

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04329

研究課題名(和文)2次元フェーズドアレイ探触子による高精度非破壊評価と鋼床版リブ交差部への適用

研究課題名(英文) Nondestructive evaluation of intersection of longitudinal and lateral ribs of orthotropic deck

研究代表者

白旗 弘実 (Shirahata, Hiromi)

東京都市大学・建築都市デザイン学部・教授

研究者番号：40298013

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：当研究は鋼床版縦リブ横リブ交差部に発生する疲労き裂をマトリクスフェーズドアレイ超音波探傷により検出し、精度よく寸法を評価することを目的としている。検討では第一に、現況のフェーズドアレイ超音波探傷器での使用ができるマトリクスフェーズドアレイの素子配列を検討した。第二には、防食のために鋼構造物に施される塗装の塗膜厚の超音波探傷に対する影響を調べた。一般的に考えられる塗膜厚さ300μm程度では、感度に対する影響がそれほどないことが確認された。第三には、上向き探傷可能なスキャナを開発した。第四には、マトリクスフェーズドアレイ探傷波形を用いた開口合成法による欠陥再構成法を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

マトリクスフェーズドアレイ探傷はフェーズドアレイ探傷の中でも素子を2次元に並べたものであり、コンセプトは知られていたが、実際の適用は1次元配置のリアフェーズドアレイほど普及していない。本研究ではマトリクスフェーズドアレイの現場での適用を目指す点で意義があるものと思われる。探傷器で励振できる素子数も制限が多い。探傷条件の設定に関して1次元から2次元配列と次元が増えるので、操作、設定が非常に難しくなる。収録する波形データ量も増加するので処理が複雑となる。本研究ではマトリクスフェーズドアレイの設定システムの開発、画像化システムを開発しており、今後の普及において役割を果たせたものと考えている。

研究成果の概要(英文)：Fatigue cracking of welded joints in the orthotropic steel deck system is one of the most serious problems. This study focuses on rib to deck weld of the deck system. The objective of this study is to apply matrix phased array ultrasonic test. This study consists of four items. First, suitable conditions of matrix phased array transducer was investigated. The results of numerical simulation of wave field showed that 8 by 8 element of 1.0 mm square or 0.6 mm square size and frequency of 5MHz are applicable. Second, the influence of paint coat on the ultrasonic test was investigated. The paint coat did not affect the sensitivity of the ultrasonic by the results of experiments. Third, a scanner was developed for the overhead position. Usually, the inspection should be done by the overhead position in a closed box girder or plate girder. Fourth, the image reconstruction system by the synthetic aperture focusing technique (SAFT) was developed for the matrix phased array system.

研究分野：構造工学，維持管理工学

キーワード：鋼床版 疲労き裂 超音波探傷 フェーズドアレイ探傷 マトリクスフェーズドアレイ探触子

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

社会資本の老朽化が問題となっているが、ここでは鋼道路橋を対象とする。鋼橋においては、経年劣化対策が重要であるが、疲労対策を対象とする。鋼橋の疲労損傷の中でも鋼床版の疲労き裂対策は非常に重要な課題の一つである。道路橋において、舗装の直下には床版と呼ばれる輪荷重を橋梁構造へ伝達する板状の構造物が存在する。床版はRCおよび鋼製のものがあるが、鋼床版は死荷重を軽減できることから空間的な制限の大きい都市内高架橋や長大橋でも多くみられる構造である。

鋼床版構造では、デッキプレートと呼ばれる板に、補剛部材が橋軸および橋軸直角方向に溶接された構造となっている。しかしほぼすべての種類の溶接で、疲労き裂が報告されている。き裂の発生する理由としては、薄板構造であるので、変形が集中しやすいことや溶接の品質管理に注意が払われなかったことがあげられるが、根本としては、設計の際に疲労を考慮していなかったことが指摘されている。

2. 研究の目的

疲労損傷の中でも、U字型の縦リブ(Uリブ)とデッキプレートに生じるき裂が問題となっている。デッキプレートは輪荷重が直接載る箇所であり、損傷は事故の発生にも結び付くからである。図-1に示すように、疲労き裂は溶接ルート部から発生する。ルートから発生した疲労き裂はデッキプレートを進展していくものと溶接ビードを進展していくものの2種類がある。き裂発生個所は閉断面内であり、外側からの目視では、き裂の発生を確認することは非常に困難である。非破壊検査が必要となるが、内部欠陥の検出や現場での適用性を考えると、超音波探傷が有力な選択肢となる。

近年ではフェーズドアレイ探触子を用いた超音波探傷システムを用いた検討が行われている。フェーズドアレイ探触子とは微細な(0.1mm オーダー)素子を密に並べた構造をしており、探傷器からのパルス送信のタイミングをナノ秒オーダーで制御することで、任意の方向へ入射屈折角を変化させたり(ステアリング)、入射波を収束させる(フォーカシング)ことができるものである。ただし、これまで検証された箇所は主に「一般部」と呼ばれる箇所である。縦リブは一定間隔で横リブと交差しているが、縦リブ・横リブが交差している箇所を「交差部」と呼んでいるのに対し、一般部は交差していない箇所を区別するための呼称である。既往の研究では、主に一般部が対象となっており、交差部を対象とした検討は行われていなかった。本研究の目的は鋼床版Uリブ・デッキプレートに生じる疲労き裂をフェーズドアレイ超音波探傷により検出することである。特に、縦リブと横リブの交差部を対象としていること、図-2に示すようなフェーズドアレイ素子を2次元配列した探触子を用いる点に特徴がある。



図-1 対象とする疲労き裂

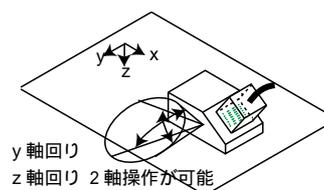


図-2 マトリクスフェーズドアレイ探触子

3. 研究の方法

本研究で検討する項目は次のとおりである。1つ目はフェーズドアレイ探触子の検討である。アレイを構成する素子数、配置、公称周波数などが検討項目となる。解析によりフェーズドアレイ探触子より作られる音場を求めることとなる。2つ目は塗膜の探傷に対する影響である。橋梁は腐食を防ぐためにも塗装が施される。塗膜により超音波の入射に影響が出る可能性がある。影響は塗膜の厚さと塗膜内の音速、および超音波の周波数に依存する。影響を実験により確認する。3つ目はスキヤナの開発である。実際の探傷は上向きで行うこととなる。また、桁が高くなり、アクセスが困難になる可能性もある。上向きである程度遠隔からでも操作することのできるスキヤナを開発する。4つ目は探傷結果を画像化することである。フェーズドアレイ探傷においては、波の重ね合わせによる手法が中心になっている。それらの中でも開口合成(SAFT)法による画像化システムを構築する。疲労試験および探傷試験を行ってシステムを検証する。

4. 研究成果

(1) フェーズドアレイ探触子の検討

フェーズドアレイ超音波探傷においては、入射波をステアリング、フォーカシングするので、十分になめらかな波面となるようにする必要がある。そのためには素子が十分小さくなければならない。十分小さいというのは入射波長の半分程度を意味している。1.5 波長分を超えると探傷は難しいといわれている。また、素子数がある程度数とする必要がある。研究開始当時においては、フェーズドアレイ探傷器では、一度に扱うことのできる素子数は一般的に 64 程度であった(512 素子の探傷器も存在していたが、装置が大がかりになる)。素子が 2 次元に並ぶマトリクスアレイにおいては、素子数が N^2 で増えていくことになる。

探傷においては、周波数が高くなるほど、つまり波長が短くなるほど分解能が高くなる。高周波数のほうが望ましいが、波長が短いので素子の加工が可能であるかが重要となる。5MHz では波長が 0.6mm であり、10MHz では 0.3mm となる。加工の精度を勘案し、素子は 8×8 の配置、素子サイズ 0.3mm, 5MHz, および 8×8 の配置、素子サイズ 1.0mm, 5MHz の 2 種類を作製した。

作製した探触子を図-3 に示す。図-3(a)は素子サイズが 1.0mm 四方のもの、図-3(b)は素子サイズが 0.6mm 四方のものである。1.0mm 素子サイズは将来の素子の拡張を考慮して 8×16 としたが、実際に使用するのは 8×8 である。図-4 にそれぞれの探触子から出される音場のシミュレーション¹⁾例を示す。図-4(a)は素子サイズ 1.0mm, (b)は素子サイズ 0.6mm のものである。鋼床版縦リブ横リブ接合部での探傷を考慮して、図-4 の側面図に示すように、入射屈折角が比較的大きい 70 度の場合を示している。平面図で示すように、交差部では入射方向を直進ではなく、いくらかの角度をもって、入射させることが必要となる。30 度とした解析を示している。側面図に示す入射は若干のサイドローブが見られるが 70 度の角度で入射していることが示されている。しかし、直進から 30 度それた入射では所定の波の入射以外にもサイドローブが見られ、8 素子ではステアリングのみで、波を入射させるよりも探触子を回転させて入射したほうがよいと考えられる結果となった。

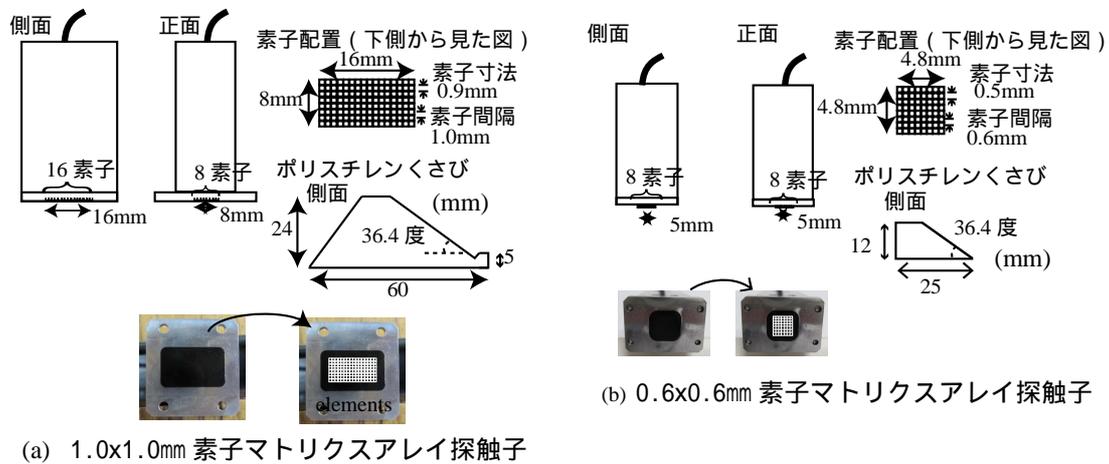


図-3 作製したマトリクスフェーズドアレイ探触子(a)素子サイズ 1.0mm, (b)素子サイズ 0.6mm

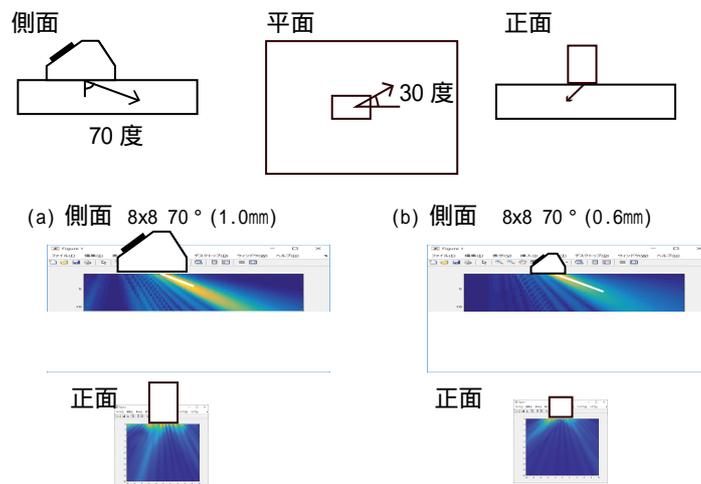


図-4 マトリクスフェーズドアレイ探触子で構成される音場のシミュレーション(a)素子サイズ 1.0mm, (b)素子サイズ 0.6mm

(2) 塗膜の影響

鋼橋には腐食防止の観点からも塗装が施される。塗装系統が閉断面内部か外部であるかで異なるが、いずれの場合も厚さは $200 \sim 300 \mu\text{m}$ の範囲であることが多い。塗装があることにより入射波が塗膜層内で干渉しあい、場合によっては感度が極端に低下することがある。感度の低下は層の厚さと入射超音波の層内での波長(周波数)の影響を受ける。塗膜層での波長は塗膜内の音速と関連がある。

塗膜内での音速を計測するために実験を行った。試験体を図-5 に示す。試験体は厚さ 12mm 、幅 80mm 、長さ 200mm で両面に塗装が施されている。膜厚計により塗膜の厚さを計測した。計測はランダムに 12 か所を計測したが、平均すると $322 \mu\text{m}$ の厚さであった。この試験体において、表面については と の箇所、裏面については、
、
、
を含む箇所の塗膜を砥石により除去した。試験体には裏表両面が塗装されている箇所と裏面のみが塗装されている箇所と両面が塗装されている箇所が存在することとなる。

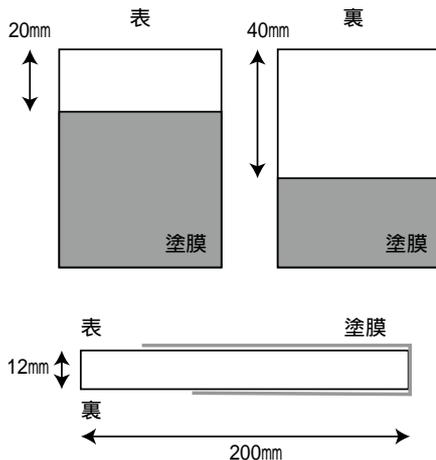


図-5 塗膜の影響を調べるための試験体

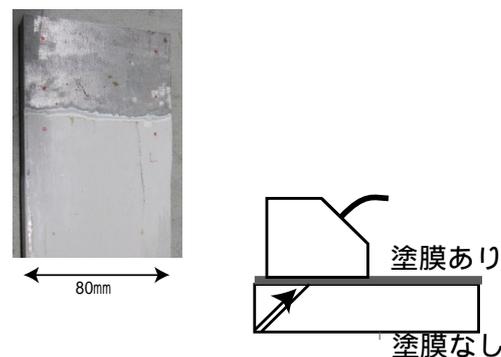


図-6 塗膜内の音速を計測するための実験概略

この試験体に対して、屈折角 45 度の横波斜角探触子を用いて、図-6 に示すように、図-5 に示す に相当する領域で、塗膜面に探触子を置いて、コーナー部のエコーを得た。同様にして、図-5 に示す の位置においてもコーナー波形を取得した。波形はオシロスコープで表示、収集した。塗膜がある場合が波動伝播時間が長くなる。探傷箇所において、マイクロメータで鋼材および塗膜を合わせた厚さを計測し、塗膜の厚さを $322 \mu\text{m}$ と仮定し、時間差に関する式およびスネルの法則による波の屈折に関する式を組み合わせ、塗膜内の音速を計算した。5 回の実験を行い、平均を取った結果、時間差は $0.246 \mu\text{s}$ 、音速は 1890m/s となった。

この結果に基づいて、塗膜と試験体(鋼材)の反射位置により位相差(波動伝播距離の差)がどれだけのものとなるのか、前田ら²⁾の検討に基づいて計算を行った。 $322 \mu\text{m}$ の塗膜厚さでは塗膜を通過する伝播経路と塗膜を通過しない伝播距離の差は、塗膜内を伝播する超音波の半波長の 3 倍程度となった。この領域では相互の波が若干弱め合う結果となるが、その影響は 2dB には満たず、小さいものと考えられる。この結果はフェーズドアレイ探傷に限らない場合においても適用できるが、影響が少ないことが確認できた。

(3) スキャナの開発

鋼床版の現場での探傷は、図-1 に示すように、Uリブの上側にデッキプレートがくることになり、上向き探傷することになる。上向き探傷に耐えることができる探傷スキャナを開発した。スキャナを図-7 に示す。スキャナはヒンジを介してデッキ側およびリブ側に探触子を装着できる構造となっている。デッキ側およびリブ側両方に強力な磁石があり、スキャナ全体を支えることができる。リブ側およびデッキ側に車輪がついているが、モーターで駆動できるのはリブ側にある車輪のほうである。モーターのそばの車輪にはエンコーダが取り付けられており、回転数に応じたパルスを超音波探傷器へ送ることが可能となっている。パルスはコンピュータ内でカウントされ、探触子の位置を収録することができる。スキャナのモーターの回転開始スイッチは数メートルの長さのケーブルでつながっており、遠隔操作することができる。ある程度の高さのある桁内部においても、リモコンを介して、スキャナを動かすことができる。

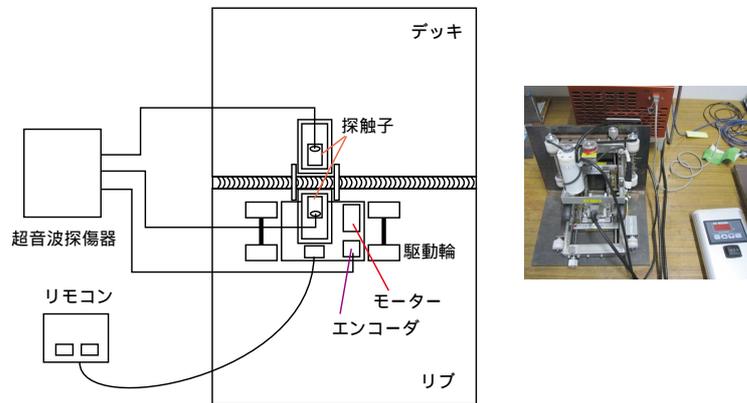


図-7 上向き探傷を可能とする新開発のスカナ

(4) 探傷結果の画像化

探傷試験で得られる波形をもとにして、欠陥像を再構成する方法を開発した。この方法は開口合成法(Synthetic Aperture Focusing Technique : SAFT)と呼ばれる方法¹⁾であるが、これを3次元画像化に拡張したものといえる。

開口合成法でははじめに図-8(a)に示すように再構成領域を設定し、その中を格子に分割する。格子点の一つを k とする。探傷で得られる波形はポリスチレンくさびと接する探触子の素子 e (ここでは中心)から送信されるものと考えられる。ポリスチレンと試験体(鋼)は物質が異なるので、スネルの法則にしたがって、入射点 i が計算できる。得られた波形を図-8(b)に示す $w_j(t)$ とする。波動伝播距離 d_k は計算により、鋼材中の音速 c は既知であり、格子点 k での反射の強さは $w_j(d_k/c)$ のエコー高さに表される。これをすべての格子点 k 、すべての入射パターン j について重ね合わせることで欠陥がある位置での反射の強さ I は強調されていくことになる。

鋼床版の溶接部を模擬した疲労試験体で疲労試験を行い、開口合成法で欠陥を再構成した結果を図-9に示す。試験体に生じる疲労き裂は図-1に示したビード進展型のき裂となる。図-9には再構成像が赤い像となっているが主に3本程度見られる。このうちの1つは溶接ルート部からのエコーによるものである。もう1つはビード内にある疲労き裂の先端部である。残りの1つは溶接止端部からと思われるエコーによるものである。溶接線に沿う方向を z 軸とすると、き裂先端と思われる像は25mmから161mmに現れた。疲労試験後に破壊試験を行い、疲労破面を確認すると、き裂は $z=0$ mmから180mmまでに存在していた。若干短い寸法となったが、き裂を再構成していることが確認された。

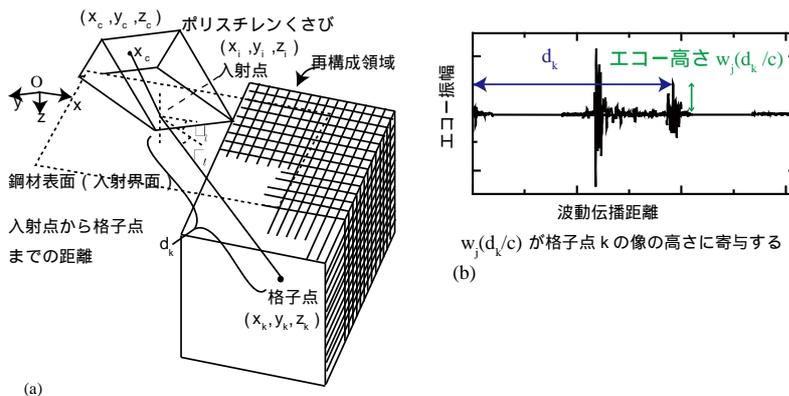


図-8 開口合成法による欠陥の再構成

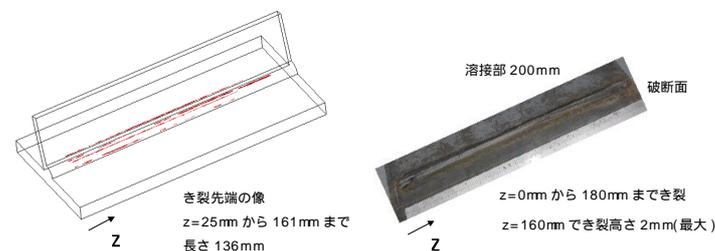


図-9 溶接ビード進展型の疲労き裂の開口合成による画像化結果

- 1) 前田正弘, 平澤英幸, 吉川孝男: 超音波探傷試験の反射エコー高さに及ぼす塗膜厚さの影響, 非破壊検査, Vol.61, No.9, pp.480-487, 2012.
- 2) Lester W. Schmerr Jr. : Fundamentals of ultrasonic phased arrays, Springer, 2015.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 1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 Hiromi Shirahata	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of phased array ultrasonic test system for detection of fatigue crack of rib-to-deck weld of orthotropic steel deck system	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Maintenance, Safety, Risk, Management and Life-Cycle Performance of Bridges	6. 最初と最後の頁 CH388
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 -

1. 著者名 白旗弘実	4. 巻 23
2. 論文標題 2次元フェーズドアレイによる鋼床版Uリブ溶接部の超音波検査	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 検査技術	6. 最初と最後の頁 20-27
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 -

1. 著者名 Hiromi Shirahata, Shigeyuki Hirayama, Shuichi Ono, Yuto Yamase	4. 巻 65
2. 論文標題 Detection of crack in painted flange gusset welded joint by ultrasonic test	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Welding in the World	6. 最初と最後の頁 2147-2156
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 有
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 -

1. 著者名 Hiromi Shirahata	4. 巻 -
2. 論文標題 Applicability of 2D ultrasonic phased array nondestructive test for fatigue crack of orthotropic steel deck	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations	6. 最初と最後の頁 1028-1035
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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Hiromi Shirahata
2. 発表標題 Applicability of 2D ultrasonic phased array nondestructive test for fatigue crack of orthotropic steel deck
3. 学会等名 Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 陳遡洋、白旗弘実、平山繁幸、内田大介、永田恵架
2. 発表標題 面外ガセット溶接部に生じる疲労き裂の塗膜からの超音波探傷による検出
3. 学会等名 土木学会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山瀬裕登、白旗弘実
2. 発表標題 塗膜からの超音波探傷試験による疲労き裂検出
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------