

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04550

研究課題名（和文）超音波励起サーモグラフィ検査における定在波の影響の体系化とその抑制手法の検討

研究課題名（英文）Study on influence of standing waves on ultrasound-excited thermographic non-destructive inspection and its suppression method

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） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、超音波励起サーモグラフィ検査において観察される検査対象物内での定在波に起因する不要な発熱（定在波発熱）に注目し、その発生要因を波動伝搬の観点から調査するとともに、定在波発熱による悪影響を低減し欠陥検出能力を向上させる方法について検討を行った。その結果、定在波発熱は検査対象物中に発生するガイド波（平板形状の場合はA0モードラム波、円筒形状の場合はFモードガイド波）の伝搬によって生じる定在波に起因するものであることを明らかにした。また、異なる複数位置より超音波を励起して得られる複数枚の熱画像の加算平均することで、熱画像上の定在波発熱が低減され、欠陥の検出能力が向上することが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超音波励起サーモグラフィ検査は、他の非破壊検査技術での検査が困難な閉じたき裂やキッキングボンドなどの閉口欠陥の検出に有望であることが知られている。一方で、検査時に生じる定在波発熱により、検出すべき欠陥部発熱と定在波発熱との識別が困難となり得ることも確認されている。本研究では、定在波発熱の発生要因を波動伝搬の観点から明らかにし、その知見をもとに定在波発熱の低減手法に関する一案を提案した。これらの成果は、超音波励起サーモグラフィ検査の更なる検査能力向上に向けた検査手法・データ処理手法の最適化の上での基礎知見となると考えられ、閉口欠陥に対する将来的な高精度検査技術の確立に資する成果であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Undesired heat patterns observed via ultrasound-excited active thermography inspection, which can degrade defect detection capability of the method, was focused on in this study; their cause and techniques to suppress the heat pattern were studied. Experimental and numerical results showed that the undesired heat patterns were caused by propagation of guided waves in inspected objects (A0-mode Lamb waves and F-mode guided waves for plate- and cylindrical-shaped objects, respectively), and that the pattern could be suppressed by averaging multiple thermal images obtained by changing ultrasound-excited positions. The findings of this study should provide fundamental knowledge to improve the inspection capability of ultrasound-excited thermography method and for the future development of more effective nondestructive inspection techniques.

研究分野：非破壊検査、赤外線サーモグラフィ

キーワード：非破壊検査 赤外線サーモグラフィ 超音波 定在波 き裂

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超音波励起赤外線サーモグラフィ検査法は検査対象物内に励起した超音波によりき裂などの欠陥部を振動させ、これに伴い生じる摩擦熱を赤外線サーモグラフィにより検出する手法である。他の非破壊検査手法では検出が困難な閉じたき裂などの検査に有望である一方で、励起超音波の波長および検査対象物の形状によっては検査対象物内に定在波が発生し、定在波の腹となる位置で(たとえ欠陥が存在しない領域であっても)発熱が生じることが確認されている^[1,2]。このような定在波に伴う意図しない発熱(定在波発熱)の存在は、検出すべき欠陥に起因する発熱の識別を困難にするとともに、場合によっては定在波発熱を欠陥であると誤認する恐れもあり、検査精度の向上を目指す上での課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、超音波励起赤外線サーモグラフィ検査における定在波発熱への対策を検討する上での基礎知見を得ることを目的に、定在波発熱の発生要因を波動伝搬の観点から調査した。具体的には、平板形状および円筒形状の対象物に対する検査を想定し、検査時に対象物中を伝搬する超音波を詳細に調査し、定在波の原因となる超音波の伝搬モードを明らかにした。また、実検査における定在波発熱による悪影響の低減を目指し、観察される熱画像に対する画像処理(異なる超音波励起条件で得られた複数枚の熱画像による加算平均処理)の適用を検討し、その有効性(欠陥検出能力の向上効果)を評価した。

3. 研究の方法

(1) 定在波発熱の原因となる波動伝搬の調査

検査時に対象物中に生じる超音波の伝搬モードを実験および数値解析により調査した。実験の様子を図1に示す。試験片には短冊形状および円筒形状の亚克力試験片を使用した。短冊形状試験片は幅10 mm、長さ150 mmであり、厚さは2, 3, 5 mmの3種類を用意した。円筒形状試験片は外径12 mm、長さ150 mm、肉厚(外径と内径の差)は1, 2, 3 mmとした。各試験片の長さ方向中央位置に超音波加振機(W-2005-28, 日本ヒューチャア株)を設置し、28 kHzの超音波を3秒間励起するとともに、加振中の試験片表面温度を赤外線サーモグラフィ装置(A315, FLIR)により観察した。

実験と同時に、実験条件を模擬した有限要素解析も実施した。解析には汎用有限要素解析ソフトANSYS18.0を使用し、実験で使用した試験片と同形状の解析モデルを作成し、超音波加振時の試験片の振動の様子(モデル表面変位の時間変化)を計算した。本計算は試験片内を伝搬する波の主たる伝搬モードの調査を目的とするため、モデルには28 kHzの超音波振動ではなく、高帯域成分を有する単パルス状(時間幅1 μ s)の強制変位を荷重として定義し、荷重負荷後の表面変位の時間変化を計算した。得られた表面変位-時間変化データに対してMorlet関数をマザーウェーブレットとするウェーブレット解析を行い、試験片内を伝搬する超音波の伝搬モードを調査した。



図1 超音波励起サーモグラフィ検査による実験の様子

(2) 画像処理(加算平均処理)による定在波発熱の低減

定在波発熱の分布を低減し、本検査手法における欠陥検出能力を向上させる方法の一案として、複数の異なる位置より超音波を励起して得られた複数枚の熱画像による加算平均処理を試みた。実験の概要を図2に示す。平板形状の亚克力試験片(150×100×3 mm)の短辺に沿って9点の加振点を設け、各位置より超音波を励起した際の熱画像9枚を取得した(励起超音波の周波数は28 kHz、励起時間は3秒間とした)。本試験片には人工欠陥として、プラスチック球を高速で衝突させることにより導入したき裂が設けられている。定在波発熱の分布は超音波励起位置とともに変化するのに対して、き裂部での発熱位置は励起位置によらず一定であることから、加算平均処理を行うことでき裂発熱を保持しつつ、定在波発熱を低減させることが可能であると考えられる。本実験では得られた9枚の熱画像の加算平均処理を行い、その効果を検証した。

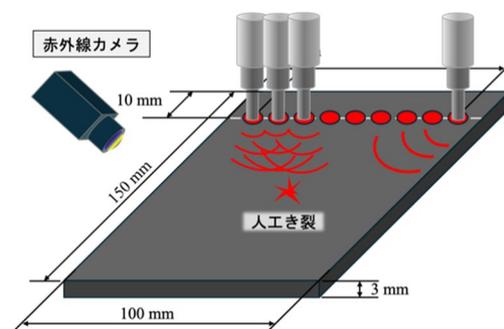


図2 画像加算平均処理の効果検証実験(異なる9点加振時の熱画像を観察)

4. 研究成果

(1) 定在波発熱の原因となる波動伝搬の調査

短冊形状試験片および円筒形上試験片に対する実験より得られた熱画像を図3および図4に示す。いずれの熱画像においても試験片表面に周期的な高温部が確認できるが、いずれの試験片もき裂などの欠陥部は有していないことから、これらの高温部は定在波の発生に伴って生じた定在波発熱であると考えられる。短冊形状試験片の結果(図3)では、試験片の板厚の増加に伴って発熱位置間の間隔が広がっている様子が確認できる。また、円筒形状試験片の結果(図4)においても、肉厚の変化に伴って発熱分布が変化している。図5および図6は、各形状の試験片について、熱画像より得られた発熱間隔と板厚もしくは肉厚との関係を整理した結果である(発熱間隔は各発熱位置における温度最大値位置間距離の平均値とした)。これらの結果からも、短冊形状試験片では発熱間隔が板厚とともに増加していることが確認できるとともに、円筒形状試験片では肉厚に伴う単純な比例関係にならないことがわかる。

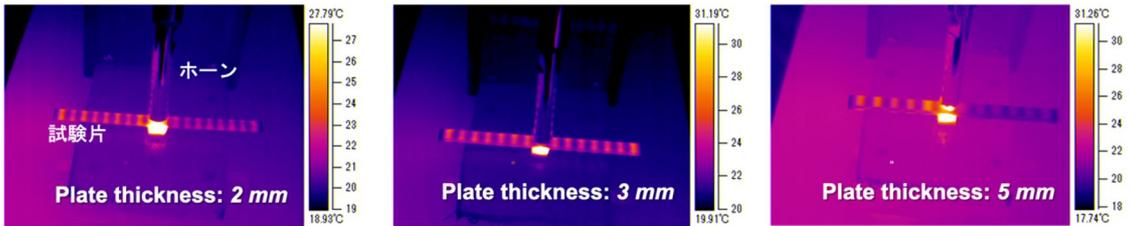


図3 短冊形状アクリル試験片に対する実験により得られた熱画像

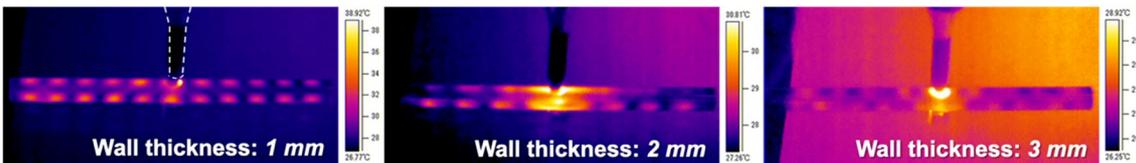


図4 円筒形状アクリル試験片に対する実験により得られた熱画像

図7は板厚 2 mm の短冊形状試験片への実験を模擬した有限要素解析より得られた試験片表面変位の時間変化である。大きな信号が4つ確認できるが、これは試験片両端間での多重反射信号を繰り返し取得したものである。各モデルについてこのような表面変位の時間変化を取得し、それらに対してウェーブレット解析を行った結果を図8および図9に示す。ここで、短冊形状についての結果(図8)中の実線はアクリル中を伝搬する波の音速および周波数から理論的に計算される A_0 モードラム波^[3]の理論到達時間を、円筒形状についての結果(図9)中の実線は同様に計算された円筒を伝搬する F モードガイド波^[4, 5]の理論到達時間を示している(Fモードについては、異なる複数のモード(F(1, 1), F(2, 1), および F(3, 1))を示している)。これらの結果より、試験片中を伝搬する超音波の主たる伝搬モードは、短冊形状試験片では A_0 モードラム波、円筒形状試験片では F モードガイド波であることがわかる。これらの波の理論伝搬速度より、各伝搬モードの波が試験片中を往復伝搬した結果発生する定在波の波長を計算し、板厚もしくは肉厚との関係として整理した結果を図5および図6中に示し、実験にて観察された発熱間隔と比較する。短冊形状試験片(図5)では、観察された発熱間隔とラム波の伝搬の結果生じる定在波の理論波長が非常によく一致していることがわかる。一方で円筒形状試験片(図6)では、肉厚 1 mm の条件で観察された発熱間隔は F(2, 1)モードガイド波の理論波長に近い値を示しているのに対し、肉厚 3 mm の条件では F(1, 1)モードに一致している。肉厚 2 mm 条件では F(1, 1),

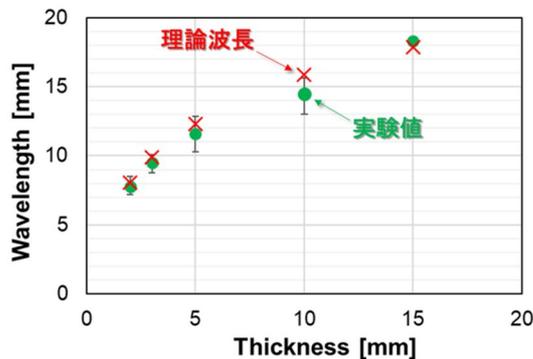


図5 短冊形状試験片に対する実験より得られた発熱間隔と板厚との関係(緑)およびラム波 A_0 モードの伝搬により生じる定在波波長の理論値と板厚との関係(赤)

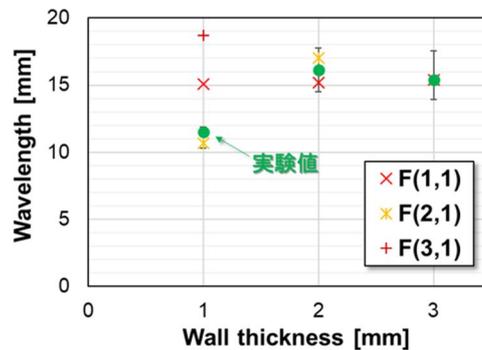


図6 円筒形状試験片に対する実験より得られた発熱間隔と肉厚との関係(緑)およびFモードガイド波の伝搬により生じる定在波波長の理論値と肉厚との関係(赤、橙)

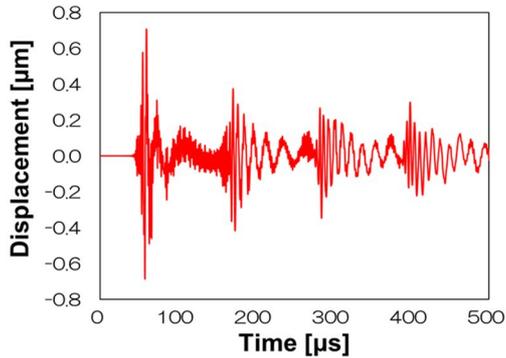


図7 有限要素解析より得られた短冊形状試験片表面における変位の時間変化

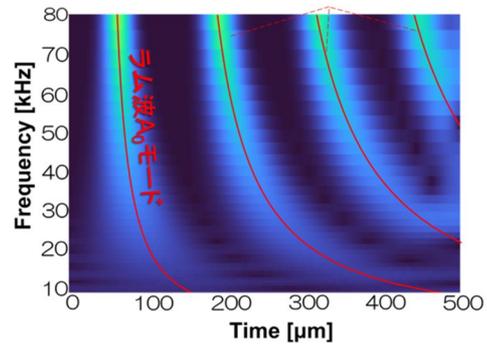


図8 図7の変位結果に対するウェーブレット解析の結果(実線はA₀モードラム波の理論到達時間を示す)

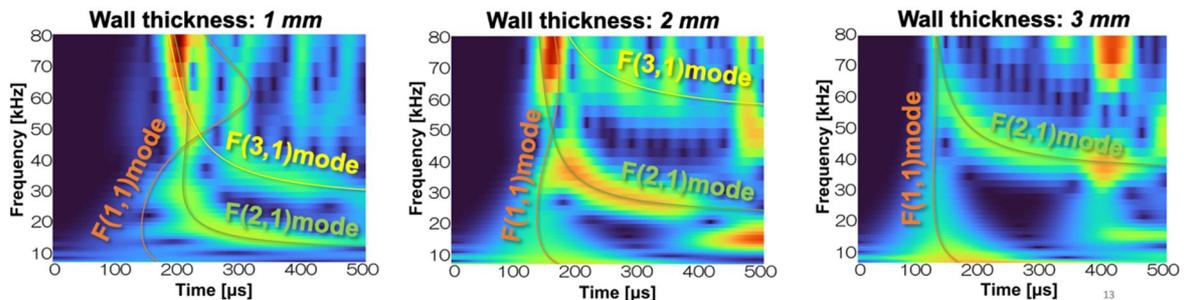


図9 円筒形状アクリル試験片に対する有限要素解析結果(表面変位の時間変化)に対するウェーブレット解析の結果(実線はFモードガイド波の理論到達時間を示す)

F(2,1)の両方の理論値に近い結果となっている。これより、円筒形状試験片では肉厚によって伝搬する超音波の主たる伝搬モードが変化し、これに伴って定在波発熱の分布も変化していると考えられる。

(2) 画像処理(加算平均処理)による定在波発熱の低減

異なる9点の励起位置を加振した際に得られた各熱画像を図10に示す(各図上部の数値 L は試験片左端から励起位置までの距離を示す)。いずれの画像においても、試験片の中央付近にき裂部での摩擦発熱により生じた温度変化が確認できる。その一方で、励起位置の変化に伴い定在波発熱の分布が変化している様子も確認できる。各図中には、画像より得られたき裂部についての信号対雑音比(Signal-to-noise ratio: S/N)を、同 S/N の計算において分母(ノイズ値 N)として用いた健全部における温度値の標準偏差 σ_s とともに示している(なお、分子 S の値はき裂部での温度最大値と健全部での温度平均値との差とした)。 S/N の値は励起位置(励起位置とき裂位置との関係)によって変化するが、その平均値は12.1であった。図11には図10の9枚の熱画像を加算平均処理した結果、および同結果よりき裂部での S/N を計算した結果を示す。処理後画像における S/N は20.1であり、処理前画像の平均値よりも高い値を示していた。注目すべき点として、処理後画像における健全部の標準偏差 σ_s は0.08と顕著に低下しており、これによりき裂部の S/N が向上したものであると考えることができる。このことは提案手法が定在発熱の低減に特に有効であったことを示している。これらのことより、異なる複数の位置を励起するとともに、それらの画像に対する加算平均処理を行う本手法は、定在波分布の抑制と欠陥部の検出能力向上に有効であることが確認できる。

(3) 研究成果のまとめ

本研究では、超音波励起サーモグラフィ検査において欠陥検出の障害となり得る定在波発熱への対策法の提案を目標に、まずその基礎知見を得ることを目的として、検査時に対象物内を伝搬する超音波の詳細検討から定在波発熱の発生原因となる超音波の伝搬モードについての調査を行った。また、定在波発熱分布を低減させる方法の一案として、複数位置を励起して得られた複数枚の熱画像による加算平均処理を試み、その効果を実験的に検証した。実験および有限要素解析の結果、検査時に検査対象物内を伝搬する超音波の主たる伝搬モードは、対象物形状が平板形状の場合はラム波のA₀モード、円筒形上の場合はFモードガイド波であり、これらの伝搬に伴って生じる定在波によって定在波発熱が発生していることが明らかになった。このことは、励起する超音波の周波数、および検査対象物の形状によって定在波発熱の分布が変化することを示している。本研究で得られたこれらの知見は、検査時に発生する定在波発熱の分布、発熱間隔の予想を可能にし、欠陥部発熱/定在波発熱の識別を行う上での有用な基礎知見となるものと考えられる。また、加算平均処理による定在波発熱の低減効果を実験的に検証した結果、 S/N

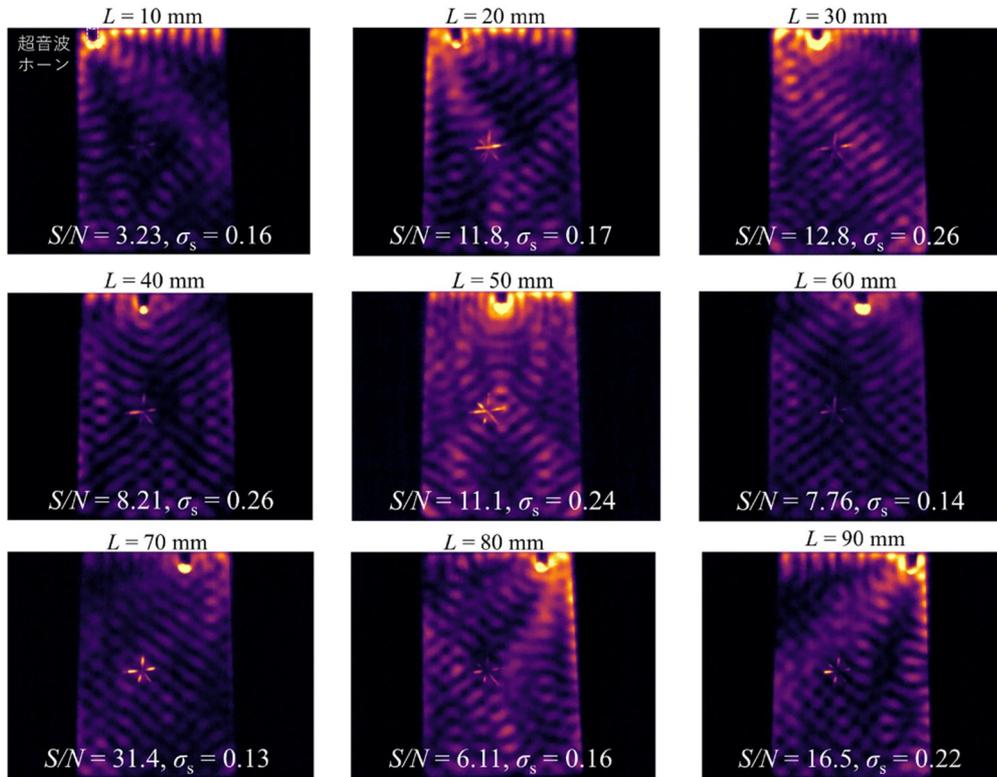


図 10 異なる各 9 点より超音波を励起した際に観察された各熱画像 (各画像にはき裂部における信号対雑音比 S/N および健全部における温度値の標準偏差 σ_s を示す)

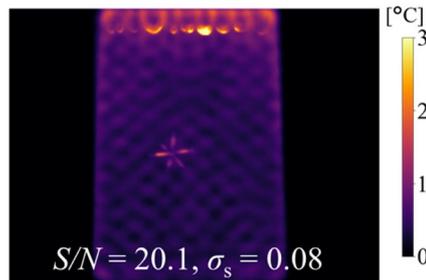


図 11 図 10 の 9 枚の熱画像を加算平均処理した結果

の向上と、特に健全部での定在波発熱の分布が大きく低減する結果が得られた。これらの結果は、本手法が定在波発熱を低減させ、欠陥部の検出能力を向上させるための手段の一つとして有効であることを示している。

<参考文献>

- [1] Dillenz A, Zweschper T, Riegert G, Busse G. Progress in phase angle thermography. Rev Sci Instrum, 2003;74(1):417–419.
- [2] Zweschper T, Riegert G, Dillenz A, Busse G. Frequency-modulated elastic wave thermography. In: Proc. SPIE 5073, Thermosense XXV 2003.
- [3] Rogers WP. Elastic property measurement using Rayleigh-Lamb waves. Res Nondestruct Eval, 1995;6(4):185–208.
- [4] Rogers WP. Elastic property measurement using Rayleigh-Lamb waves. Res Nondestruct Eval, 1995;6(4):185–208.
- [5] Nishino H, Uchida F, Takashina S, Takemoto M, Ono K. A new method of AE source location in pipes using cylindrical guided waves. J Acoust Emiss, 2000;18:102–110.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 石川 真志, 西野 秀郎, 小山 昌志, 福井 涼	4. 巻 35
2. 論文標題 超音波励起サーモグラフィ法による非破壊検査	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 超音波TECHNO	6. 最初と最後の頁 61-65
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Ryoto Maeda, Masashi Ishikawa, Hideo Nishino, Masashi Koyama, Ryo Fukui, Yoshio Habuka and Yutaka Nishitani
2. 発表標題 Investigation of heat generation caused by standing waves in ultrasound-excited active thermography nondestructive inspection
3. 学会等名 JSME International Conference on Materials and Processing 2022 (ICM&P 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋 颯, 石川 真志, 西野 秀郎, 小山 昌志, 福井 涼, 羽深 嘉郎, 西谷 豊
2. 発表標題 超音波励起サーモグラフィ法による閉口欠陥検出と定在波発熱の抑制手法の検討
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 2022年度秋季講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石川 真志, 前田 峻斗, 西野 秀郎, 小山 昌志, 福井 涼, 羽深 嘉郎, 西谷 豊
2. 発表標題 超音波励起サーモグラフィ検査における定在波の発生とその欠陥検出への影響
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 赤外線サーモグラフィ部門ミニシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前田 峻斗, 玉木 智大, 石川 真志, 西野 秀郎, 福井 涼, 羽深 嘉郎, 西谷 豊
2. 発表標題 超音波励起サーモグラフィ検査による欠陥検出における定在波の発生とその影響について
3. 学会等名 日本設計工学会 四国支部2021年度研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 So Takahashi, Masashi Ishikawa, Hideo Nishino, Masashi Koyama and Ryo Fukui
2. 発表標題 An examination of a method to reduce the effect of standing-wave heat generation in ultrasound-excited thermography inspection
3. 学会等名 The 17th International Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications (AITA 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石川 真志, 高橋 颯, 西野 秀郎, 小山 昌志, 福井 涼
2. 発表標題 超音波励起サーモグラフィ検査時に見られる定在波発熱分布についての考察
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 2023年度秋季講演大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋 颯, 石川 真志, 西野 秀郎
2. 発表標題 超音波励起サーモグラフィ法による亀裂検出と高精度化に向けた定在波抑制手法の検討
3. 学会等名 日本設計工学会四国支部 令和4年度研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 石川 真志, 高橋 颯, 西野 秀郎, 小山 昌志, 福井 涼
2. 発表標題 超音波励起サーモグラフィ法における定在波発熱の低減に向けた多点加振装置の試作
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 2024年度非破壊検査総合シンポジウム
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 超音波励起サーモグラフィ非破壊検査における定在波起因の発熱低減方法、そのシステム及びそのプログラム	発明者 福井涼, 石川真志, 西野秀郎	権利者 株式会社KJTD, 徳島大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-112835	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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)	
研究分担者	西野 秀郎 (NISHINO Hideo) (50316890)	徳島大学・大学院社会産業理工学研究部(理工学域)・教授 (16101)	

	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
研究協力者	福井 涼 (FUKUI Ryo)	株式会社K J T D	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------