

令和 4 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01332

研究課題名(和文) 高耐熱複合材料の健全性診断のための高温環境における超音波可視化技術

研究課題名(英文) Ultrasonic visualizing technique at high temperature for health diagnosis of heat-resistant composite materials

研究代表者

岡部 洋二 (Okabe, Yoji)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：90313006

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：耐熱複合材料等でできた構造部材の高温環境における健全性を、高い信頼性で診断するための非破壊検査手法として、光ファイバ超音波センサとレーザー超音波法を組み合わせた高温用超音波可視化計測システムを構築した。これにより、1000℃の高温環境中で構造材料を伝播する超音波ガイド波を可視化することが可能となった。さらに、複合材料を伝播するガイド波に含まれる複数モードを分離して、損傷部でのモード変換挙動を観察可能にすることで、複合材料中の微視的損傷を的確に検出する手法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で構築した1000℃レベルの高温での超音波可視化検査技術は、国内外でも他に例を見ない独自性の高い手法であり、発電設備や大型輸送機器エンジン等の安全性向上とメンテナンスコストの削減に貢献しうると考えられる。さらに本研究で確立した超音波ガイド波のモード変換挙動に基づく損傷検知手法は、耐熱複合材料の高温環境における破壊進展挙動の解明にも役立つと考えられ、材料工学分野等での学術的な波及効果も期待できる。

研究成果の概要(英文)：An ultrasonic visualizing system applicable to high temperatures was developed by the combination of an optical fiber ultrasonic sensor and a laser-ultrasonic technique in order to inspect non-destructively the health condition of structures made of heat-resistant composite materials under high temperature. By using this system, we succeeded in visualizing the propagation behavior of ultrasonic guided waves in a structural material at high temperature of 1000 degrees Celsius. In addition, an accurate detection method for microscopic damage in composite materials was established by separation of multiple modes existing in the ultrasonic guided wave propagating in the composite material to observe the mode conversion behaviors at the damage.

研究分野：構造健全性診断システム

キーワード：超音波非破壊検査 高温環境 可視化 耐熱複合材料 健全性診断

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

近年、民間旅客機や自動車などの軽量化を図るため、主構造部材への複合材料の適用が急速に進んでいる。さらに現在、航空機エンジン等の高温環境に曝される部材への、セラミックス基複合材料等の適用が試みられている。しかしながら、複合材料内部に発生する損傷は外観からの判断が困難であり、その健全性を保証するための非破壊検査法は、損傷検出性能のさらなる向上が必要とされている。さらに、高温環境で用いる構造部材においては、運用を停止して常温まで冷却した後に検査を実施しなければならず、運用効率の低下に繋がる。そのため、高温状態を保ったままで、複合材料内部の損傷を高い信頼性で検出する非破壊検査手法の確立が望まれる。

一般的に複合材料は板構造として使用されるため、その内部損傷を診断する方法の一つとして、超音波ガイド波を用いた方法が有効である。ただし、その伝播挙動の複雑さに起因して、受信波形だけから正確に判断することが難しいため、ガイド波の伝播挙動を可視化し、その挙動から損傷を検出する手法の適用が期待されている。

2. 研究の目的

超音波ガイド波の可視化手法を高温での検査に用いる場合、超音波の励起側にはレーザー超音波法が有効だが、超音波の受信側が問題となる。例えば、非接触のレーザー干渉計ではガイド波の検出感度が低く、圧電セラミックス素子を設置した場合には約 200°C 以上で使用することができない。そこで本研究では、受信側に新規光ファイバセンサを用いることで、レーザー超音波法で励起した微弱なガイド波を高温環境中で計測可能にし、高温環境下にある構造部材においても超音波ガイド波の伝播挙動を可視化可能にする。さらに、複合材料の損傷部でのガイド波の振る舞いを明らかにすることで、高温環境における複合材料の内部損傷を高い信頼性で診断可能にすることを、本研究の目的とする。

3. 研究の方法

(1) 高温環境用の超音波可視化計測システムの構築

光ファイバセンサの 1 種である FBG (Fiber Bragg Grating) センサは、高精度なひずみ計測が可能である。研究代表者らは、その FBG センサの回折格子の中央に 180° の位相シフトを形成した位相シフト FBG (PSFBG) を導入することで、微弱で高速なひずみ変動である超音波を計測可能にしている [1]。そこでこの PSFBG センサを、図 1 に示すように、レーザー超音波可視化検査装置 (つくばテクノロジー (株) LUVI-CP) の受信側に組み込む。これにより、高温環境下にある構造物に対して離れた位置からレーザーを照射することで、非接触で構造物表面に超音波を励起させる。そして、構造物に沿ってガイド波として伝播した超音波を、離れた位置に設置した光ファイバセンサで受信する。ただし、石英ガラス製の光ファイバ自体は 1000 レベルの高温に耐えられるが、光ファイバ中に UV 照射によって形成された PSFBG は約 400 以上になると反射率が低下し始め、約 900 以上で完全に消失してしまう。そのため、PSFBG センサ部自体は高温環境から離して設置し、光ファイバと構造物との接着点から PSFBG センサ部まで、光ファイバに沿って超音波を伝播させることで、遠隔設置の PSFBG センサで受信する。ここで、PSFBG センサは光ファイバを伝播する超音波のうち縦波のみを選択的に受信するため、光ファイバの接着点での超音波波形を遠隔で正確に計測することができる。そして、レーザー照射点を構造物表面に沿って走査しながら、各位置で発生させたガイド波を PSFBG センサで全て受信した後に、全ての波形データを二次元グラフ上に色の濃淡として同時にプロットすることで、センサ位置からレーザー走査領域全体にガイド波が伝播していく挙動を動画で取得する。

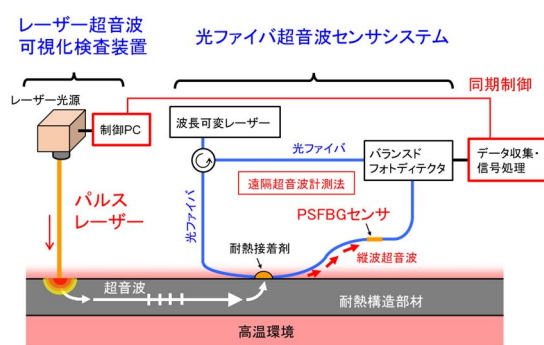


図 1 高温環境用超音波可視化計測システム

(2) 1000 に加熱したセラミックス板における超音波伝播の可視化計測

この高温用超音波可視化計測システムを構築した後に、実際に 1000°C の高温環境での計測を試みた。本研究では図 2 に示すように、カンタル線のヒーターを用いたセラミックファイバーボード製の小型高温炉を作製した。試験片には厚さ 1mm の SiC セラミックス板を用い、高温炉の中に設置した。このセラミックス板の裏面には光ファイバを接着しており、PSFBG が炉の外に位置するように光ファイバを引き出している。そして耐熱ガラス板で高温炉の蓋をし、その上方

からレーザーを照射する。するとレーザーはガラス板を通過して内部のセラミックス板表面に照射される。そこで、高温炉内を 1000 まで加熱した状態で、レーザー照射点を試験片表面上で走査させながら、各位置で励起された超音波ガイド波を PSFBG センサで受信し記録する。そしてそれら受信波形データを処理することで、光ファイバ接着位置からセラミックス板全体に広がる超音波伝播挙動の可視化動画を得る。

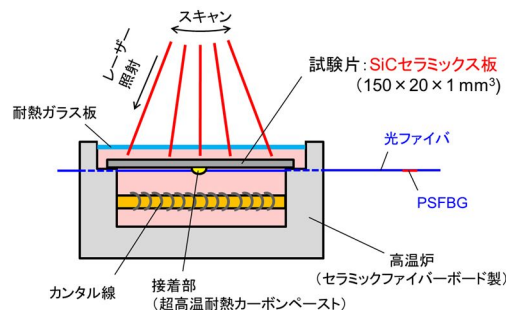


図 2 高温での超音波可視化実験の構成

(3) 再生 PSFBG の形成

前述の通り、PSFBG センサ自体は十分な耐熱性を有していないため、遠隔で設置しなければならない。しかし、実用上の取り扱いを考慮すると、センサ部自身にも十分な耐熱性を持たせることが望ましい。そこで、PSFBG センサにアニーリングを施すことで、高温で消失した PSFBG の回折格子を再生させ、高温でも消失しない耐熱性に優れた再生 PSFBG センサを形成することを試みた。

(4) 再生 PSFBG の多重化による超音波可視化領域の拡大

FBG センサは、一本の光ファイバ上に複数の FBG センサをそれぞれのブラッグ波長を調整しながら形成することで多重化でき、多点での同時計測が可能になるという特徴を有する。そこで、本手法の大型複合材構造物への適用を念頭に置き、複数の再生 PSFBG センサを 1 本の光ファイバ上に形成することで、超音波伝播の可視化が可能な領域を大幅に拡大することを試みた。

(5) ガイド波伝播挙動の解明に基づく複合材の損傷検知

本計測システムで取得した超音波可視化動画から複合材の内部損傷を診断するためには、複合材を伝播するガイド波に含まれる複数モードを個別のモードに分離して、損傷部でのモード変換挙動を捉える方法が有効と考えられる。そこで、三次元フーリエ変換により超音波可視化動画上に存在する複数モードを個別に分離する手法を構築する。そして、本手法により観察されるモード変換挙動により、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 積層板中の層間剥離やクラック単体を検出することを試みる。

4. 研究成果

(1) 1000 の高温での超音波伝播の可視化結果

本研究で構築した高温環境用超音波可視化計測システム (図 1) を使い、図 2 の実験構成で 1000 に加熱した SiC セラミックス板 (厚さ 1mm、長さ 150mm、幅 20mm) に対し、超音波伝播挙動の可視化を試みた結果を図 3 に示す。図 3(a) が実際に用いたセラミックス板の裏面の写真であり、光ファイバを 1 点で接着している。そして、この表面にレーザーを照射して走査しながら取得した超音波可視化動画から、異なる時刻の画像を抽出した結果が図 3(b) である。このように、光ファイバ接着位置から板全体に超音波ガイド波が伝播していく様子を明確に観察できている。さらにこの板の側面には人工的に切欠き損傷を導入しているが、この動画に三次元フーリエ変換に基づいたデータ処理を施し、左下方向に伝播する成分のみを抽出すると、図 3(c) に示す通り、この切欠き損傷からの反射波を明瞭に観察することができている。よって、1000 の高温環境下にある構造物に対しても、超音波による損傷検出が可能となる。ただし、当初は高耐熱性のセラミックス複合材料 (CMC) を対象として実験を行う予定であったが、入手が困難であったため、CMC での計測は今後の課題とする。

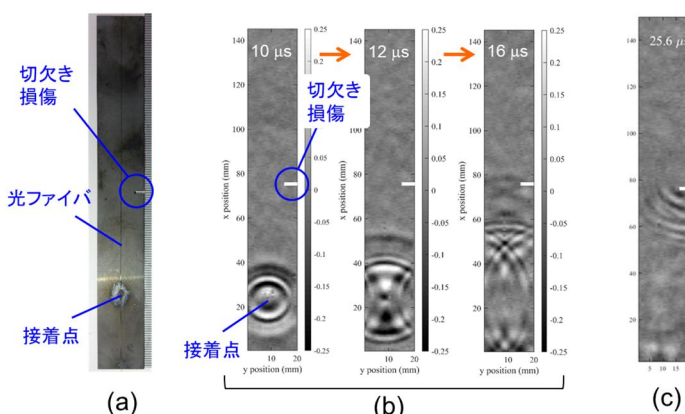


図 3 1000°C のセラミックス板での超音波可視化結果：(a) セラミックス板の裏面写真、(b) 可視化動画からの抽出画像、(c) 切欠き損傷からの反射波

(2) 再生 PSFBG の形成結果

次に、PSFBG センサ自体の耐熱性を向上させるため、PSFBG にアニーリングを施して再生 PSFBG を形成することを試みた。ここではグレーティング長が 5mm でブラッグ波長が 1550nm の PSFBG を使い、そのアニーリング中に測定した PSFBG の反射光スペクトルのピーク値を、温度履歴とともに図 4(a) に示す。この結果より、400 以上になると PSFBG の反射率が低下し始

め、約 900 で完全に消失していることがわかる。しかしその後、920 で保持し続けると、消失した回折格子が再生して反射率が 35%程度まで回復している。そこでアニーリングにより形成した再生 PSFBG について、再び室温から 900 まで加熱しながら反射光スペクトルを観察した結果を図 4(b)に示す。この結果より、900 まで加熱しても再生 PSFBG は消失せずに同じスペクトル形状を維持しており、優れた耐熱性を有することが確認できる。よって、再生 PSFBG は高温環境中に直接設置して使用することが可能である。

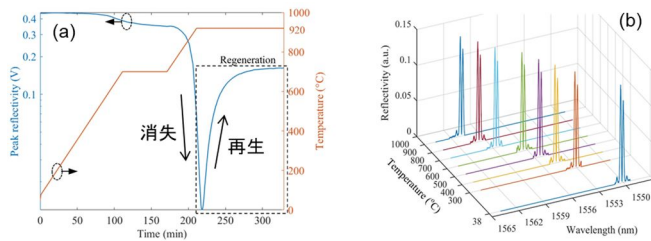


図 4 PSFBG の再生現象：(a) アニーリング中の温度と PSFBG の反射率の変化、(b) 900°Cまで加熱した再生 PSFBG の反射光スペクトル

(3) 多重化した再生 PSFBG による大面積での超音波可視化

さらに、再生 PSFBG (以降、RPSFBG と表記) の多重化を行うため、ブラッグ波長が 1538nm と 1544nm の PSFBG にもアニーリングを施して RPSFBG を形成し、前述の RPSFBG とともに 1m 間隔で融着して 1 本の光ファイバ上に多重化した。その多重化 RPSFBG の反射光スペクトルを計測した結果を図 5 に示す。各 RPSFBG のスペクトルは中心波長の間隔が約 6nm と十分に離れているため、図 1 の超音波可視化検査システムに組み込んだ場合でも、光ファイバセンシング用の波長可変レーザーの波長を各スペクトルの中央ディップ傾斜部に合わせることで、各 RPSFBG を独立した超音波受信センサとして用いることができる。

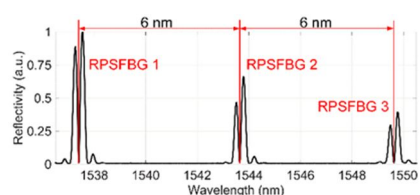


図 5 3 点の多重化 RPSFBG

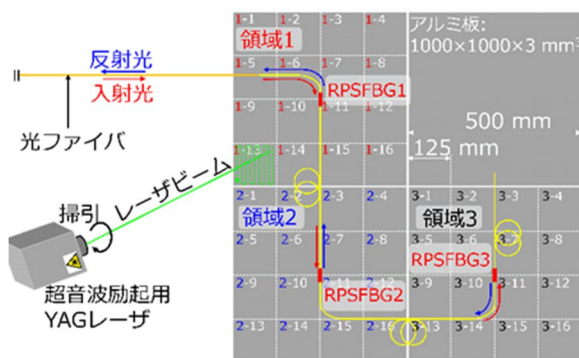


図 6 多点での超音波可視化計測実験の構成

そこで図 6 に示すように、1000 × 1000 × 3mm³ のアルミ板を用いて多点での超音波可視化計測を試みた。まず、このアルミ板を均等な 4 領域に分割し、そのうちの 3 領域の各中心位置に、多重化した 3 個の RPSFBG をそれぞれ設置した。そして超音波可視化計測を行う際には、レーザー照射を行う領域に応じて、波長可変レーザーの波長を各 RPSFBG のスペクトル傾斜部に合わせて切り替えることで、それぞれの領域における超音波可視化計測を実施可能にする。ただし、各領域における超音波可視化動画を高解像度で取得するため、図 6 に示す通り、各領域をさらに均等に 16 分割して計測し、全ての計測後にデータを統合して可視化動画を作成した。図 7(a)に、RPSFBG1 が貼付された領域 1 における、35μs と 60μs の時刻での可視化結果を示す。さらに、領域 2 (RPSFBG2) と領域 3 (RPSFBG3) で取得した可視化結果もそれぞれ図 7 の(b)と(c)に示す。いずれも、超音波の伝播を的確に可視化できており、1 本の光ファイバ上に多重化した複数の RPSFBG を用いることで、超音波可視化を行う領域を拡大できることがわかる。よって、高温環境で用いられる大型構造部材に対しても、本システムによる超音波可視化検査が可能となる。

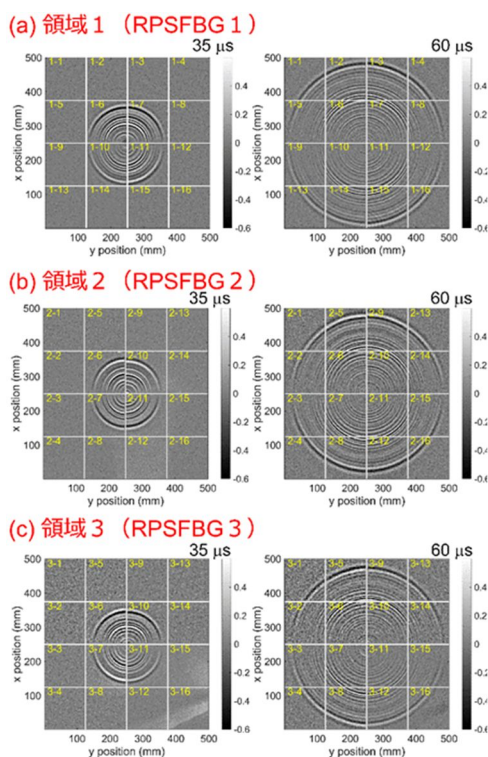


図 7 多重化 RPSFBG による 3 領域での超音波可視化結果

(4) ガイド波のモード分離に基づく複合材の損傷検知

本システムを複合材の損傷検知に用いる場合、ガイド波に含まれる複数モードを分離して、損傷部でのモード変換挙動を捉える方法が有効と考えられる。そこで基礎的検討として、CFRP 直交積層板 ($[90_2/0_2]_s$, 厚さ 1.12mm) の片面 90° 層に 1 個のトランスバースクラック (TC) が存在する場合を仮定し、超音波伝播の理論解析および有限要素法による調和振動シミュレーションにより検討を行った。すると 750kHz の場合、図 8 に示すように、 S_0 モードが TC に到達するとモード変換が生じて前進 A_0 モードと反射 A_0 モードが現れることがわかった。

そこで実際に、CFRP 直交積層板の表面において TC を含む、長さ 100mm、幅 20mm の領域で超音波可視化計測を行った。ただしここでは、室温での実験のため、圧電セラミックス製の超音波センサを用い、計測データには中心周波数 750kHz のフィルタを掛けている。得られた超音波可視化結果のうち、 $25\mu\text{s}$ と $35\mu\text{s}$ での画像を図 9 に示す。長手方向 $x = 80\text{mm}$ の白線で示した位置に TC が存在し、超音波は左端中央 ($(x, y) = (0\text{mm}, 10\text{mm})$) から板全体に広がっている。最初に S_0 モードが進行し、その後、遅れて A_0 モードが伝播している。

この超音波可視化動画から各モードを分離するため、計測した時空間データ (x, y, t) に三次元フーリエ変換を施して波長-周波数データ (k_x, k_y, ω) に変換し、そこから、理論分散曲線により判断できる各モードの周波数に依存した波長域でデータを抽出した後、逆フーリエ変換を行うことで、モード毎の時空間データを得る。そのようにして得られた、時刻 $25\mu\text{s}$ 、 $30\mu\text{s}$ 、 $35\mu\text{s}$ での前進 S_0 、前進 A_0 、反射 A_0 の各モードの可視化結果を図 10 に示す。 $25\mu\text{s}$ では励起された S_0 と A_0 のみが存在するが、 $30\mu\text{s}$ と $35\mu\text{s}$ では、 S_0 が TC ($x = 80\text{mm}$) を通過することで、TC から新たに前進 A_0 と反射 A_0 が発生していることがわかる。このように、超音波可視化動画からモード変換挙動を抽出して観察することで、1 個の TC でも検出することが可能となる。

なお、同様に各モードの波長域を切り出し、モード変換挙動を観察することで、CFRP 積層板中の層間剥離の面内位置と深さ位置を推定できることも確認している。

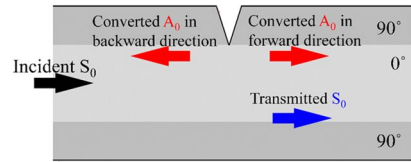


図 8 CFRP 直交積層板の TC での S_0 モードの変換挙動

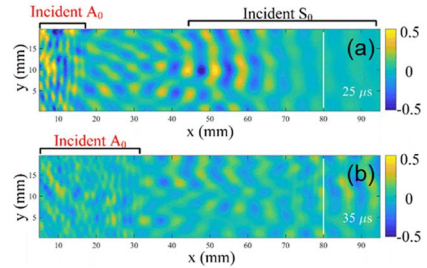


図 9 CFRP 直交積層板での超音波可視化結果：(a) $25\mu\text{s}$ 、(b) $35\mu\text{s}$

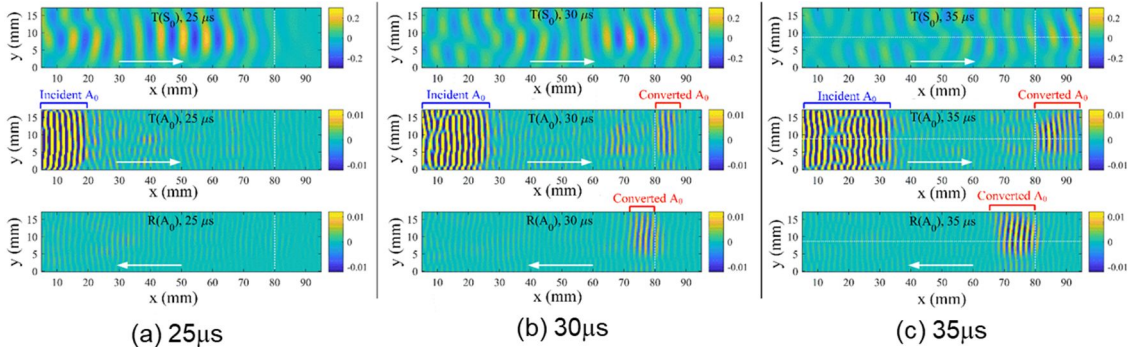


図 10 超音波可視化動画から抽出した各時刻での各モード (上：前進 S_0 、中：前進 A_0 、下：反射 A_0) の伝播挙動

(5) 国内外における位置づけと今後の展望

本研究で構築した 1000 レベルの高温での超音波可視化技術は、国内外でも他に例を見ない独自性の高い手法と考えている。したがって、高温環境で運用する構造物のメンテナンスコストを大幅に削減するとともに、それら構造物の信頼性向上にも貢献しうる、これまでに存在しなかった高温用検査技術として今後の展開が期待できる。ただし、本研究期間中に CMC 等の耐熱複合材料への適用可能性を示すことができなかったが、本研究で構築したモード変換挙動に基づく損傷検知手法は、高温環境中の耐熱複合材料にも適用できると考えており、今後、検証していく予定である。そして将来的には、耐熱複合材料の実用化に向けた研究開発にも貢献できる技術へと発展させていきたい。

< 引用文献 >

[1] Q. Wu and Y. Okabe, "High-sensitivity ultrasonic phase-shifted fiber Bragg grating balanced sensing system," *Optics Express*, **20**(27), 28353-28362 (2012)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Zhang Zeping, Saito Osamu, Okabe Yoji	4. 巻 31
2. 論文標題 Analysis on ultrasonic waves generated in anisotropic carbon fiber reinforced plastic laminate by laser incidence from various directions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Results in Physics	6. 最初と最後の頁 104927 ~ 104927
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.rinp.2021.104927	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yu Fengming, Saito Osamu, Okabe Yoji	4. 巻 283
2. 論文標題 Detection of a single transverse crack in a CFRP cross-ply laminate by visualizing mode conversion of Lamb waves	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Composite Structures	6. 最初と最後の頁 115118 ~ 115118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compstruct.2021.115118	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 李 梓萱、于 豊銘、齋藤 理、岡部 洋二	4. 巻 73
2. 論文標題 再生位相シフトFBGセンサを用いた高温アコースティックエミッション計測	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 生産研究	6. 最初と最後の頁 389 ~ 394
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11188/seisankenkyu.73.389	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yu Fengming, Saito Osamu, Okabe Yoji	4. 巻 147
2. 論文標題 An ultrasonic visualization system using a fiber-optic Bragg grating sensor and its application to damage detection at a temperature of 1000 °C	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mechanical Systems and Signal Processing	6. 最初と最後の頁 107140 ~ 107140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ymsp.2020.107140	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 Yu Fengming, Saito Osamu, Okabe Yoji	4. 巻 20
2. 論文標題 Laser ultrasonic visualization technique using a fiber-optic Bragg grating ultrasonic sensor with an improved adhesion configuration	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Structural Health Monitoring	6. 最初と最後の頁 303 ~ 320
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/1475921720932233	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 Saito Osamu, Yu Fengming, Okabe Yoji	4. 巻 264
2. 論文標題 Dispersion relation of Lamb waves in cross-ply composite laminates using multi-layered models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Composite Structures	6. 最初と最後の頁 113691 ~ 113691
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compstruct.2021.113691	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 馮 鋼、于 豊銘、齋藤 理、岡部 洋二	4. 巻 71
2. 論文標題 光ファイバーセンサを用いた高温用レーザー超音波計測法の構築	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 生産研究	6. 最初と最後の頁 1019 ~ 1023
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11188/seisankenkyu.71.1019	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 黄 云涛、于 豊銘、齋藤 理、岡部 洋二	4. 巻 71
2. 論文標題 ラム波のモード変換に基づいたCFRP接着構造における剥がれ損傷の検知	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 生産研究	6. 最初と最後の頁 1007 ~ 1012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11188/seisankenkyu.71.1007	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Q. Wu, Y. Okabe, and F. Yu	4. 巻 18
2. 論文標題 Ultrasonic Structural Health Monitoring Using Fiber Bragg Grating	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 3395
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s18103395	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 F. Yu and Y. Okabe	4. 巻 2
2. 論文標題 Regenerated fiber Bragg grating sensing system for ultrasonic detection in 900 °C environment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems	6. 最初と最後の頁 11006
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/1.4042259	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 -

〔学会発表〕 計23件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 齋藤理, Chen Weikun, 岡部洋二
2. 発表標題 レーザー超音波可視化技術におけるスローネス評価に基づくCFRPの剥離検出
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 2021年度第1回超音波部門講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Fengming Yu, Osamu Saito, Yoji Okabe, Zixuan Li
2. 発表標題 A fiber-optic ultrasonic visualization technique for damage detection in a 1000 °C environment
3. 学会等名 9th International Conference on Experimental Vibration for Civil Engineering Structures (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Zixuan Li, Fengming Yu, Osamu Saito, Yoji Okabe
2. 発表標題 Application of Regenerated Phase-shifted Fiber Bragg Grating Sensors to Acoustic Emission Detection under Elevated Temperature
3. 学会等名 9th International Conference on Experimental Vibration for Civil Engineering Structures (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李梓萱, 于豊銘, 齋藤理, 岡部洋二
2. 発表標題 再生FBGセンサを用いた高温でのレーザー超音波可視化検査法
3. 学会等名 第29回機械材料・材料加工技術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 譚朗星, 齋藤理, 于豊銘, 岡部洋二
2. 発表標題 疑似等方性CFRP積層板の衝撃損傷におけるガイド波の散乱現象の理論解析
3. 学会等名 安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技術ミニシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 李梓萱, 于豊銘, 齋藤理, 岡部洋二
2. 発表標題 High-temperature laser-ultrasonic visualization with the use of a regenerated fiber Bragg grating sensor
3. 学会等名 安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技術ミニシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoji Okabe, Fengming Yu, and Osamu Saito
2. 発表標題 Ultrasonic Nondestructive Evaluation Methods Applicable to High-Temperature Environments Based on Optical Fiber Remote Sensing
3. 学会等名 International Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials and Processing (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡部洋二, 于豊銘, 齋藤理
2. 発表標題 光ファイバ超音波センサを用いた極限環境下での構造物の健全性診断技術
3. 学会等名 日本セラミックス協会 第33回秋季シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齋藤理, 張澤平, 線延飛, 岡部洋二
2. 発表標題 CFRP積層板の剥離部におけるレーザー励起ラム波の振幅変化挙動の理論的解明
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 2020年度秋季講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 張澤平, 齋藤理, 岡部洋二
2. 発表標題 An analysis on ultrasonic waves generated in anisotropic CFRP by laser incidence with various angles and directions
3. 学会等名 第28回超音波による非破壊評価シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 張澤平, 齋藤理, 岡部洋二
2. 発表標題 Numerical analysis on generation and propagation of laser ultrasonic waves in an anisotropic CFRP laminate
3. 学会等名 安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技術ミニシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李梓萱, 于豊銘, 齋藤理, 岡部洋二
2. 発表標題 High-temperature ultrasonic measurement based on a regenerated phase-shifted fiber Bragg grating sensor
3. 学会等名 安全・安心な社会を築く先進材料・非破壊計測技術ミニシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shangnan Li, 黄云涛, 于豊銘, 齋藤理, 岡部洋二
2. 発表標題 ラム波モード変換に基づいたCFRP接着構造における接着剥がれの検知
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 岡部洋二, 于豊銘, 齋藤理
2. 発表標題 光ファイバ超音波センサを用いた高温非破壊検査法
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 高温プロセス部会 / 計測・制御・システム工学部会 合同シンポジウム「製鉄プロセスにおける計測技術の現状と高度化に向けた課題」(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoji Okabe, Fengming Yu, and Osamu Saito
2. 発表標題 Ultrasonic NDT and SHM methods for composites at high temperature using optical fiber sensors
3. 学会等名 10th International Conference on High Temperature Ceramic Matrix Composites (HT-CMC10) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡部洋二, 于豊銘, 齋藤理
2. 発表標題 光ファイバセンサを用いた高温での超音波検査技術
3. 学会等名 日本溶接協会 第14回マイクロソルダリング技術 教育・認証フェスタ (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 齋藤理
2. 発表標題 レーザ超音波による炭素繊維複合材料の非破壊検査
3. 学会等名 CTC 超音波ソリューションセミナー2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 P.Deng, O.Saito, and Y.Okabe
2. 発表標題 Numerical Analysis of Lamb Wave Propagation in a Periodically Stiffened CFRP Plate for Impact Damage Detection
3. 学会等名 9th European Workshop on Structural Health Monitoring (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 F.Yu and Y.Okabe
2. 発表標題 High-temperature Ultrasonic/AE sensing System Using Fiber-optic Bragg Gratings
3. 学会等名 9th European Workshop on Structural Health Monitoring (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 馮鋼, 于豊銘, 齋藤理, 岡部洋二
2. 発表標題 光ファイバセンサを用いたレーザ超音波計測法による高温環境下での広帯域ラム波伝播挙動の評価
3. 学会等名 第26回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 齋藤理, 鄧培文, 岡部洋二
2. 発表標題 CFRP製スキン・トリガー構造における超音波ガイドの伝播挙動解明
3. 学会等名 第10回日本複合材料会議 (JCCM10)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 光ファイバセンシングシステム、損傷監視方法、及び損傷箇所画像化方法	発明者 岡部洋二、于豊銘、 齋藤理	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-197840	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

日経産業新聞(朝刊、2020年3月31日)「航空エンジン 高温でも傷点検 - 東大、光ファイバーで波長補足 -」

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	齋藤 理 (Saito Osamu) (00795130)	東京大学・生産技術研究所・助教 (12601)	

	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	于 豊銘 (Yu Fengming)	東京大学・生産技術研究所・特任助教	

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