

令和 3 年 4 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13920

研究課題名（和文）航空機エンジン用耐熱複合材の高温での損傷評価を可能にする新規光ファイバAE計測法

研究課題名（英文）Damage evaluation of heat-resistant composites for aircraft engines at elevated temperature using novel fiber-optic sensor-based AE detection method

研究代表者

于 豊銘（Yu, Fengming）

東京大学・生産技術研究所・特任研究員

研究者番号：50814307

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：航空機エンジン用構造材として高温複合材料の実用化を進める上で、実環境での損傷進展挙動を把握する必要がある。そこで本研究では、光ファイバFBGセンサ技術により確立した遠隔AE計測法を非破壊評価法として用い、1000℃での材料試験における複合材の損傷進展過程をリアルタイムで評価した。そして、得られたAE計測結果に基づき、実環境での損傷進展過程と最終破断強度との関係を解明できた。将来的には、AE計測は、構造物を運用しながら損傷進展を常に監視可能な構造ヘルスマニタリング技術にも用いられることが望ましい。そこで、高温環境中に直接設置が可能な再生FBGセンサを開発し、高温下での超音波受信に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1000℃の高温環境下で使用可能な高感度な光ファイバAEセンシング技術の確立は、世界で初めての試みである。さらには、高温環境での複合材料における損傷進展挙動の解明に、本技術が有効であることを証明できた。したがって本研究は、航空宇宙分野や複合材料工学において、学術的新規性と工業的有用性が高いと考えている。

本研究で構築した技術は、今後、耐熱性に優れた軽量複合材料の効率的な開発と、その使用時の信頼性確保に貢献出来ると考えており、航空機エンジンの省エネルギー化に必要な、さらなる軽量化と低燃費化の推進に役立つことが期待できる。

研究成果の概要（英文）：Heat-resistant composites are expected to be used for aircraft engines. For their practical application, it is necessary to understand the damage progress in those materials at elevated temperatures. To clarify the damage progress at high temperatures, we proposed a novel remote AE measurement method with a fiber-optic Bragg grating sensor. This method enables the successful real-time response to actual damage-induced AE signals during material tests at temperatures of up to 1000℃. We verified that the testing results are useful to elucidate the relation between the damage progress and the fracture strength at different temperatures. Furthermore, the AE measurement is also expected to be used as a structural health monitoring technique to monitor damage progress while the composite-made structure is in operation. For this purpose, we have also developed a regenerated FBG sensor that can be directly installed in high-temperature environment and succeeded to receive ultrasonic waves.

研究分野：工学

キーワード：高温環境 光ファイバセンサ 再生FBG アコースティックエミッション 超音波 耐熱性複合材料

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 航空機エンジンの更なる燃費向上を図るため、軽量かつ耐熱性に優れたセラミックス基複合材料 (CMC) や Carbon-Carbon (CC) 複合材料等の開発が行われている。しかし、それらの複合材料の実用化を進めるためには、エンジン稼働時の高温実環境下における、材料内部の微視的な損傷の進展挙動を解明しなければならない。

(2) 損傷進展を評価可能な高温での非破壊検査 (NDT) 技術として、損傷発生に伴って励起される弾性波を検出する、アコースティック・エミッション (AE) 法が期待されている。さらに、AE 計測は損傷の発生履歴をリアルタイムで記録するため、構造物の健全性を常に監視する構造ヘルスマonitoring (SHM) 技術の構築にも展開できる。

(3) しかし、一般的な圧電セラミックス製の AE センサは、圧電効果が高温で消失するため 300 °C 以上で使用することが困難である。一方で我々は、光ファイバセンサの一種である PSFBG (phase-shifted fiber Bragg grating) を用い、AE 信号を高感度で計測するセンシングシステムの構築を行ってきた[1]。そして、ガラス製の光ファイバは 1000 °C 以上の耐熱性を有するため、そのセンサを高温環境での計測に適用できるのではないかとこの着想に至った。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、これまでに開発してきた高感度な光ファイバ PSFBG センシング技術に基づいて、新たな AE 計測手法の確立と、耐熱性に優れた新規 PSFBG 系 AE センサの開発を試みる。これにより、1000 °C レベルの高温環境下でも耐熱構造材料中の損傷進展を評価可能な NDT 手法と、その構造材料から構成される構造物の健全性を常時モニタリング可能な SHM 技術を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 光ファイバは 1000 °C までの耐熱性を有するものの、PSFBG センサ自体は 400 °C 以上になると消失し始めるという問題点がある。そこでこの問題を解決するために、遠隔 AE 計測法を考案した。この方法では光ファイバの一点を試験片に接着して高温環境下に置き、PSFBG センサ部は常温環境下に配置する。つまり、光ファイバ自体を超音波ウェーブガイドとして活用し、AE 波を高温環境から常温環境まで伝播させ、PSFBG センサにより受信する。PSFBG は高温に晒されず、光ファイバは耐熱性に優れるため、この方法により 1000 °C 以上の極限環境下でも AE 信号を安定して計測することが可能となる。

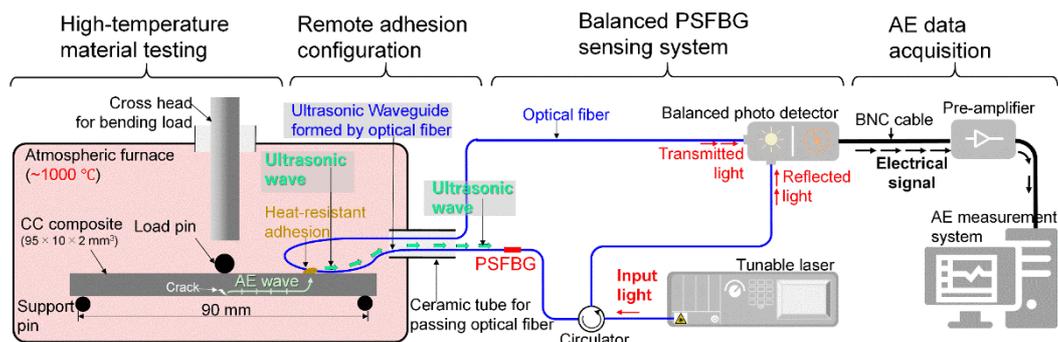


図1 遠隔 AE 計測法を高温三点曲げ試験に組み込んだ実験のセットアップ

(2) この遠隔 AE 計測法を、高温での材料実験に組み込めば、材料試験中に発生した損傷により励起される AE 信号を測定可能となる。図1に示すように、本研究では、1000 °C 以上の温度まで加熱可能な大気炉内で CC 複合材料の三点曲げ試験を行い、その試験中に生じた AE 信号を、200 °C から 1000 °C までの温度範囲で受信することを試みる。

(3) そして、計測した AE データに対して、機械学習に基づくクラスタ分析と波形分析を行い、材料試験で生じた母材き裂、層間剥離、繊維破断といった3種類の損傷により励起される AE 信号を同定可能にする。さらに、各損傷形態での AE 信号の発生履歴と荷重曲線とを照らし合わせることで、どんな温度条件でどのような損傷が発生したのかを調べる。これにより、1000 °C までの各温度での損傷進展挙動と最終破断強度との関係を把握する。

(4) 上記の手法では、FBG センサは室温環境に設置しなければならないため、損傷進展挙動の解明を目的とした NDT においては実用的であるものの、センサ部を常に高温実環境中に配置することが要求される SHM 技術に適用することは困難である。よって、AE 計測を SHM 技術へと展開するためには、FBG そのものの耐熱性を向上しなければならない。そこで本研究では、

高耐熱性の FBG 系超音波センサの開発にも挑む。

(5) 今まで温度センサとして開発されてきた再生 FBG (RFBG) は、通常の FBG に高温アニーリングを行い、高温で消失した FBG を再生させることで形成することができる (図 2(a))。ただし RFBG センサは、1000 °C までの耐熱性を有するが、高感度で超音波を計測することができない。そこで本研究では、超音波計測感度に優れた PSFBG に対してアニーリング処理を行うことで、R(PS)FBG を形成する (図 2(b))。

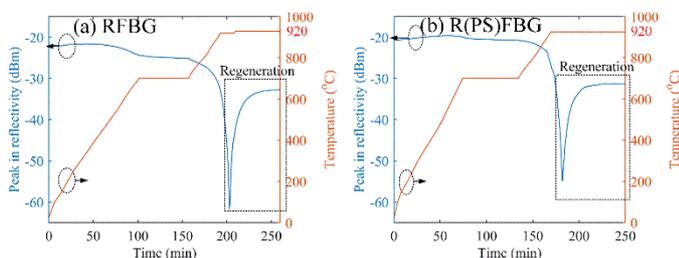


図 2 アニーリング過程での反射率の変化:
(a) RFBG; (b) R(PS)FBG

(6) 次に、R(PS)FBG に対して、図 3 の左側に示すように、高温環境で超音波を計測するためのセンシングシステムを、エッジ・フィルター法に基づいて構築する。光源には波長可変レーザを用い、レーザ光の波長を R(PS)FBG のスペクトルの傾斜部に合わせることで、ひずみ変化により生じる反射スペクトルの波長シフト量を、光パワーの変化としてとらえる。そして、図 3 の右側に示すセットアップで、R(PS)FBG 超音波センサの有効性を検証するための実験を実施する。

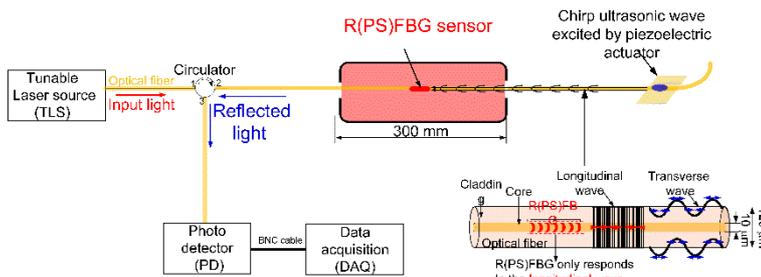


図 3 再生グレーティングを用いて構築した超音波センシングシステムによる超音波計測の検証実験のセットアップ

ここでは、R(PS)FBG センサを高温環境中に設置しておき、その光ファイバを高温炉から外へと引き出して、常温環境に配置した圧電アクチュエータに貼り付ける。R(PS)FBG センサは、その圧電アクチュエータから光ファイバに励起した広帯域の超音波を受信する。そして、通常の RFBG による計測結果と比較することで、R(PS)FBG センサによる超音波受信性能の向上を検証する。

4. 研究成果

(1) 図 1 の構成において、PSFBG センサを高温炉から引き出せるように、PSFBG と接着点との距離を 200 mm 確保し、異なる温度条件下で三点曲げ試験を行いながら AE 計測を実施した。ここで温度が 200 と 1000 で測定した AE の累積エネルギー履歴を、曲げ荷重履歴とともに図 4 に示す。これらの結果より、遠隔 AE 計測法は、1000 までの高温環境下において実際の損傷により励起した AE 信号を、安定して計測できていることがわかる。また、破断時の曲げ荷重は、200 での約 75N から、1000 での約 60N にまで減少しているが、これは温度上昇に伴って材料の破壊挙動が変化したためと考えられる。それに伴い、AE 信号の発生の様子も大きく変化していることが確認できる。

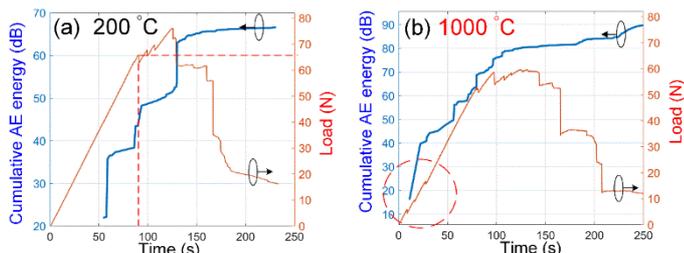


図 4 各温度条件下での三点曲げ試験中の曲げ荷重と AE 測定の累積信号エネルギー

(2) 得られた AE 計測結果から、損傷進展挙動の解明に役立つ有益な情報を得るため、AE 信号分析に基づいた損傷形態の同定を試みる。複合材料内部の母材き裂と層間剥離、繊維破断は、AE 発信源としては、波の励起方向や立ち上がり時間などの特徴に違いがあるため、それら 3 種類の損傷による AE の波形と周波数スペクトルの特徴も異なる。しかし、AE 波形を 1 つずつ確認して損傷形態を判断する方法では、かなりの労力と時間を要す。そこで本研究では、大量のデータから効率的に損傷形態を同定できるように、AE 信号に対して教師なし機械学習に基づくクラスタ分析を行った。具体的には、まず AE 信号から、波形の形状を表す複数の標準的な数値パラメータ (カウント数、ピーク振幅値、立ち上がり時間、ピーク周波数等) を抽出し、各 AE 信号を、それらのパラメータにより構成される多次元のベクトルで表す。本研究では、AE 計測で良く用いられる 10 個のパラメータを選ぶことにより、AE 計測結果を 10 次元ベクトルにより構成されるデータセットにする。そして的確な分類結果を得るために、階層クラスタ分析による次元削減処理に基づき、10 次元の中からデータセットの特徴を最も良く表せる独立な特徴量のみを

残す。その後、残されたパラメータに対して主成分分析を行うことで、主成分と呼ばれる新たな合成変数を複数求める。すると、得られた主成分により構成される直交空間では、元のデータセットにおける各データ点が的確に分散し、明確なグループ分けが可能となる。最後に、主成分で表すデータ点間の距離を類似度情報として、k-means という教師なし機械学習法により、特徴の類似度が高い(点間距離が短い)データを同じクラスターに分類していく。これにより、異なる損傷形態による AE 信号は異なるクラスターに振り分けられていく。一例として、1000 での測定信号のクラスター解析結果を図 5(a)に示すが、AE データが 3 個のクラスターに分けられていることが確認できる。

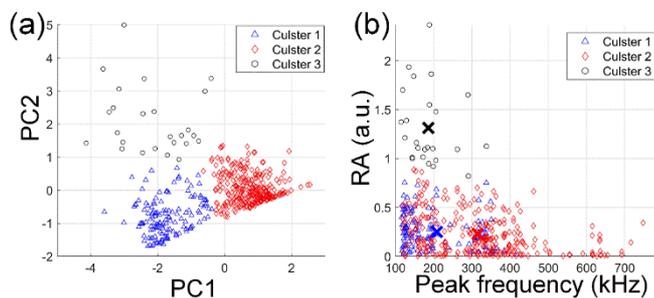


図 5 機械学習に基づくクラスター解析結果：(a) 主成分 1 と 2 の空間；(b) RA とピーク周波数の空間

(3) さらに、先行研究で得られている知見[2-3]に基づき、図 5(b)に示す振幅と立ち上がり時間との比(RA)とピーク周波数という 2 つの特徴量の関係と、図 6 に示す AE 波形 (Waveform) とそのフーリエ変換結果(FFT)、およびそのウェーブレット変換結果(CWT)に現れる波動モードの挙動を比較し考察する。これにより、図 5 で分類されている Cluster 1、2、3 の AE 信号は、それぞれ母材き裂、繊維破断、層間剥離により励起された AE であることが推定できる。

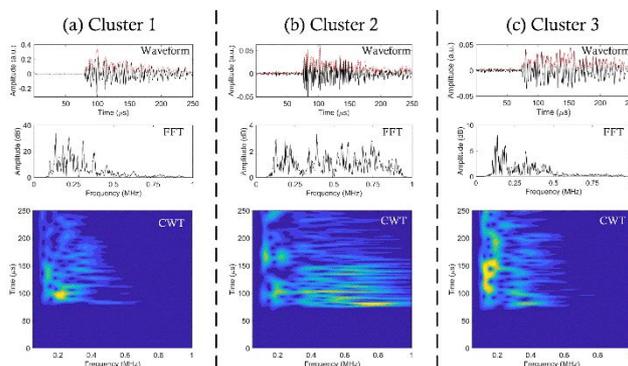


図 6 Cluster 1, 2, 3 における信号例

(4) 損傷形態を同定した上で、各損傷形態に対応する正規化した累積 AE エネルギーの履歴を図 7 に示すように求め、温度と荷重が各損傷の進展挙動に及ぼす影響を調べた。ここで、図 7 (a)と(b)において、材料破断時の累積エネルギーに注目する。すると、温度が 200 から 1000 に上がると、繊維破断による AE の発生が激しくなることが分かる。この現象は、温度上昇に伴って加速された CC 材料の酸化に起因するものと考えられる。高温で CC 複合材料における酸化が進むと、母材と繊維との結合強度が弱くなり、繊維に対する母材の保護効果が弱まるといわれている[4]。その結果、低い曲げ荷重でも繊維破断が発生してしまう。これは、前述の、1000 での材料の最終破断強度が大幅に低下する現象の原因でもある。

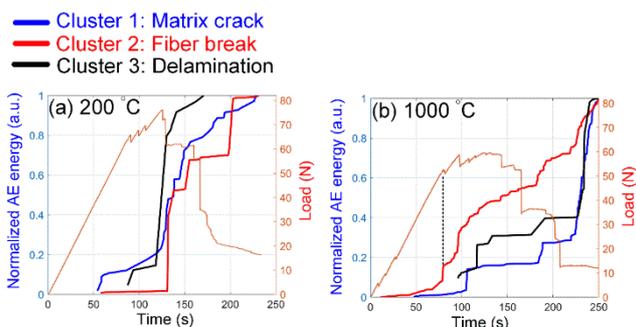


図 7 各温度条件での損傷形態別の正規化された AE 累積信号エネルギーと荷重曲線

(5) 以上のように、高温環境での三点曲げ試験中に生じた損傷進展の挙動を、AE 計測で解明することができた。本研究の計測手法とデータ処理手法は、今後、新規開発の複合材料において様々な実験条件下で現れる、多様な損傷進展挙動の解明に役立つことが期待できる。

(6) 上記の遠隔 AE 計測法の研究成果に続いて、次に、センサ部を直接高温環境中に設置したままで超音波受信を可能にする、再生グレーティングセンシングシステムに関する研究の成果を述べる。図 2 では、アニーリング処理によって R(PS)FBG と RFBG が形成される過程を示していた。そこでまず、形成した R(PS)FBG と RFBG が十分な耐熱性を有することを確認するために、900 まで加熱しながら、それらの反射スペクトルを計測した結果を図 8 に示す。R(PS)FBG と RFBG のどちらの反射スペクトルも、加熱温度に応じて中心波長が大きくなるだけで、スペクトル形状と反射率の大きさは全く変化しないことが確認でき、どちらも十分に優れた耐熱性を持つことがわかる。

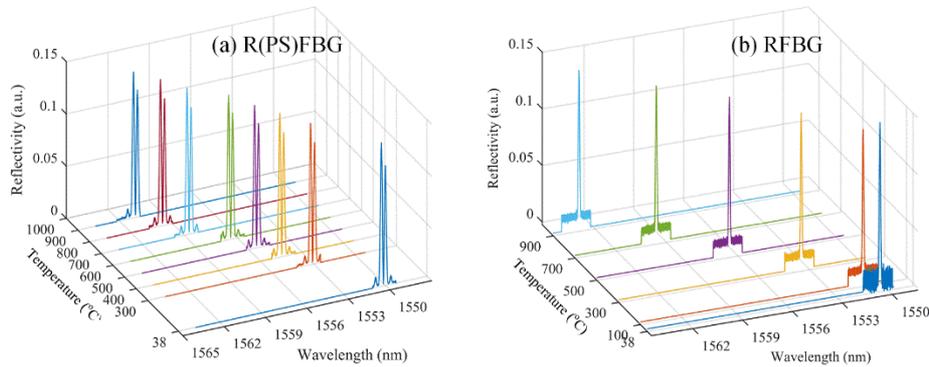


図 8 各温度条件で計測した R(PS)FBG と RFBG の反射光スペクトル

(7) 耐熱性を確認した後、図 3 に示す実験構成で、100 から 900 まで 100 ずつ温度を上げながら、R(PS)FBG と RFBG のそれぞれのセンサで、20kHz から 1.5MHz までの広帯域にわたるチャープ超音波を受信した。それらの受信波形とそのフーリエ変換結果を図 9 に示す。900 までの範囲では、各センサでの受信波形は、温度に依存せずほぼ同じ形状を保つことが確認できる。つまり、RFBG と R(PS)FBG のいずれも、高温環境中で安定した超音波計測が可能であることがわかる。ここで図 9(a)と(c)を比較してみると、R(PS)FBG と RFBG とで計測した波形に差があることが確認できるが、これは、R(PS)FBG が RFBG より周波数応答性能に優れており、より広帯域にわたる超音波を受信できるためである。そこで、図 9(b)と(d)のフーリエ変換結果を見てみると、R(PS)FBG センサは 1.5 MHz まで受信できているのに対し、RFBG センサは 1MHz 以上の成分に対する感度が低下していることが分かる。これは、位相シフトを導入している PSFBG にアニーリング処理を行って形成した R(PS)FBG は、位相シフト点近傍のみを超音波センサとして機能させられるので、有効センサ長が極めて短くなり、波長の短い高周波成分も高感度で受信できるためである。

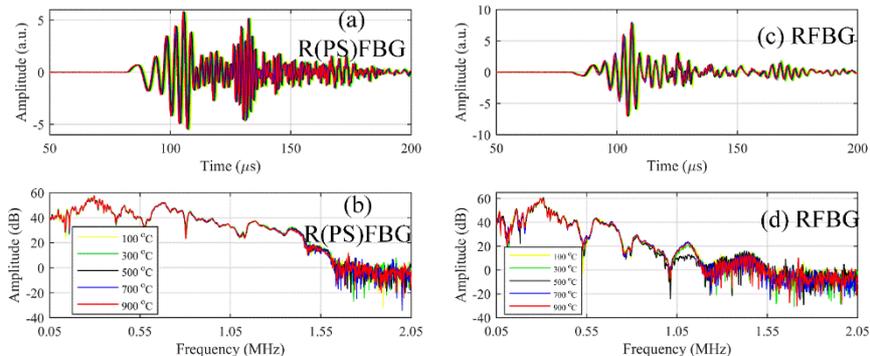


図 9 高温での R(PS)FBG と RFBG センサによる広帯域超音波の計測結果

(8) この広帯域性は、より正確に AE 波形を取得できるというメリットをもたらす。そのため、R(PS)FBG を用いて構築した高温環境用 SHM 技術も、損傷発生の有無をモニタリングするだけでなく、前述の遠隔 AE 計測法と同様に、損傷形態の同定等といった高次の機能を備えることが期待できる。

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), 2012, 28363-28362
- [2] F. Yu, Y. Okabe, Q. Wu, N. Shigeta, "A novel method of identifying damage types in carbon fiber-reinforced plastic cross-ply laminates based on acoustic emission detection using a fiber-optic sensor," *Composite Science and Technology*, 135, 2016, 116-122
- [3] D.G. Aggelis, N.-M. Barkoula, T.E. Matikas, A.S. Paipetis, "Acoustic structural health monitoring of composite materials : Damage identification and evaluation in cross ply laminates using acoustic emission and ultrasonics," *Composite Science and Technology*, 72(10), 2012, 1127-1133
- [4] P. Crocker and B. McEnaney, "Oxidation and fracture of a woven 2D carbon-carbon composite", *Carbon*, 29(7), 1991, 881-885

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 5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 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 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 Yu Fengming, Okabe Yoji	4. 巻 238
2. 論文標題 Linear damage localization in CFRP laminates using one single fiber-optic Bragg grating acoustic emission sensor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Composite Structures	6. 最初と最後の頁 111992 ~ 111992
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compstruct.2020.111992	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 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 張 格、于 豊銘、岡部 洋二	4. 巻 71
2. 論文標題 機械学習を用いたAE波形信号の新規分析法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 生産研究	6. 最初と最後の頁 1013 ~ 1017
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11188/seisankenkyu.71.1013	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 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 Feng-ming、Okabe Yoji	4. 巻 2
2. 論文標題 Regenerated Fiber Bragg Grating Sensing System for Ultrasonic Detection in a 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 011006 ~ 011006
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15件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 譚 朗星, 于 豊銘, 齋藤 理, 岡部洋二, 近藤 拓, 手塚翔太, 千葉晃広
2. 発表標題 チャープ超音波ガイド波を用いた CFRP 製モビリティ構造の衝撃損傷モニタリング
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 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 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 (LEMP2020)
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高温非破壊検査法
3. 学会等名 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 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 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 趙淵, 張格, 于豊銘, 岡部洋二
2. 発表標題 ディープラーニングを用いたAE波形の新規分析方法
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 レイ尚南, 黄云涛, 于豊銘, 齋藤理, 岡部洋二
2. 発表標題 ラム波のモード変換に基づくCFRP接着構造における剥がれ検知
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 譚朗星, 張格, 于豊銘, 齋藤理, 岡部洋二 近藤拓, 手塚翔太, 千葉晃広
2. 発表標題 織物CFRP製モビリティ構造を対象としたチャープ超音波ヘルスマニタリングシステム
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 張格, 于豊銘, 岡部洋二
2. 発表標題 機械学習を用いたAE 波形信号の新規分析法
3. 学会等名 第10回日本複合材料会議
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 于豊銘, 黄云涛, 齋藤 理, 岡部 洋二, 齋藤 望, 森下 邦宏
2. 発表標題 ラム波のモード変換に基づくCFRP接着構造における剥がれ検知
3. 学会等名 第10回日本複合材料会議
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黄云涛, 于豊銘, 齋藤理, 岡部洋二, 齋藤望, 森下邦宏
2. 発表標題 ラム波モード変換に基づく複合材スキン - ストリンガー構造の接着剥がれ検知
3. 学会等名 日本機械学会第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 張格, 于豊銘, 岡部洋二
2. 発表標題 機械学習を用いたAE信号の分類法
3. 学会等名 日本機械学会第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 唐朝, 于豊銘, 岡部洋二
2. 発表標題 AE信号への逆解析に基づいたCFRP積層板中の損傷形態の同定
3. 学会等名 日本機械学会第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 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ー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 日本機械学会第26回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2018)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0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、2019-197840	出願年 2019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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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