

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01296

研究課題名(和文) 赤外線アクティブサーモグラフィ検査の検査時間短縮に向けた熱波動の観点からの検討

研究課題名(英文) A study for reducing inspection time of active thermographic non-destructive testing on the basis of thermal wave theory

研究代表者

石川 真志 (ISHIKAWA, Masashi)

徳島大学・大学院社会産業理工学研究部(理工学域)・講師

研究者番号：10635254

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：赤外線アクティブサーモグラフィ検査の高効率化を目標に、伝播速度の速い高周波数の熱波動の利用による検査時間短縮効果を実験的に検証した。実験の結果、検査対象物への周期加熱に際して加熱周波数を変化させることで検査に要する時間が変化することを確認し、高周波熱波動の利用により一定の検査時間短縮効果が得られることを明らかにした。一方で、周波数増加に伴う熱波動の減衰の影響が非常に大きく、過度に高周波数の熱波動の利用は困難であることも確認された。より大エネルギーの熱入力を実現できれば更なる短時間化も期待されるが、現実的には対象物の耐熱温度等の問題もあり、本観点からの検査時間短縮には限界があることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では赤外線アクティブサーモグラフィ検査に際してしばしば課題となる検査時間の問題の解決を目指す社会的な意義と、その過程において検査の背景にある熱波動の物理を検証する学術的な意義の両面を課題とした。学術的意義としては、熱波動の伝播速度の変化を実験的に確認し、その効果がアクティブサーモグラフィ検査においても反映されることを明らかにした。また社会的意義としては、本観点を踏まえて検査方法(加熱方法)を工夫することで、検査時間の短時間化に一定の効果があることを示した。これらの結果の一方で、現状では本観点から実現可能な検査の短時間化には限界があり、これの克服が次の学術的・社会的な課題であると言える。

研究成果の概要(英文)：To reduce the inspection time of active thermographic non-destructive inspection, we tried to use thermal waves with higher frequency components which has higher heat propagation speed. Experiments for specimens with an artificial defect showed that the required inspection time to detect the defect was reduced by increasing the heating frequency, i.e., by increasing the frequency of input thermal waves. On the other hand, it was also found that the attenuation of thermal wave was drastically increased by increasing its frequency. These results imply that there is a practical limit to shorten the inspection time on the basis of the thermal wave theory. If larger amount of thermal waves with high frequency components could be excited, the inspection time could be shorter; however, it is practically difficult because of the maximum output power of the heat source used or the heat resistant temperature of the tested materials.

研究分野：非破壊検査

キーワード：非破壊検査 赤外線サーモグラフィ 熱波動

1. 研究開始当初の背景

赤外線アクティブサーモグラフィによる非破壊検査は、検査対象物表面をヒーター等で加熱し、加熱中および加熱後の表面温度変化を観察する検査方法である。検査対象物内部に亀裂や空隙等の異常部が存在すれば、その箇所での断熱効果の影響により、異常部が存在する直上表面に局所的な温度異常(高温部)が発生する。これを赤外線カメラの熱画像で検出することで、内部異常を発見する手法である。本手法は検査対象物に非接触での検査が可能であるとともに、比較的大面積を一度に検査可能であることから、簡便かつ効率的な検査方法として期待される。一方で、本手法の実用上の課題として、しばしばその検査時間の問題が指摘される。本手法の検査に要する時間は検査対象物の熱物性に依存することから、例えば樹脂などの低熱拡散率材料の検査では、条件によっては数百秒程度の検査時間を要する。また、検査時間は加熱・観察面からの欠陥深さにも依存することから、表面から深くに位置する欠陥の検出にも長時間を要し、例えばコンクリート中の深さ数十 mm の欠陥検出に際しては千秒以上の非常に長大な観察時間が必要となることもある。

2. 研究の目的

本研究ではアクティブサーモグラフィ検査の検査時間を目指し、熱波動の物理について注目し、その検査の適用可能性について検証を行った。ある物体の表面温度が周期的に変動するとき、物体の内部には変動周期を伴った熱波動が伝播する。この熱波動の伝播速度 v は媒質の熱拡散率 α と変動周期の角周波数 ω より $v = \sqrt{2\alpha\omega}$ で得られることが知られており^[1,2]、これより熱波動の伝播速度はその周波数の増加とともに増加することが分かる。このため、伝播速度の速い高周波数の熱波動をアクティブサーモグラフィ検査に利用することで、入力された熱が早く内部欠陥部に到達し、検査時間が短くなることが期待される。本研究では、熱波動周波数の変化に伴う熱伝播速度の変化を実験的に確認するとともに、実際に欠陥を有する試験片へ高周波数成分を有する熱波動の励起を試み、その検査時間短縮への効果について検証を行った。

3. 研究の方法

(1) 熱波動周波数の変化に伴う熱伝播速度変化の検証

周波数の変化に伴い熱波動の伝播速度が変化することを実験的に検証した。実験では熱電対を埋め込んだコンクリート試験片の表面を加熱し、熱伝播に要する時間を熱電対による温度計測により評価した。熱電対の温度測定点は、試験片表面より 10 mm および 30 mm の位置となるように調整した。試験片表面はファンクションジェネレータ(AFG3102, Tektronix Co., Ltd.)で出力を制御したハロゲンランプ(最大出力 500 W)で加熱し、加熱開始後の経過時間に伴う各測定点での温度を計測した。ハロゲンランプの出力は正弦波状に制御し、加熱周波数は 0.001, 0.003 および 0.005 Hz とした。

(2) 人工欠陥を有するアクリル試験片に対する検証試験(検査時間短縮効果の確認)

アクティブサーモグラフィ検査における高周波数熱波動の効果を検証するため、人工欠陥を有するアクリル試験片に対する実験を行った。図 1 に使用した試験片の模式図を示す。試験片は人工欠陥として表面から深さ 3 mm の位置に幅 50 mm の平底溝を有している。実験では本試験片をファンクションジェネレータで出力制御したハロゲンランプ(最大出力 2 kW)で加熱し、加熱中の表面温度変化を赤外線カメラ(A315, FLIR Systems Inc.)で観察した。加熱周波数は 0.01, 0.03, 0.05 および 0.1 Hz とし、加熱周波数の変化に伴う欠陥検出に要する時間の変化を調査した。なお、本実験における人工欠陥部の検出可否の判断は、サーモグラフィ検査において一般的な熱画像を用いた判断ではなく、温度データを処理することで得られる位相画像を用いた評価を行った。位相画像は熱画像上の各ピクセルにおける温度の時間変化データに対してフーリエ変換を行うことで得られ、熱画像と比較して微小な温度変化をより敏感に捉えることができる^[3,4]。このため、欠陥部で温度変化が発生する時間をより高精度に観察可能となる。

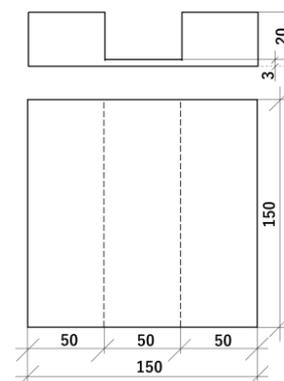


図 1 アクリル試験片の模式図

(3) 人工欠陥を有するコンクリート試験片に対する検証試験

アクリル試験片に対する実験と同様の方法でコンクリート試験片に対する実験も実施した。試験片は 300×300×100 mm であり、人工欠陥として表面から深さ 10 mm の位置に幅 100 mm、奥行き(厚さ) 2 mm の空隙を有する(これはコンクリート中の浮きを模擬したものである)。使用した実験機器はアクリル試験片に対する実験と同

様であり、加熱周波数も同様に 0.01, 0.03, 0.05 および 0.1 Hz とした。

4. 研究成果

(1) 熱波動周波数の変化に伴う熱伝播速度変化の検証

加熱周波数 0.001 Hz の条件で行った実験から得られた各深さの測定点における温度-時間データを図 2 に示す。図 2 の結果は得られた元データに対してバンドパスフィルタをかけることで 0.001 Hz の成分を抽出した結果である。これより、測定点間の伝播に要した時間差 (Δt) と測定点間距離 (20 mm) から熱の伝播速度を計算することができる。各加熱周波数の条件で得られた熱伝播速度を図 3 に示す。同図中には熱伝播速度の理論式 ($v = \sqrt{2\alpha\omega}$) より推定されるコンクリート ($\alpha = 0.4 \text{ mm}^2/\text{s}$) 中を伝わる熱波動の伝播速度と周波数との関係も実線で示した。図 3 より、実験で得られた熱伝播速度は加熱周波数の増加とともに増加しており、その値は理論的に予想される値とおおよそ一致していることがわかる。本結果は、熱波動の周波数と伝播速度との関係を実験的に検証・確認した一例であると言える。

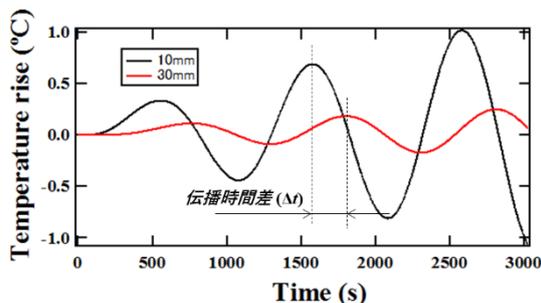


図 2 各深さの熱電対で測定された温度の時間変化データ (加熱周波数 0.01 Hz)

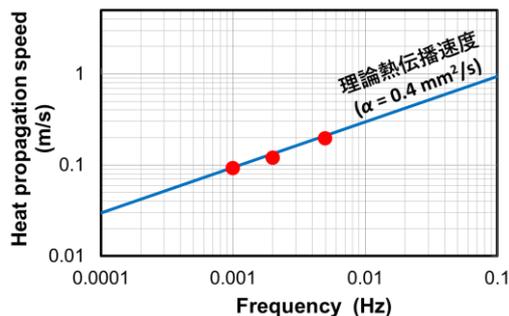


図 3 実験より得られた熱伝播速度と理論計算結果の比較

(2) 人工欠陥を有するアクリル試験片に対する検証試験 (検査時間短縮効果の確認)

加熱周波数 0.03 Hz の条件で得られた位相画像の一例を図 4 に示す。加熱開始後の時間経過とともに入熱量が増加することから、試験片中央の欠陥部が徐々に明瞭に確認できるようになる様子がわかる。図 4(b)の画像は SN 比 (Signal-to-Noise, 信号対雑音比) が約 2 となる条件での画像であり、以下では SN 比 = 2 となる時間を欠陥検出に要した時間とする。図 5 は SN 比 = 2 となるのに要した時間と加熱周波数との関係を整理したグラフである (ここで S 値は欠陥部-健全全部間位相差とし、N 値は健全全部上での位相値の標準偏差とした)。0.01, 0.03, 0.05, 0.1 Hz のそれぞれについて 33, 29, 26, 26 秒であった。図 5 より、加熱周波数の増加に伴って、欠陥検出に要する時間が減少傾向にあることが分かる。これは、加熱条件の変化により、試験片に入力された熱波動の周波数が変化した為であると考えられる。図 5 中には熱伝播速度の理論式より、各周波数の熱波動が深さ 3 mm の欠陥部までの距離を往復するのに要する時間の推定値も実線で示している。比較すると、実験結果は理論推定値と必ずしも一致しておらず、0.01 Hz では理論推定値より短時間で欠陥検出が可能であり、0.05, 0.1 Hz の条件では理論推定値よりも長時間の検査が必要であったことがわかる。得られた温度-時間データを解析し、その周波数スペクトルを調査したところ、0.01 Hz の加熱の際には、励起した周波数だけではなく、より高周波数の成分も同時に入力されていることが分かった。このため、伝播速度の速い高周波数成分が 0.01 Hz の成分よりも短

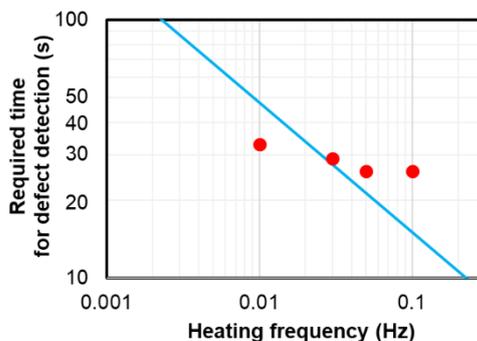


図 5 アクリル試験片の実験における S/N = 2 となる時間と加熱周波数との関係、および 3 mm 深さ欠陥の往復伝播に要する時間の理論値との比較

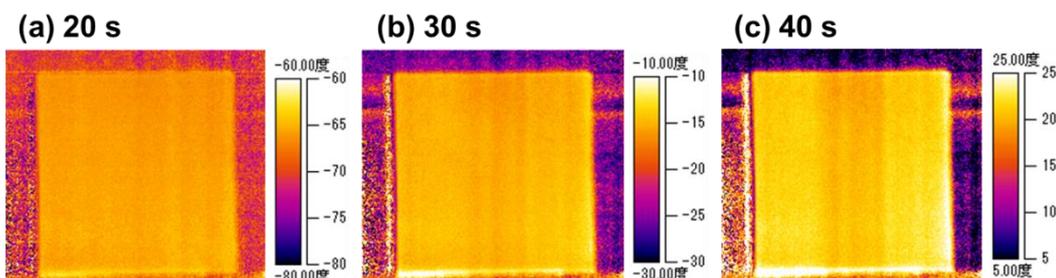


図 4 アクリル試験片への実験において得られた (a) 20 秒, (b) 30 秒 (c) 40 秒 の各時間までの温度データから得られた位相画像

時間で表面一欠陥部間を往復したために、理論推定値よりも短時間で欠陥検出が可能となったものと考えられる。一方、理論推定値よりも長時間の検査時間を要した 0.05 Hz および 0.1 Hz の実験では、伝播に伴う熱波動の減衰により励起した成分の検出が困難となったと予想される。熱波動の減衰は周波数の増加とともに大きくなり、0.05 Hz および 0.1 Hz の各熱波動がアクリル中の深さ 3 mm の距離を往復した際の減衰は、理論的にはそれぞれ -63 dB, -89 dB と非常に大きな値となる。このため、励起した周波数成分は検出できず、実験で検出された欠陥部は加熱に際して同時に入力されたより低い周波数の熱波動成分の効果により検出されたものと考えられる。欠陥検出に要した時間が理論推定値よりも大きくなったのはこのためであると予想される。

(3) 人工欠陥を有するコンクリート試験片に対する検証試験

加熱周波数 0.01 Hz の条件で得られた位相画像の一例を図 6 に示す (図 6(b) が S/N 比 = 2 となる条件である)。また、各加熱周波数条件において S/N 比 = 2 となるのに要した時間を図 7 に示す。0.01, 0.03, 0.05, 0.1 Hz のそれぞれについて 70, 64, 58, 52 秒であった。図 7 より、コンクリート試験片についても加熱周波数の増加に伴う検査時間の減少が確認でき、得られた結果の傾向はアクリル試験片の結果と同様である。コンクリート中を伝播する熱波動も、その周波数の増加に伴い減衰が顕著に増加する。このため、加熱周波数の増加に伴う検査時間短縮の効果は一定程度確認できるものの、比較的高周波数の熱波動成分は減衰の為その検出が困難であり、検査時間短縮の効果を得にくい。

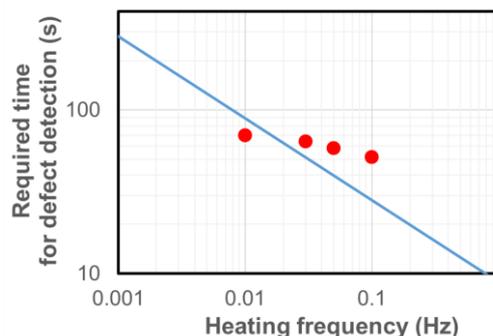


図 7 コンクリート試験片の実験における S/N = 2 となる時間と加熱周波数との関係、および 10 mm 深さ欠陥の往復伝播に要する時間の理論値との比較

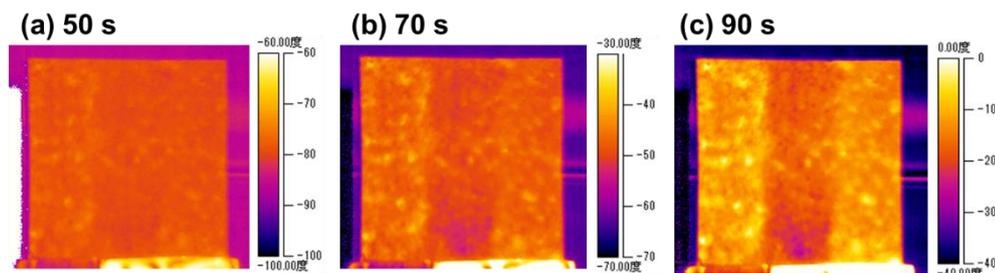


図 6 コンクリート試験片への実験において得られた (a) 50 秒, (b) 70 秒 (c) 90 秒 の各時間までの温度データから得られた位相画像

(4) 研究成果のまとめ

本研究では、熱波動の理論に従う熱波動周波数と熱伝播速度の関係を実験的に確認するとともに、アクティブサーモグラフィ検査において加熱周波数を調整し、高周波数の熱波動を入力することで検査に要する時間が減少することを確認した。これにより、加熱方法を工夫し、より高周波数の熱波動成分を検査に利用することで、検査時間の一定程度の短時間化が図れることを明らかにした。一方で、特に高周波数の熱波動成分は、その減衰により検出が困難となり、理論的に予想される程度の検査時間短縮効果は得られない。より高周波数成分をより大エネルギー入力することができれば更なる検査時間の短縮も期待されるが、現実的には検査対象物の耐熱温度等の問題もあるため、本観点からの時間短縮には現実的な限界があると考えられる。現状の方法で最短の検査時間を実現するためには、検査対象物の熱物性、推定される欠陥深さ、および使用する加熱装置の出力の条件から、利用可能な (減衰後も検出可能な程度の) 最高周波数の熱波動を検討し、これを効果的に入力する必要があると推察される。

<引用文献>

- [1] Almond, D.P., Patel, P., Photothermal Science and Techniques, Chapman and Hall, London (1996).
- [2] Maldague, X., Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing, John Wiley & Sons, New York (2001).
- [3] Maldague X., Marinetti S., Pulse phase infrared thermography, J. appl. Phys, 79, 5 (1996), pp.2694-2698.
- [4] Ishikawa, M., Hatta, H., Habuka, Y., Fukui, R., Utsunomiya, S. (2013). Detecting deeper defects using pulse phase thermography. Infrared Phys. Technol., 57, 42-49 (2013).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 石川 真志, 小山 昌志, 笠野 英行
2. 発表標題 フーリエ変換による位相画像変換を利用したアクティブサーモグラフィ検査
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 平成30年度非破壊検査総合シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masashi Ishikawa, Masashi Koyama, Hideyuki Kasano, Hiroshi Hatta, Shin Utsunomiya
2. 発表標題 Reduced inspection time in active thermographic non-destructive testing of low-thermal-conductivity materials
3. 学会等名 14th Quantitative InfraRed Thermography Conference (QIRT 2018), (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石原 壮, 石川 真志, 小山 昌志, 笠野 英行, 八田 博志, 宇都宮 真, 西野 秀郎
2. 発表標題 アクティブサーモグラフィ検査における熱波動特性を利用した検査時間の短縮
3. 学会等名 日本設計工学会 四国支部 平成30年度 特別講演会・研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masashi Ishikawa, Masashi Koyama, Hideyuki Kasano, Ryo Fukui, Hiroshi Hatta, Shin Utsunomiya, Hideo Nishino
2. 発表標題 Reducing inspection time of active thermographic non-destructive testing based on thermal wave theory
3. 学会等名 The 3rd Asian Conference on Quantitative Infrared Thermography (QIRT-Asia 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石原 壮, 石川 真志, 西野 秀郎, 小山 昌志, 笠野 英行, 八田 博志, 宇都宮 真
2. 発表標題 高周波熱波動を利用したアクティブサーモグラフィ検査の検査時間短縮
3. 学会等名 日本機械学会 2019年度年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masashi Ishikawa, Soh Ishihara, Hideo Nishino, Masashi Koyama, Hideyuki Kasano, Hatta Hiroshi, Utsunomiya Shin
2. 発表標題 Relationship between inspection time and frequency components of input and reflected thermal waves in active thermographic non-destructive inspection
3. 学会等名 International Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications (AITA 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石原 壮, 石川 真志, 西野 秀郎, 小山 昌志, 笠野 英行
2. 発表標題 アクティブサーモグラフィ検査に要する時間と加熱方法との関係に関する熱波動の観点を踏まえた検討
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 2020年度 非破壊検査総合シンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	小山 昌志 (KOYAMA Masashi) (00453829)	明星大学・理工学部・准教授 (32685)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	笠野 英行 (KASANO Hideyuki) (20514417)	日本大学・工学部・准教授 (32665)	
研究分担者	八田 博志 (HATTA Hiroshi) (90095638)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・名誉教授 (82645)	
研究分担者	宇都宮 真 (UTSUNOMIYA Shin) (70450707)	国立天文台・JASMINEプロジェクト・研究支援員 (62616)	