法による数値解析結果を Fig.12 に併せて示した。熱弾性および光弾性ハイブリッド計測により、高精度な全応力成分分離計測が可能であることがわかる。

## 参考文献

- (1) L.Favro, et al., *Proceedings of SPIE* Vol.2473, p.162, (1995).
- (2) J.Lesniak, D.Bazile, *SPIE Proceedings* Vol.2766, p.210, (1996).
- (3) T.Sakagami, S.Kubo, *SPIE Proceedings Series* Vol. 3700, p.369, (1999).
- (4) 阪上, 久保ほか, 日本非破壊検査協会保護材上からの保守検査技術シンポジウム講演論文集, p.43, (2000).
- (5) 阪上, 久保ほか, 日本機械学会講演論文集, No.01-1, p.201, (2001).
- (6) D.Wu, et al., *Proceedings of SPIE* Volume 3056, p.176, (1997).
- (7) 阪上, 久保ほか, 非破壊検査, 48-10, p.688, (1999).
- (8) L.Favro, et al., *Proceedings of SPIE* Volume 4360, p.546, (2001).
- (9) 阪上, 久保ほか, 実験力学, Vol.1, No.1, p.34, (2001).
- (10) 阪上, 久保ほか, 日本機械学会関西支部第76期定時総会講演会講演論文集, No.014-1, p.6-15, (2001).
- (11) J.Lesniak, et al., *Proc. of SEM Spring Conf.*, p.504, (1998).
- (12) 村上, 吉村, 日本機械学会論文集, 61-591A, p.2482, (1995).
- (13) 岸本, 井上ほか, 日本機械学会論文集, 62-597A, p.1204, (1999).
- (14) 早房, 井上, 岸本, 渋谷, 境界要素法論文集, 13, p.101, (1996).
- (15) 早房, 井上, 清水, 岸本, 渋谷, 日本機械学会論文集, 65-639A, p.2325, (1999).
- (16) 井上ほか, 日本非破壊検査協会平成12年度秋季大会講演概要集, p.89, (2000).
- (17) S.Barone, E.Patterson, *Experimental Mechanics*, 36, p.318, (1996).
- (18) 阪上, 藤浪, 久保, 日本材料学会第50期学術講演会講演論文集, p.127, (2001).
- (19) 藤浪, 阪上, 久保, 小島, 日本機械学会関西支部第76期定時総会講演会講演論文集, (2002).

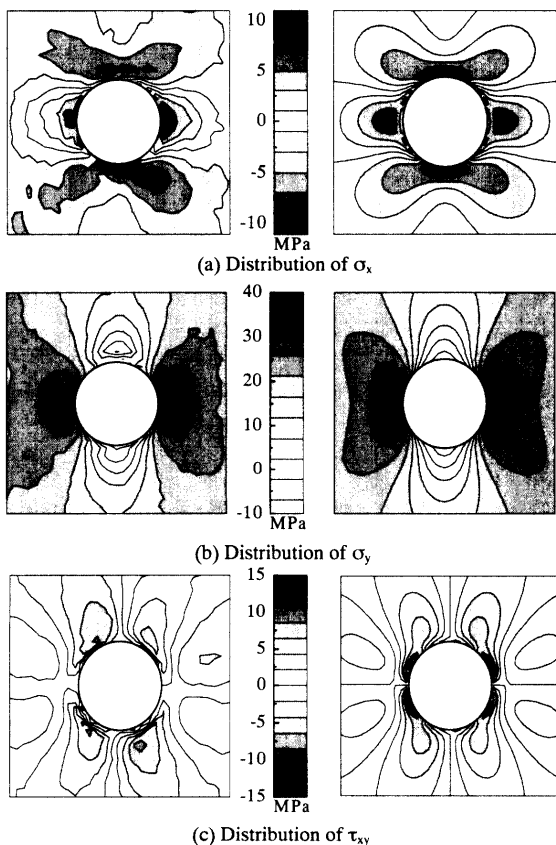


Fig.11 Stress separation by thermoelasticity and photoelasticity.