

令和 元年 6 月 22 日現在

機関番号：24201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05983

研究課題名（和文）Sonic-IR法を応用した閉口欠陥の高精度高能率非破壊検出に関する基礎的検討

研究課題名（英文）Fundamental study on high accuracy and high efficiency nondestructive detection of closed defect by Sonic-IR method

研究代表者

田邊 裕貴（Tanabe, Hirotaka）

滋賀県立大学・工学部・教授

研究者番号：00275174

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000 円

研究成果の概要（和文）：Sonic-IR法は、被検体を超音波加振した際に欠陥界面で生じる摩擦熱を赤外線カメラで検知して、欠陥を検出手法である。本研究では、種々の条件で試験片を超音波加振した際の試験片における振動分布、欠陥部の振動加速度、ならびに欠陥部での発熱挙動を調べ、欠陥部での発熱メカニズムを考察した。その結果、欠陥部での発熱に影響を及ぼす主要な振動モードを特定し、効率よく欠陥部で発熱を生じさせるための試験片の加振方法に関する知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の非破壊検査法には閉口欠陥の検出を苦手とするものが多い。機械、構造物、社会インフラのより高いレベルでの品質管理や維持保全を可能とするためには、検査対象中の閉口欠陥の検出漏れを可能な限り低減することが必要である。本研究で得られた、閉口欠陥で効率よく発熱を生じさせるためのSonic-IR法に関する知見は、非破壊検査の信頼性向上と高能率化に貢献するものであり、今後、学術的にも社会的にも大きな意義を持つと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Sonic-IR is a non-destructive testing method for finding defects by detecting frictional heat generation at the defects caused by ultrasonic waves with an infrared camera. In this study, Sonic-IR tests under various excitation conditions were carried out, and the vibration modes of the specimen, the acceleration of vibration and the temperature rise at the defect were investigated, and the detailed heat generation mechanisms were discussed. As a result, the main vibration modes that affected the heat generation at the defect have been identified, and some knowledge about the excitation method of the specimen to enhance the heat generation at the defect area efficiently.

研究分野：材料強度学

キーワード：非破壊検査 超音波 赤外線 閉口欠陥 固有振動 摩擦発熱

様 式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19（共通）

1．研究開始当初の背景

一般に、従来の非破壊検査技術は、閉口欠陥の検出を苦手とするものが多い．検査対象中の閉口欠陥の検出漏れを可能な限り少なくし、さらに、欠陥の成長過程におけるより早い段階での検出を可能とするためには、閉口欠陥を高精度で、簡便かつ効率的に検出可能な手法が必要である．このような背景の下、研究代表者らが着目したのが「Sonic-IR 法」である．Sonic-IR 法は、検査対象物を超音波加振した際に欠陥界面で生じる摩擦発熱を赤外線カメラで検知して、欠陥を検出する手法であり、摩擦発熱の生じやすい閉口欠陥の検出をむしろ得意とする点が特徴である．この Sonic-IR 法に関するこれまでの研究成果から、欠陥部での発熱には、検査対象物の固有振動が大きく影響を及ぼしていると考えられたことから、検査対象物に inputs する超音波の周波数をスイープして、発熱量が大きくなると予想される固有振動の腹を検査対象中で移動させれば、検査対象物中の閉口欠陥を高精度、高能率で非破壊的に検出できる可能性があると考えられた．

2．研究の目的

本研究課題では、検査対象物に inputs する超音波の周波数をスイープして、固有振動の腹の位置を変化させ、大型の検査対象物中の閉口欠陥を高精度、高能率で非破壊的に検出可能な Sonic-IR 法の新手法を開発することを全体構想の最終目標とした．研究期間内には、そのための基礎研究として、加振条件として加振振幅や加振位置などを変化させた際の試験片の振動状態とき裂周辺での温度変化を測定して、Sonic-IR 法における摩擦発熱挙動を把握すること、またその結果をもとに上記新手法の基本構想を立案することを目的とした．

3．研究の方法

(1) 実験 1：Sonic-IR 法における欠陥部での摩擦発熱挙動の把握

欠陥部での摩擦発熱と検査対象の振動状態との関係を調べるために、まず、欠陥位置と欠陥部での摩擦発熱との関係を調べることにした．そのためには、異なる場所に形状や界面の接触状態が同じ欠陥（例えばき裂ではき裂長さ、き裂開口幅、き裂界面の粗さ、残留応力などが同じ）を複数導入し、場所による摩擦発熱の違いを調べる必要がある．しかし、同じ形状、接触状態の欠陥を複数作製することは極めて困難である．そこで本研究では、半球を試験片に対して一定の力で押付けた際の接触部を擬似的な欠陥とし、この疑似欠陥における発熱を調べた．

図 1 に実験の概要を示す．試験片の供試材は SUS304 鋼とした．試験片の寸法は板厚 10mm、板幅 25mm、長さ 500mm とした．接触子として用いた半球の供試材もステンレス鋼で、直径は 6mm とした．図 1 のように試験片の両端 10mm を万力により 1kN の力で固定し、試験片左端から 40mm の位置を超音波加振した．加振には超音波溶着機（超音波工業社 UPW1521G6）を用いた．加振周波数は 21kHz、加振時間は 1.325 秒、ホーンの押付け力は 100N とした．超音波ホーンには、本体の直径が 20mm で、接触部の直径が約 3mm の円柱型ホーンを使用した．

図 2 に試験片に対する半球の押付け方法の概略を示す．図のように、クランプを用いて半球を試験片に押付けた．押付け力は、クランプに貼り付けたひずみゲージで管理し、100N で一定とした．超音波加振中、図 2 に示した計測領域の温度変化を、温度分解能 0.025℃ の赤外線サーモグラフィ（Indigo Systems（現 FLIR Systems）、Phoenix）を用いて、撮影速度 113Hz で連続的に計測した．計測は、半球を試験片長手方向に 5mm 間隔で移動させ、各位置で行った．温度測定面には、赤外線放射率の向上と均一化のために擬似黒体化塗料（株式会社アサヒペン製、耐熱塗料（黒））を塗布した．

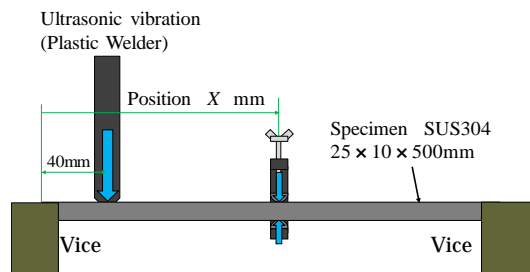


図 1 実験の概要

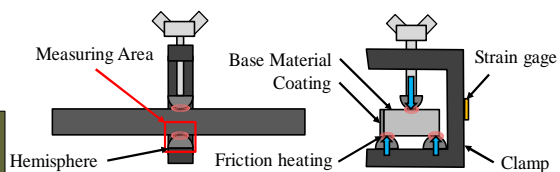


図 2 試験片に対する半球の押付け方法

(2) 実験 2：Sonic-IR 法における疲労き裂部での摩擦発熱挙動の把握

実欠陥として疲労き裂を対象とし、超音波加振時の疲労き裂周辺での発熱挙動を調べた．供試材には、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 鋼を使用した．試験片の形状および寸法を図 3 に示す．試験片の寸法は長さ 125mm、幅 25mm、厚さ 10mm で、試験片長手方向の中央部片側には、長さ 2mm、先端半径 100μm の切欠きをワイヤ放電加工により導入した．

本試験片に対して四点曲げ疲労試験を実施し、図 4 に示すように、長さ 2.7mm（スリット長と合わせて 4.7mm）の疲労き裂（片側貫通き裂）を導入した．四点曲げ疲労試験は、油圧サーボ式疲労試験機（株式会社島津製作所製、EHF-EB10-20L）を用いて行った．四点曲げ疲労試験における荷

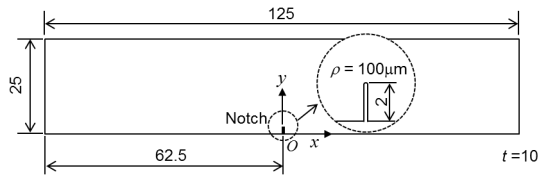


図3 試験片の形状および寸法



図4 予き裂と疲労き裂

重点間距離は 40mm，支持点間距離は 80mm とした．疲労試験条件は，最大荷重 20kN，応力比 0.1，試験速度 20Hz とした．試験に用いた超音波加振機，赤外線サーモグラフィは，実験 1 と同じであり，試験片表面にも実験 1 と同様，疑似黒体化塗料を塗布した．

図 5 は，試験片に対して超音波加振を行った際のき裂周辺部における発熱を赤外線サーモグラフィにより撮影した結果の一例である．図中の矢印で示した白色の部分，超音波加振によりき裂部で生じた摩擦発熱による温度上昇部である．超音波加振時の試験片の振動状態の測定には，渦電流式変位センサ（株式会社電子応用製，PU-03A）を使用した．

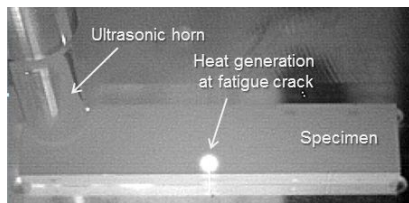


図5 き裂周辺での摩擦発熱の様子



図6 半球と試験片との接触部における摩擦発熱

4．研究成果

(1) 実験 1：Sonic-IR 法における欠陥部での摩擦発熱挙動の把握

半球と試験片との接触部における摩擦発熱の測定結果の例として，半球の位置 $X=320\text{mm}$ ， 340mm および 375mm での最高温度時の赤外線画像を図 6 に示す．なお，図 6 の $X=375\text{mm}$ の結果については，発熱が小さかったため，発熱後の温度分布から発熱前の温度分布を引いた差分画像を示した．図より，接触部で発熱が生じ，その発熱は接触位置によって変化することが確認できる．本実験では，図 6 のように接触点付近の試験片側における $1\text{mm}\times 1\text{mm}$ の領域の温度上昇量の空間平均値を接触点の温度上昇量 ΔT_{max} として定義し，各位置での発熱挙動を比較した．

欠陥の位置と温度上昇量の関係を図 7 に示す．縦軸は接触点の温度上昇量 ΔT_{max} であり，横軸は試験片左端から接触点までの距離 X である．図より欠陥位置と温度上昇量の関係には主に 4 つのピークが存在していることがわかる．また，この 4 つのピークは $X=80\text{mm}$ ， 205mm ， 320mm および 440mm の位置に現われたが，これらのピーク位置は，有限要素解析により得られた固有振動（4 次の縦振動）の腹の位置とよく一致していた．すなわち，欠陥部での摩擦発熱は，欠陥が検査対象の固有振動の腹の位置のとき大きく，節の位置のとき小さくなっており，欠陥部での摩擦発熱に固有振動が強く関わっている．このことから，Sonic-IR 法による欠陥検出の高精度化，高能率化を図るには，検査対象物の固有振動を積極的に活用することが有効であることが確認できた．

(2) 実験 2：Sonic-IR 法における疲労き裂周辺での摩擦発熱挙動の把握

まず，超音波加振した際の試験片の振動状態を把握するために，変位センサによる振動計測を実施した．その結果，加振周波数である 21kHz と，その第 2 高調波である 42kHz ，第 3 高調波で

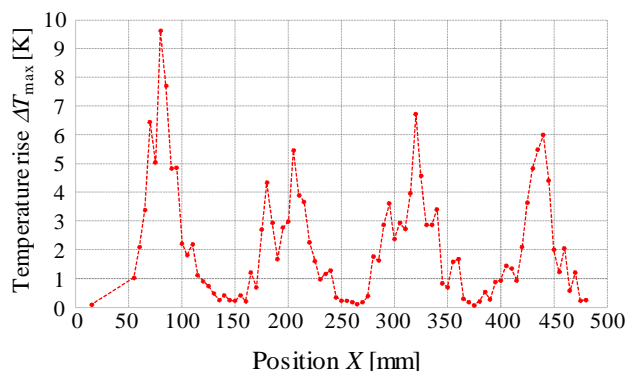


図7 欠陥の位置と温度上昇量の関係

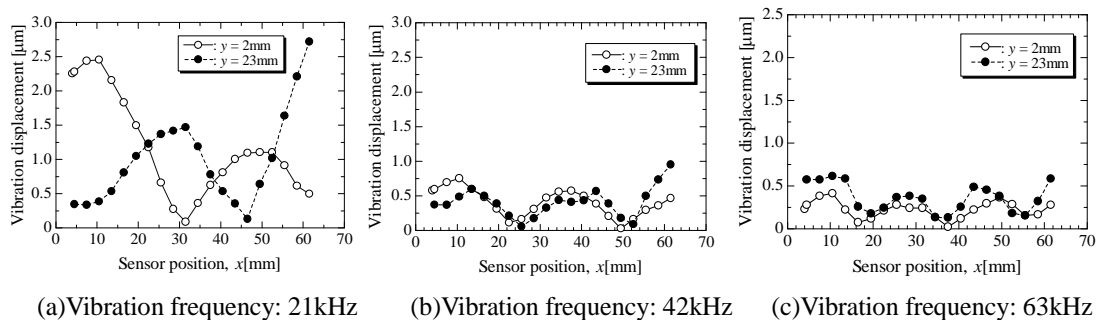


図8 振動変位分布の計測結果

ある 63kHz の振動が認められた。つぎに、振動計測で確認された 21kHz, 42kHz および 63kHz の各振動の振動モードを調べるために、試験片における振動分布を計測した。振動分布の計測は、試験片の切欠きの開口端を原点とし、試験片長手方向に x 軸、幅方向に y 軸をとった座標系で、加振位置を $x = -59.5\text{mm}$, $y = 20\text{mm}$ で一定とし、試験片端から 2mm の $y = 2\text{mm}$ および 23mm の線上で、変位センサを x 軸方向（試験片長手方向）に移動させて実施した。振動変位の計測方向は板厚方向とした。

図8は試験片の板厚方向の振動変位の分布を測定した結果である。図8(a), (b), (c)は、それぞれ振動数が 21kHz, 42kHz および 63kHz での結果を表している。これらの振動の固有振動モードを確認するために、有限要素法による固有振動モード解析を行ったところ、図8(a), (b), (c)の振動変位は、それぞれ2次のねじり振動、4次のねじり振動および6次のねじり振動によるものであることがわかった。

つぎに、加振位置を変化させて、その際のき裂部周辺の温度を赤外線サーモグラフィで計測し、き裂部での発熱に及ぼす加振位置の影響について調べた。加振位置の y 座標は 20mm で一定とし、 x 座標は試験片のほぼ全長にわたって 3mm 間隔で変化させた。き裂部の温度上昇量 $\Delta T[\text{K}]$ は、き裂部の発熱中心を図心とする $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ の正方形領域における加振前後の平均温度の差として評価した。図9は、き裂部での温度上昇量と加振位置の関係を示した図である。図9より、加振位置の変化とともに温度変化量は増減を繰り返すことがわかる。また、温度変化量には試験片の両端部を除いて6つのピークが認められ、これらのピークの中には 20K 以上の温度変化量が計測されたものもあった。このように、加振位置によって温度変化量は大きく変化するため、Sonic-IR 検査において加振位置は欠陥検出性を左右する重要な条件の一つであると言える。

つぎに、き裂部での発熱と試験片の振動モードとの関係について考察した。図10は、振動変位量が図9の温度変化量と同様に6つのピーク（試験片半長に3つのピーク）を示した図8(c)の6次のねじり振動との対応を調べた結果である。図10では、図8(c)のき裂側の $y = 2\text{mm}$ での振動変位量と、図9の結果とをあわせて図示した。図10より、温度変化量のピークとボトム的位置は、試験片の6次のねじり振動の腹と節の位置にそれぞれよく対応していることがわかる。一般に、ある振動モードの腹の位置を加振すると、その振動モードが強く励起されることが知られている。本研究の条件下では、6次のねじり振動の腹の位置を加振した際に大きな温度変化が生じていることから、6次のねじり振動がき裂部での発熱に大きく影響を及ぼしたことがわかる。

ところで、先述のとおり、本実験の条件下では、試験片に2次のねじり振動、4次のねじり振動および6次のねじり振動が生じていた。この3つの振動のうち、なぜ2次や4次のねじり振動ではなく6次のねじり振動がき裂部での発熱に影響を及ぼしたのかについて考察するために、き裂近傍での振動計測を行った。ここで振動変位量が大きい場合でも、相対するき裂面が同位相で振動していた場合には相対変位量は小さくなる。そこで、き裂の両側に1個ずつ変位センサを設置して、き裂をはさむ両側の振動を計測し、これらの差である相対変位量の時系列データにFFT処理を行った。その結果、相対変位量にも、21kHz, 42kHz および 63kHz のピークが存在し、そ

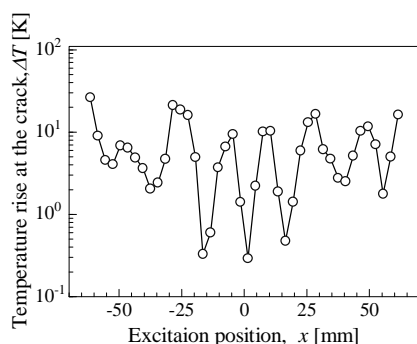


図9 温度上昇量と加振位置の関係

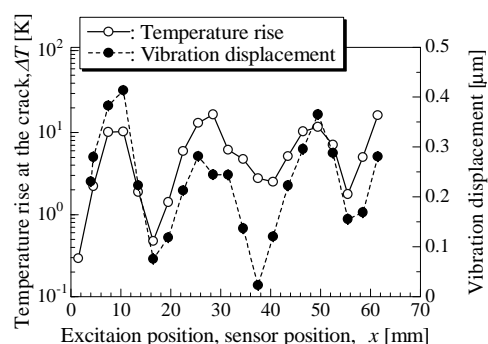


図10 温度上昇量と振動変位との関係

の大きさは 21kHz が $2.13\mu\text{m}$, 42kHz が $0.98\mu\text{m}$, 63kHz が $1.53\mu\text{m}$ であった . ここで , 振幅 A , 振動数 f で振動する質量 m の物体の振動エネルギー E は $E = 2\pi m f^2 A^2$ で表され 質量が同一の場合 , 振動エネルギーは , $f^2 A^2$ に比例する . そこで , 振動エネルギーに対応するパラメータ $E' = f^2 A^2$ を定義し , 21kHz , 42kHz および 63kHz の各ピークでの E' を求めた . その結果が表 1 である . E' の値は , 63kHz が最大で , 振動変位量が最大の 21kHz の E' の約 4.6 倍であった . 以上より , き裂部での発熱に 6 次のねじり振動が強く影響を及ぼしたのは , 振動エネルギーが 2 次や 4 次のねじり振動に比べて大きいためであることがわかった .

表 1 振動エネルギー

Frequency, f [$\times 10^3$ Hz]	21	42	63
Vibration amplitude, A [$\times 10^{-6}$ m] (= Relative displacement [$\times 10^{-6}$ m])	2.13	0.98	1.53
Parameter of vibration energy, $E' = f^2 A^2$ [$\times 10^3$ J]	2.00	1.69	9.29

さらに , 図 3 の x 軸方向にき裂位置を変化させた別の試験片を複数用意して同様の検討を行った結果 , き裂がない場合に固有振動の節となる位置をき裂位置とした場合に , き裂周辺での摩擦発熱が大きくなる可能性があることがわかった . 実験 1 の結果でも得られたように , 当初は , 固有振動の腹の位置に欠陥が存在する場合に欠陥部での摩擦発熱が大きくなると考えていたが , 実験 2 のようなき裂では , き裂がない場合に固有振動の節となる位置の方が欠陥検出性が高くなる可能性がある . これは , 固有振動の腹の位置にき裂が導入されても , き裂の両側が同相で振動するためにき裂面の相対変位は小さく , 逆に固有振動の節の位置にき裂が導入された場合には , き裂の両側が逆相で振動するためにき裂面の相対変位が大きくなることに起因すると考えられた .

(3) 閉口欠陥を高精度 , 高能率で非破壊的に検出するための検査法について

(1) , (2) において得られた結果をもとに , 閉口欠陥を高精度 , 高能率で非破壊的に検出するための検査法の基本構想について考察した .

まず , Sonic-IR 法における摩擦発熱は , 主に検査対象の固有振動によって発生するため , 検査の精度 , 効率を向上させるためには , その加振周波数で検査対象に生じる固有振動の腹の位置を加振することが重要である .

また , き裂が生じやすい位置 (例えば応力集中部など) があらかじめわかっている検査対象では , その位置が振動の節となる固有振動を発生させることが有効となる可能性がある .

現状では , Sonic-IR 法で求められる加振出力を有し , 加振周波数を無段階で変化させることが可能な超音波加振機がないため , 離散的にいくつかの加振周波数で検査を行うしかない状況であるが , 周波数のスイープが可能となれば , 検査対象内で振動の節腹の位置を走査することによって , 高精度で高能率の閉口欠陥検出が可能になる可能性が示唆された .

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

馬場猛 , 田邊裕貴 , 和泉遊以 , 大型構造物に対する非破壊検査への Sonic-IR 法の応用のための基礎的検討 , 溶接学会全国大会講演概要 , 査読無 , pp.352-353 , 2018

Hiroataka Tanabe, Yui Izumi, Naoto Mizuyama , Study on Ultrasonic Excitation Method to Improve Detectability of Sonic-IR Testing , The Proceedings of the 6th Japan-US NDT Symposium Emerging NDE Capabilities for a Safer World , 査読無 , 2018

水山直人 , 和泉遊以 , 田邊裕貴 , Sonic-IR 法における検査対象の振動状態と欠陥検出性について , 日本材料学会第 67 期通常総会・学術講演会講演論文集 , 査読無 , pp.67-68 , 2018

水山直人 , 和泉遊以 , 田邊裕貴 , 高松徹 , 阪上隆英 , Sonic-IR 法による欠陥部の摩擦発熱と検査対象の振動状態の関係 , M&M2016 材料力学カンファレンス講演論文集 , 査読無 , Vol.16-3 , pp.253-255 , 2016

〔学会発表〕(計 4 件)

馬場猛 , 田邊裕貴 , 和泉遊以 , 大型構造物に対する非破壊検査への Sonic-IR 法の応用のための基礎的検討 , 溶接学会全国大会 , 2018

Hiroataka Tanabe, Yui Izumi, Naoto Mizuyama , Study on Ultrasonic Excitation Method to Improve Detectability of Sonic-IR Testing , The 6th Japan - US Symposium Emerging NDE Capabilities for a Safer World , 2018

水山直人 , 和泉遊以 , 田邊裕貴 , Sonic-IR 法における検査対象の振動状態と欠陥検出性について , 日本材料学会第 67 期通常総会・学術講演会 , pp.67-68 , 2018 年

水山直人，和泉遊以，田邊裕貴，高松徹，阪上隆英，Sonic-IR 法による欠陥部の摩擦発熱と検査対象の振動状態の関係，M&M2016 材料力学カンファレンス，2016 年

〔その他〕

ホームページ等

http://db.spins.usp.ac.jp/html/163_ja.html

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。