

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月31日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760432

研究課題名（和文） 建築土木建造物の外壁全面検査を可能にする

遠赤外線投光赤外線サーモグラフィ法の確立

研究課題名（英文） Establishment of Distance Heating IR Thermography

for Whole Wall Area of Concrete Structure

研究代表者

小笠原 永久 (OGASAWARA NAGAHISA)

防衛大学校・システム工学群・准教授

研究者番号：60262408

研究成果の概要（和文）：建造物の壁面全面検査を行うことを目的として、遠距離加熱赤外線サーモグラフィ法の確立を行った。主要研究内容は、放射加熱効率の向上、遠距離加熱手法の開発、温度ムラに対応するデータ処理手法の開発である。コンクリートの分光吸収特性とヒータの分光放射特性の組合せを調査し、近赤外型より黒体型または遠赤外型のヒータが効果的であることを確認した。分光透過率を考慮し、硫化亜鉛製の赤外レンズが投稿装置に適していることを示した。PPT法をデータ解析に適用し、温度ムラのある対象物から欠陥部を抽出する手法を構築した。

研究成果の概要（英文）：In order to inspect whole wall area of concrete structure efficiently, a distance heating IR thermography was developed. The main subjects were the following three; Efficiency improvement of radiant heating, Development of distance heating and Development of data analysis method against irregular heating. According to investigating combinations between spectral absorptivity of concrete and spectral emissivity of heater, both a blackbody type and a far infrared type can heat a concrete wall more efficiently than a near infrared type. As a result of consideration of the spectral transmissivity of infrared lens, the lens made of sulfuration Zinc can transmit a radiant energy the most efficiently. The pulse phase thermography was applied to data analysis and the proposed system could identify experimentally the flaw part from irregular heated concrete specimen.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,000,000	0	2,000,000
2011年度	1,100,000	0	1,100,000
総計	3,100,000	0	3,100,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学，建築構造・材料

キーワード：保全技術・赤外線サーモグラフィ・分光放射特性・コンクリート

1. 研究開始当初の背景

2008年に建築基準法が改正・施行され、建築物の歩行者に危害を加える恐れのある部分についての外壁全面検査と結果報告が義務付けられた。完全施行までの猶予期間は2011年までの3年間である。これに伴い、

国土交通省住宅局の監修により、建築物の外壁検査マニュアルが作成され、全面検査の在り方は、従来から広く使用されている打音検査を基本としながらも、赤外線サーモグラフィ試験も可とする内容が盛り込まれた。高所を対象とした打音検査を行うには、足場の設

置が必要であり、コストおよび安全性の問題がある。また打音検査は試験技術者個人の能力により結果が左右される技術的な問題も抱えている。

一方、赤外線サーモグラフィ法は非接触・安全・広範囲検査を特徴とする手法で、打音検査の欠点を補える。これらの理由から、検査会社ほか一般工業界において、赤外線サーモグラフィ試験に対する関心は高まっており、試験方法の確立・標準化が望まれている。

2009年、社団法人日本非破壊検査協会が、コンクリート構造物の赤外線サーモグラフィ試験に関する初めての規格 NDIS 3428「赤外線サーモグラフィ法による建築・土木構造物表層部の変状評価のための試験方法」を制定した。これは、適正な試験方法を定めることにより、技術水準の確保と試験業務の効率化を目的としたものである。太陽光を利用したパッシブ法を適用できる範囲を定めるなど、試験技術者の指針となるべき事柄が定められている。一方で、天候（曇り）あるいは地理的制約（隣接構造物・橋梁下面など）で日射による加熱が行えない場合、加熱あるいは冷却装置を用いて試験技術者がアクティブに温度変化を与えるアクティブ加熱法を用いるが、本規格にはアクティブ加熱法で与えるべき熱量やその方法など、具体的な事柄を示すことは今後の課題としている。

2. 研究の目的

本研究では、パッシブ法が適用できない橋梁下面や密集地域のビル外壁などを対象とする。特に都心部において必要とされる技術である。外乱の多い屋外でも適用でき、遠距離から高出力で定量加熱が可能な遠隔加熱赤外線投光器を作成し、コンクリート構造物外壁検査を行うことを目的とする。放射加熱は距離に応じて拡散し、放射密度が減少してしまう欠点があるが、赤外線レンズを用いて放射密度を上げ、スポットライトの要領で加熱を行う。また、部分加熱による加熱ムラや壁面の汚れによる放射率ムラの影響を受けにくい、測定データ処理手法も開発し、欠陥の定量的評価手法を構築する。主に以下3点の課題に取り組んだ。

- (1) 検査対象に対する放射加熱効率の向上
- (2) 遠距離加熱手法の構築
- (3) パルスフェーズサーモグラフィ法による測定データ処理手法の構築

3. 研究の方法

(1) 検査対象に対する放射加熱効率の向上
アクティブ法で利用する放射加熱は、被加熱体表面で吸収されずに反射する赤外線が増加すると、加熱効率が悪化する。本研究では、加熱体と被加熱体の分光特性を考慮することで、効率的な加熱を行うことを検討した。

加熱体の分光放射率（測定値）を $\varepsilon(\lambda)$ 、加熱体と同一温度の黒体放射量（理論値）を $Q_b(\lambda)$ 、被加熱体の分光吸収率（測定値）を $\alpha(\lambda)$ とすると、加熱体の放射量 Q_h および被加熱体の吸収量 Q_a 、加熱効率 P は次式で表される。

$$Q_h = \int Q_b(\lambda) \varepsilon(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

$$Q_a = \int Q_h(\lambda) \alpha(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$P = Q_a / Q_h \quad (3)$$

ここで λ は波長である。式(1)~(3)から、被加熱体の分光吸収率を考慮して加熱体を選定すれば加熱効率が向上することがわかる。

図1にフーリエ変換分光光度計によるコンクリートの分光吸収率（測定値）を示す。コンクリートの吸収率は遠赤外域で高く、遠赤外線放射量の増加が加熱効率向上に有効と考えられる。

放射型ヒータは、近赤外域の放射率の高い近赤外型、遠赤外域の放射率の高い遠赤外型、両波長域で放射率の高い黒体型に分類できる。各ヒータの総放射量をそろえた上でコンクリートを加熱し、表面上昇温度からコンクリートに対する加熱効率を比較した。

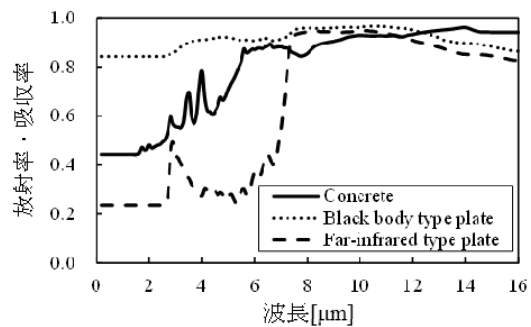


図1 分光放射特性

3種類の放射特性を持つ同一形状のヒータは入手困難であったため、まず近赤外型ヒータと黒体型ヒータの比較を行った。近赤外型の特性をもつハロゲンヒータに対し、放射面の長手方向半分の領域に黒体塗料を塗装し、一部を黒体型に変えた。近赤外型と黒体型の両放射領域を用いて、表面を黒体化処理したコンクリート試験片を加熱したところ、温度上昇の差はほとんど生じず、両放射領域の放射量はほぼ同一であることが確認できた。

このヒータを使用して、近赤外型と黒体型の放射特性の違いによるコンクリートに対する加熱効率を比較した。60秒間加熱した後のコンクリートの温度分布を、赤外線サーモグラフィ装置により測定した。加熱効率の評価には、コンクリート表面に定めた同一面積領域での平均上昇温度を比較した。近赤外型ヒータで加熱した領域は、黒体型ヒータで加熱した領域よりも平均上昇温度が約18%大きくなり、黒体型ヒータは、近赤外型ヒータよりコンクリートに対する加熱効率が高い

ことが示された。

続いて遠赤外型および黒体型の分光放射特性をもつ放射板を高温に保ち、遠赤外型および黒体型ヒータとして使用した。両放射板の分光放射率を図1に示す。式(1)から各放射板の表面温度に対する総放射量を計算し、温度を調整して総放射量を同一とした。本研究では、遠赤外型放射板を500°C、黒体型放射板を391°Cとした。前節の実験同様、黒体化処理コンクリートを加熱した際の上昇温度から、両放射板の放射量が等しいことを確認している。360秒間加熱した後、コンクリート表面温度を赤外線サーモグラフィ装置で測定した。その結果、両者の上昇温度はほとんど変わらなかった。

遠赤外型と黒体型でヒータの分光放射率が異なるにも関わらず、コンクリートの上昇温度に違いが見られなかった要因について考察するため、式(1)~(3)を利用して両放射板のコンクリートに対する加熱効率を比較した。加熱効率の計算値は、遠赤外型ヒータで80%、黒体型ヒータで79%であり、ほぼ同一であることがわかった。

実験時の温度における遠赤外型ヒータの分光放射強度とコンクリートの分光吸収強度の理論計算値を考慮すると、コンクリートの吸収率が低い7μm以下の波長域における遠赤外型ヒータの放射量は、全放射量の約半分を占める。これは、実験時の温度(500°C)での黒体放射強度のピーク波長がウィーンの変位則により3.7μm付近に位置するためである。その結果、この波長域において放射量と吸収量との差(損失)が多く生じた。この損失の発生により、遠赤外型ヒータの加熱効率が低下し、黒体型ヒータと同程度にとどまったと考えられる。

これらの結果から、以下の結論を得た。検査対象に対する加熱効率を向上させるには、被加熱体の分光吸収率を考慮した加熱体の選定が有効である。検査対象がコンクリートの場合、遠赤外型ヒータ・黒体型ヒータを利用した方が近赤外型ヒータよりも加熱効率が向上する。ハロゲンヒータの放射面を、黒体塗料塗布するだけで、近赤外型から黒体型に変更できる。また式(1)~(3)を利用した数値実験により、コンクリート加熱に適した理想ヒータは、近赤外域の放射率がほぼ0となる完全遠赤外型の分光放射特性を持つ必要がある。

(2) 遠距離加熱手法の構築

遠距離加熱を行う場合、被加熱面で十分な照射強度を得るため、ヒータの放射する赤外線を金属板での反射や赤外線透過材料を使用したレンズによる屈折で集光させる装置が必要である。特に、屈折を利用する場合、赤外線透過材料自身の吸収によって放射特性が変化することを考慮し、透過材料を評価

する必要がある。本研究では、平板の透過材料(赤外窓)を用いて透過赤外線のコンクリートに対する加熱効率について理論計算および実験を行い、集光に適した赤外線透過材料を選定した。

コンクリートの加熱に適した赤外線透過材料を選定するため、各窓材を使用したときのコンクリートに対する加熱効率を計算した。また、各赤外窓を使用しコンクリートを加熱し、各赤外窓に対しての上昇温度を比較した。

放射型ヒータで赤外窓越しにコンクリートを加熱する場合の加熱効率 P_{hc} を、赤外窓の分光透過率 $\tau_w(\lambda)$ およびヒータの放射量 $Q_h(\lambda)$ 、コンクリートの分光吸収率 $\alpha_c(\lambda)$ から計算した。赤外窓透過赤外線の熱量 Q_{tr} および透過後に最終的にコンクリートに吸収される熱量 Q_c 、コンクリートに対する加熱効率 P_{hc} および赤外窓の赤外線透過効率 P_{tr} は以下の式で表すことができる。

$$Q_c = \int Q_h(\lambda) \tau(\lambda) \alpha_c(\lambda) d\lambda = \int Q_{tr}(\lambda) \alpha_c(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

$$Q_{tr} = \int Q_h(\lambda) \tau(\lambda) d\lambda \quad (5)$$

$$P_{hc} = Q_c / Q_h \quad (6)$$

$$P_{tr} = Q_{tr} / Q_h \quad (7)$$

コンクリートに対する加熱効率は、通常ヒータ入力電力を基準とするが、本研究ではヒータ自身の構造でなく、コンクリート表面に照射される赤外線の分光特性に注目しているため、加熱効率はヒータの放射量 Q_h を基準として計算する。

本研究では、サファイア(Sapphire)、ゲルマニウム(Ge)、シリコン(Si)、硫化亜鉛(ZnS)の4種類の赤外窓(厚さ1mm、両面光学研磨仕上げ)を比較した。各赤外窓の分光透過率を図2に示す。遠赤外型および黒体型の分光放射率の被膜を持つアルミニウム製放射板をヒータとして使用した。ヒータ表面温度は総放射量が一致するよう遠赤外型放射板で500°C、黒体型放射板で391°Cとした。分光放射率を測定するFT-IRでは、約2μm以下の近赤外域放射率・吸収率は測定困難であるため、最短波長での測定値と同一とした。

各赤外窓の P_{tr} および P_{hc} を比較した結果、遠赤外型および黒体型のヒータの両方においてZnSの P_{hc} が最も高いことがわかった。これはZnSの分光透過率は全波長域でほぼ一様であり、平均透過率が最も高いためと考えられる。一方、Sapphireの P_{tr} および P_{hc} は4種類のうちで最も低かった。Sapphireは遠赤外域の透過率がほぼ0であり、遠赤外域での放射が遮断されるためであると考えられる。またSapphireは遠赤外型ヒータでの加熱効率が黒体型ヒータの場合と比較して約10%低下した。これもSapphireが遠赤外域の透過をほぼ遮蔽するためと考えられる。

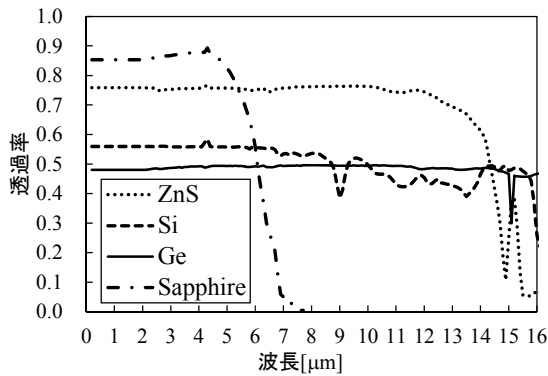


図2 赤外窓の透過率

各赤外窓の透過効率 P_{tr} を、放射計による透過量測定値により確認した。前述の表面温度に保った放射板の正面から 70mm の位置に開口部直径 48mm の赤外窓を設置し、赤外線放射計（株式会社チノー IR-BAXD0）によって赤外線透過量を測定した。また、同一条件で赤外窓のない時の放射量を測定した。

各赤外窓での P_{tr} に対する放射計測定値および理論値を比較すると、黒体型および遠赤外型のヒータの両方において、放射計測定値は、理論値に近い値を示し、 P_{tr} に対して相関関係が認められた。よって、実験的にも 4 種類の赤外窓の中で ZnS が最も P_{tr} が良いことが示された。

各赤外窓での P_{hc} とコンクリートを加熱したときのコンクリート表面の上昇温度測定値と比較した。表面温度を指定温度に保った各放射板および赤外窓を設置し、放射板から 100mm の位置にコンクリートを設置した。加熱時間は 6 分間とし、被加熱表面温度を赤外線サーモグラフィ装置 (NEC Avio 赤外線テクノロジー株式会社 TVS-500EX) で測定した。加熱終了時刻から約 30 秒後の被加熱表面の熱画像から、赤外窓と向かい合う 48mm 四方の領域での平均温度をとり、加熱前からの温度上昇を計算した。コンクリートの温度は、赤外線サーモグラフィ装置の測定波長域でのコンクリート吸収率平均値 0.92 で補正した。各赤外窓の透過赤外線によるコンクリートの上昇温度を比較すると、各窓材におけるコンクリート上昇温度の測定値は P_{hc} の高い赤外窓ほど大きく、ZnS が最も上昇温度が大きかった。よって、今回検討した 4 種類の透過性材料では、ZnS が最もコンクリートの加熱に適した透過性材料であることがわかった。また、コンクリート加熱時の各赤外窓の熱の吸収を確認するため、各窓材表面に熱電対を貼り付け、温度上昇を比較した。その結果、加熱効率の低い順に温度上昇が高いことが分かった。このことから、赤外窓自身の吸収が多ければ、加熱効率が低くなることが確認できた。

また、一般的に赤外線サーモグラフィ装置

に用いられる赤外窓には、反射防止コート処理が施され、図 2 の透過率より高い値を持つことが知られている。これは装置の検出波長範囲、すなわち大気の窓の範囲だけの透過率が高いため、他の波長範囲の透過率は低下する。結果として、反射防止コート処理済みの Si, Ge の透過効率は、未処理の ZnS とほぼ同じであった。ヒータの分光放射特性を大気の窓に絞り込むことができない限り、費用効果を考慮すれば、ZnS が赤外レンズとして最適と言える。

(3) パルスフェーズサーモグラフィ法による測定データ処理手法の構築

放射による加熱では、汚れなどで吸収率が変化している部分や加熱ムラが生じている部分が周囲より高温または低温となり、欠陥部として誤検出されることがある。そこで、それらの温度ムラを除くことが可能な Pulse Phase Thermography (PPT) がコンクリートの検査において有効であるか検討した。物体を加熱するとき深さ z の位置に熱エネルギーが到達するまでの時間 t は、熱拡散係数 a を用いて次式で表される。

$$t \sim z^2 / a \quad (8)$$

上式より、熱拡散は熱エネルギーが到達する位置と時間に依存していることがわかる。PPT はこの原理を利用して欠陥検出を行う。パルス状の熱負荷を表面に与え、生じた表面の温度履歴をフーリエ変換し、その位相を取得する。熱拡散の違いを示す位相を比較することで、温度ムラの影響を受けずに欠陥検出を行うことができる。そこで、欠陥検出手法である PPT を、熱拡散が遅いコンクリートに適用する方法を検討した。

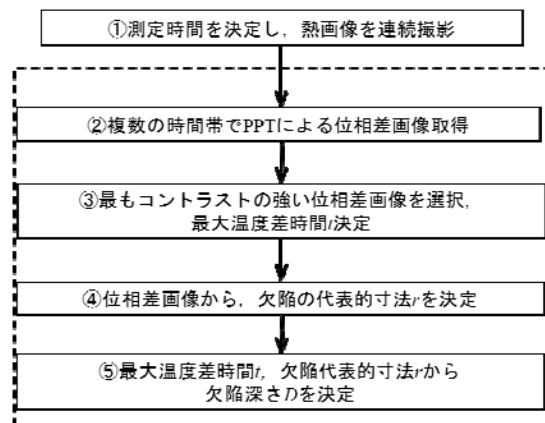


図3 定量的欠陥検出方法の流れ

PPT ではパルス加熱を行うため、コンクリートの加熱に必要な加熱量を有限要素解析によって調べるとともに、欠陥形状と位置を変えた場合の温度から、欠陥部と健全部との温度差が最大となる時間（最大温度差時間）を欠陥深さと欠陥半径から決定する関数を

導いた。また、PPTによって欠陥検出を行うときに用いる温度データの時間帯について検討した結果、最大温度差時間付近の時間帯が適していることを明らかにした。最大温度差時間が欠陥深さと欠陥半径に依存すること、欠陥検出に適した時間帯の選択方法を組み合わせて、PPTをコンクリートの欠陥検出に用いる方法を提案した。図3に定量的欠陥検出方法の流れを示す。実験で得られた熱画像に対して提案したPPTを利用した欠陥検出方法を適用し、その有効性を確認した。欠陥検出結果を図4に示す。欠陥部が白く抽出されている。右上と左下が欠けているのは、加熱不十分領域である。従来の方法では、これら温度ムラの領域も欠陥部として認識されてしまうが、本手法では区別できる。

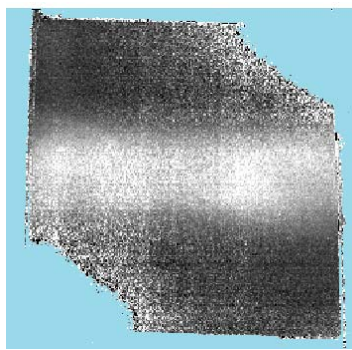


図4 欠陥検出実験結果

4. 研究成果

加熱体および被加熱体の分光特性を考慮した遠距離加熱赤外線サーモグラフィ法について検討を行った結果、本手法は図5に示す構成となる。コンクリートを検査対象とする場合、加熱用ヒータは、遠赤外型または黒体型ヒータを使用し、加熱効率を向上させる。ヒータの放射する赤外線を屈折および反射を組み合わせた照射装置を使用し、遠距離加熱を行う。装置に用いるレンズには、硫化亜鉛を使用する。検査面の熱画像に対し、パルスフェーズサーモグラフィ法を利用した欠陥検出方法を適用し、温度ムラの影響なく欠陥を判別する。本手法を用いることで、遠距離から効率的なコンクリートの欠陥検出が可能となる。

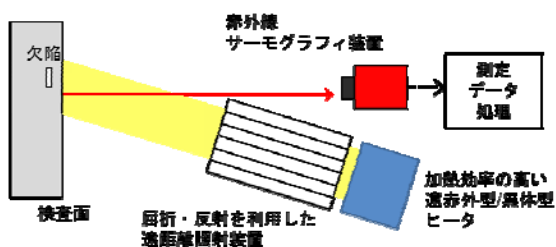


図5 遠距離加熱赤外線サーモグラフィ法

本研究で得られた加熱体および被加熱体の分光特性を考慮した遠距離加熱赤外線サーモグラフィ法の原理は、コンクリート構造物に限らず幅広い対象物に利用できる。そのため、本研究がアクティブ赤外線サーモグラフィ法のより一層の普及に役立ち、健全性検査による安全な社会づくりの一助となることが期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計4件)

- ① 小笠原永久, 木村嘉孝, 遠赤外線ヒータの分光放射特性の簡易評価方法, 日本機械学会論文集B編, 査読有, 77巻776号, 2011, 1147-1157
<http://dx.doi.org/10.1299/kikaib.77.1147>
- ② N. Ogasawara, H. Yamada, Thinning Identification Technique using Stainless Steel Film Heater and Response Surface Method, Proceedings of SPIE, Thermosense, 査読有, Vol. 8013, 2011, 1-9
DOI: 10.1117/12.885605
- ③ N. Ogasawara, M. Ito, N. Chiba, Nondestructive Inspection of Local Thinning by Infrared Thermography with Stainless Steel Film Heater, Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics, 査読有, Vol. 10, 2010, 129-134

〔学会発表〕(計9件)

- ① 安藤輝 (小笠原永久), 赤外線サーモグラフィ法においてコンクリートの遠距離加熱に使用する透過性材料の選択方法, 日本非破壊検査協会第6回赤外線サーモグラフィ部門ミニシンポジウム, 2011年12月22日, 都立産業技術研究センター(東京都)
- ② 安藤輝 (小笠原永久), 赤外線サーモグラフィ法におけるコンクリート加熱効率の向上, 日本非破壊検査協会平成23年度秋季講演大会, 2011年10月19日, 県立淡路夢舞台国際会議場(兵庫県)
- ③ 安藤輝 (小笠原永久), 赤外線サーモグラフィ法における対象表面の熱吸収特性を考慮した加熱装置の検討, 日本非破壊検査協会平成22年度秋季講演大会, 2010年10月27日, 市町村自治会館(沖縄県)
- ④ 小林千恵 (小笠原永久), コンクリート構造物のアクティブ赤外線サーモグラフィ法に適した加熱条件, 日本機械学会山梨講演会, 2010年10月23日, 山梨大学(山梨県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小笠原 永久 (OGASAWARA NAGAHISA)
防衛大学校・システム工学群・准教授
研究者番号：60262408