

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06457

研究課題名(和文) CMCの超高温環境下での損傷挙動を把握する光ファイバAEセンサシステム

研究課題名(英文) Fiber-optic AE sensing system to clarify the damage progress in CMC at ultra-high temperature

研究代表者

岡部 洋二 (Okabe, Yoji)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：90313006

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：耐熱軽量構造部材としてのセラミックス基複合材料の実用化を進める上で、高温環境下での損傷挙動を把握する必要がある。そこで本研究では、PSFBG光ファイバセンサを用いた遠隔AE計測法を構築し、1000℃の高温環境におけるAE信号の正確な計測を可能にした。そして、得られたAE波形から、その発信源となる複合材料中の損傷形態を推定できた。また、PSFBGから再生FBGを形成することで、高温での直接的な超音波受信も可能にした。

研究成果の概要(英文)：Ceramics matrix composites (CMC) are expected to be used as heat-resistant lightweight structural materials. For the practical use of CMC, the complex damage progress in the material at high temperature should be clarified. In this research, the authors developed a novel remote acoustic emission (AE) measurement system using a phase-shifted fiber Bragg grating (PSFBG) fiber-optic sensor and succeeded in the precise AE measurement at high temperature of about 1000 degree Celsius. Then, AE waves measured in CFRP laminates could be categorized into three types of inherent microscopic damages of the CFRP. Moreover, regenerated FBG (RFBG) was produced from the PSFBG by annealing treatment as a heat-resistant fiber-optic sensor, and the RFBG could directly detect ultrasonic waves under high-temperature environment.

研究分野：構造健全性診断

キーワード：AE計測 光ファイバセンサ 高温環境

1. 研究開始当初の背景

(1) セラミックス複合材料 (CMC) は、その軽量性・高耐熱性・高靱性により、航空機エンジン内の耐熱構造部材への適用が期待されている。しかしその破壊過程は、極めて微視的な損傷の累積から形成され、複雑である。そこで、1000°C以上の高温環境下での材料試験において、損傷進展過程を観察することが望まれている。

(2) その観察手段として、損傷発生に伴って発生する超音波を検出する、アコースティック・エミッション (AE) 法が挙げられる。しかし、圧電セラミックス製 AE センサの耐用温度は一般に 200°C程度である。一方で著者らは近年、位相シフト・ファイバブラッググレーティング (PSFBG) を光ファイバセンサに用いた PSFBG バランスドセンシングシステムを構築し、その感度の高さと広帯域応答性により、AE 信号を精度良く計測することに成功している[1]。光ファイバはガラス製で耐熱性に優れているので、高温環境下でも AE 計測を実現できる可能性がある。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、高温環境下でも AE 信号を確実にかつ正確に計測可能な光ファイバセンサシステムを構築する。次に、計測された AE 波形と CMC 中の微視的損傷形態との関係を明らかにする。そして、本システムによる高温 AE 計測に基づき、1000°C以上の高温環境における CMC 材料の損傷発生・損傷進展を把握することを、目的とする。

3. 研究の方法

(1) 一般に、FBG は、900°Cレベルの高温下で消失してしまうため、直接高温環境内に設置することは難しい。そこで、これまでに開発してきた PSFBG 光ファイバ AE 計測システムを、高温環境での計測に使用可能にするため、新たな遠隔 AE 計測法を提案した。これは、図 1 に示すように、石英製光ファイバの一点を試験片に接着して高温環境内に置き、そこから離れた常温下にセンサ部を配置することで、試験片に発生した AE 波を遠隔で計測することを試みる。このセンサ設置方法を、遠隔計測用接着法 (ADRM) と名付ける。この ADRM 構成では、FBG センサ部が高温環境に曝されず、しかも光ファイバは石英ガラス製で 1000°Cレベルの耐熱性を有するため、高温 AE 計測への適用が期待できる。この遠隔 AE 計測法では、光ファイバ自身を超音波のウェーブガイドとして機能させ、AE 波を離れた位置にあるセンサ部まで伝播させる。そのため、AE 波が光ファイバ・ウェーブガイドを伝播した場合でも、AE 信号の正確な波形を計測できることを確認する必要がある。そこで、図 2 に示すように、アルミ板表面に超音波発信用の圧電アクチュエータを貼り付け、それにより励起された超音

波を、PSFBG センサで計測する実験を行なった。

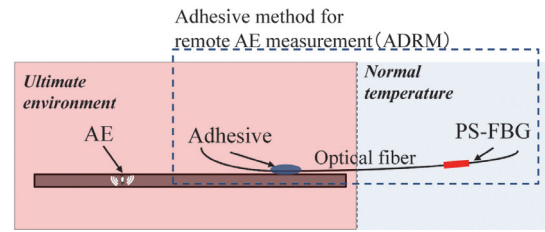


図 1 遠隔 AE 計測のためのセンサ設置構成

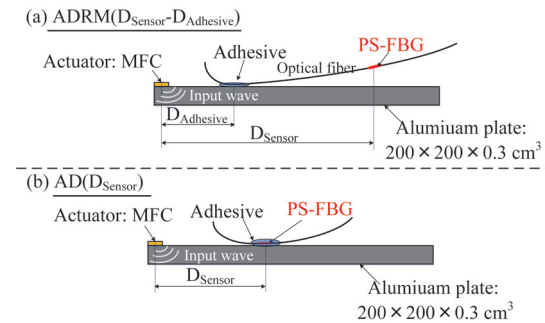


図 2 光ファイバ・ウェーブガイドでの計測性能を確認するための実験構成：(a) 遠隔設置法 (ADRM)、(b) 通常の直接設置

(2) 次に、この遠隔 AE 計測法により、1000°Cにおける AE 信号を計測できることを検証する。そこで、図 3 に示すように、光ファイバを高温接着剤でアルミナの板に接着して、1000°Cまで加熱可能な管状高温炉内に設置し、PSFBG センサは離れた常温環境に設置して、ペンシル・リード・ブレイク (PLB) によって励起させた模擬 AE 信号を計測した。

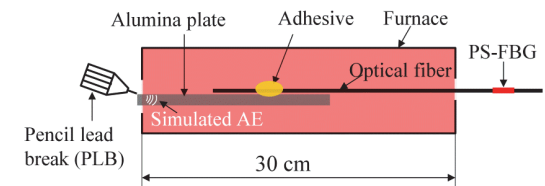


図 3 PLB による擬似 AE 信号の高温計測を検証するための実験構成

(3) 上述の遠隔 AE 計測法は、高温環境での材料試験における AE 計測に使用できるが、センサ部は常に常温環境に設置しなければならない。そのため、実際に構造物を運用した状態で AE 計測をすることが難しい。そこで、センサ部自体を高温環境に直接設置することが可能な、耐熱 RFBG 超音波センサの開発を試みる。一般的な FBG は、900°C以上の高温でアニール処理を行なうことで、一度消失した FBG を再生させることが可能になる。このアニール処理で得られた FBG は、再生 FBG (RFBG) と呼ばれ、再び 1000°Cまで加熱しても消失せず、耐熱性に優れていることが知られている。そこで本研究では、

PSFBG から RFBG を形成することを試みた。その際、アニール処理中における RFBG の形成過程を観察するため、PSFBG センサの反射スペクトルのピーク値を計測した。

(4) 次に、RFBG の耐熱性を利用して、高温環境での超音波を計測可能な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 RFBG 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 RFBG のスペクトルの波長シフト量を、光のパワーとして捉える。この RFBG を用いたセンシングシステムについて、1000°C の高温環境下での超音波計測性能を、図 4 の実験構成で評価する。この構成では、RFBG センサ部を 1000°C の高温環境内に設置しておき、その光ファイバを高温炉から引き出し、常温環境下に配置したアルミ板に接着する。そして、アルミ板に接着している圧電アクチュエータで超音波を励起し、アルミ板から光ファイバに伝播した超音波を計測する。

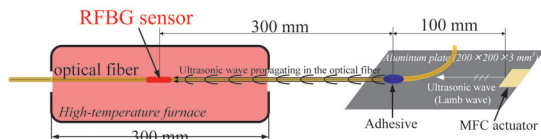


図 4 高温環境下での RFBG による超音波計測性能を評価するための実験構成

(5) 本研究期間内では、CMC 材料を入手することが不可能であったため、代わりに CFRP 積層板を用いることにした。そして、PSFBG 遠隔 AE 計測法で得られた AE 信号に対し、ラム波モードを考慮した解析を行うことで、CFRP 直交積層板での損傷形態の同定を試みた。用いた積層板の構成は $[90_2/0_2]_s$ であり、そのクーポン試験片に三点曲げ試験を行なうことで、トランスバースクラック、層間剥離、繊維破断の 3 種類の損傷を発生させ、それらの AE 信号を計測した。そして、各波形に連続ウェーブレット変換 (CWT) を施すことで、AE 波形に含まれる A_0 モードに対する S_0 モードの最大振幅の比を E/F 比と定義して求めた。そしてさらに、CWT 結果の最大ピークが現れる周波数をピーク周波数として求めた。

4. 研究成果

(1) 図 2 の構成において、圧電アクチュエータから 20 cm 離れた位置にセンサ部を直接接着した場合 (AD20 と表記) と、接着位置は同じで、センサ部を接着位置からさらに 20cm 離れた場合、つまりアクチュエータから 40 cm 離して遠隔配置した場合 (ADRM40-20 と表記) と、60 cm 離して遠隔配置した場合 (ADRM60-20) とで、受信波形を計測した。その際、超音波を励起するための圧電アクチュエータへの入力信号は、

300 kHz の 3 周期サイン波にハミング窓を掛けた波形を用いた。上記の 3 条件で得られた波形を、それぞれ図 5(a), (b), (c) に示す。伝播速度の理論計算結果との比較により、AD20 での受信波形は S_0 モードと A_0 モードから構成されることが確認できた。そして、(b) と (c) においても、(a) の S_0 と A_0 に対応する波形成分が見られる。ただし、アルミ板中の S_0 と A_0 は速度が大きく異なるが、光ファイバ中は同じ速度で伝播していることになる。そこで、この現象を解明するため、有限要素法による数値解析を行なった。その計算結果を図 5(d), (e), (f) に示すが、実験結果を良く再現している。さらに、その数値解析において光ファイバ・ウェーブガイド中の波の振る舞いを詳細に調べることで、遠隔 AE 計測法の計測原理を明らかにした。その原理の概略図を図 6 に示す。アルミ板を伝わってきた S_0 モードと A_0 モードは、接着点において糸状の光ファイバを伝わる純粋な縦波と横波に変換され伝播する。そして、光ファイバの中心軸上に現れる軸方向ひずみ成分は、縦波による成分のみであるため、光ファイバの中心に形成されている PSFBG センサによって受信されるモードは、光ファイバを伝わる純粋な縦波のみとなる。よって、アルミ板を伝わってきたラム波の S_0 モードと A_0 モードは、その波形を保ったまま単一速度の縦波として PSFBG センサまで届くことになる。ゆえに、 S_0 と A_0 が同じ速度で光ファイバを伝わって見えることになる。よって、光ファイバをウェーブガイドに用いることで、AE 信号を遠隔で正確に計測可能となる。

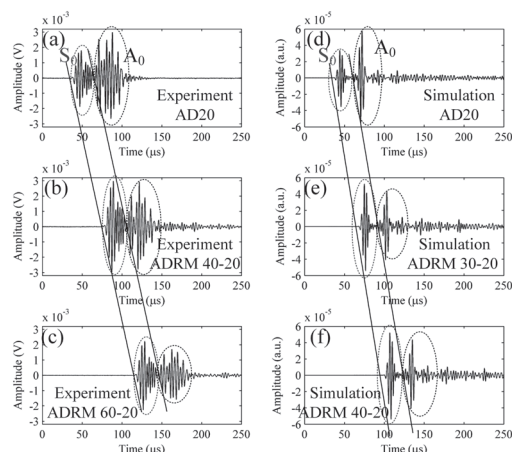


図 5 図 2 の構成での実験および FEM 解析によって得られた受信波形

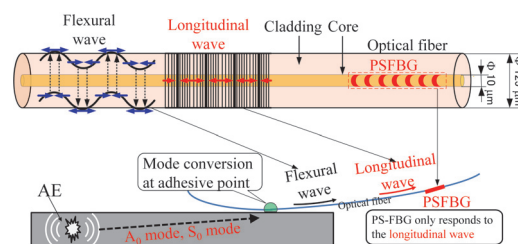


図 6 ADRM 構成での計測原理

(2) 図3の構成で、PLBによる模擬AE信号を、室温から1000℃まで加熱させながら計測した結果を、図7に示す。どの温度条件でも、ほぼ同じ振幅を保持しており、いずれの波形にも S_0 モードと A_0 モードが存在している。よって、ADRM構成でのPSFBGセンサは、1000℃までの高温におけるAE信号を、正確に計測可能であると考えられる。

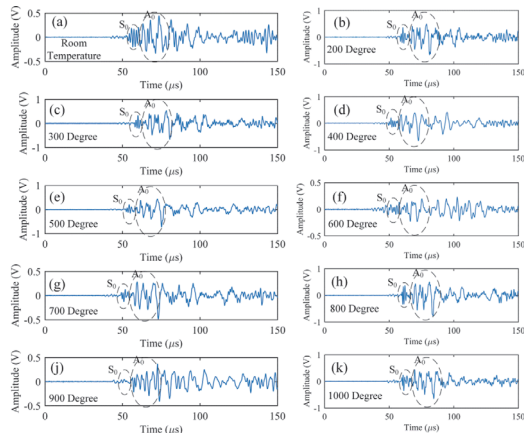


図7 図3の構成で温度上げながらADRM構成のPSFBGセンサで受信した擬似AE信号

(3) 次に、PSFBGにアニール処理を施してRFBGセンサの形成を試みる際に、PSFBGセンサの反射スペクトルのピーク値を計測した結果を、図8(a)に示す。600℃以上になるとPSFBGの反射率が急激に低下し、900℃付近では完全に消失していることがわかる。そこで引き続き、本研究で用いているゲルマニウム添加石英ガラス製光ファイバのRFBG形成のトリガ温度である920℃で保持してアニールングを実施した。すると、消失したPSFBGの反射率が徐々に復活してくる様子が見られ、そのまま約30分保持すると、反射率が-12.28 dBまで戻り、その後は一定値を保持していた。つまり、RFBGが形成されたと考えられる。さらに、アニール処理後に、RFBGの耐熱性を検証するため、再び室温から1100℃の高温まで加熱しながら、RFBGの反射率の変化を観察した。その結果を図8(b)に示す。温度が1000℃まで上昇すると、RFBGの反射率は常温時の-11.4 dBから-15.9~17.9 dBに低下しているが、アニール処理前のPSFBGのように消失することではなく、RFBGは1000℃以上の耐熱性を有することがわかった。

(4) そこで次に、RFBGを図4の構成で設置し、高温環境に曝した状態で、超音波計測を試みた。圧電アクチュエータへの入力信号には、300 kHz、600 kHz、900 kHz、及び1200 kHzの3周期サイン波を用いた。計測結果を図9に示す。このように、RFBGセンサは優れた耐熱性を有するため、1000℃の高温環境下でも超音波を的確に計測できている。さら

に、各計測波形にフーリエ変換を施したところ、受信波形の周波数分布は対応する入力周波数帯域に移動していることがわかる。よって、PSFBGを用いて形成したRFBGセンサは、その有効センサ長の短さから、広帯域にわたる感度を有し、耐熱複合材料のAE信号を正確に計測できることが期待される。

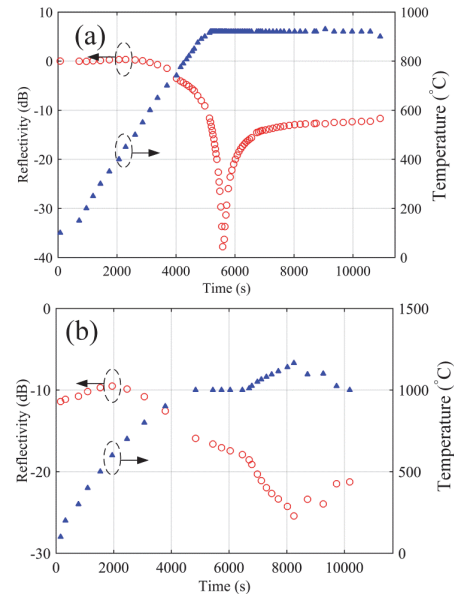


図8 (a) アニール処理の温度履歴とPSFBGの反射率の変化、(b) RFBG形成後の再加熱時での計測結果

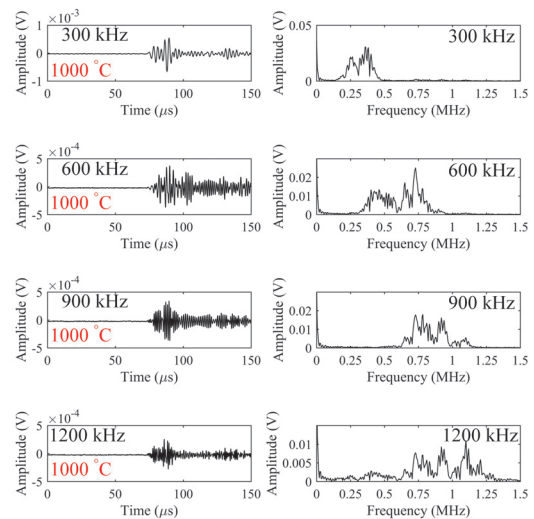


図9 1000℃に曝したRFBGによる各入力周波数での受信波形とそのフーリエスペクトル

(5) CFRP直交積層板に3点曲げ試験を実施しながら、ADRM構成で設置したPSFBGセンサでAE信号を計測した結果、1回の曲げ試験で34個のAE信号が得られ、それらのE/F比とピーク周波数を求めた結果を図10に示す。まずE/F比について見てみると、4.0以上の値になっているAE信号は繊維破断によるものと推察されるが、それより小さな

E/F 比の AE 信号を、トランスバースクラックと層間剥離に分離することは困難である。一方でピーク周波数を見てみると、0.5MHz 付近を境に大きく 2 グループに分けられ、低周波側は A₀ モードの振幅が大きなトランスバースクラックと推察される。しかし高周波側は S₀ モードの振幅が大きな層間剥離か繊維破断によるものと考えられ、それらを区別することができない。そのため、E/F 比とピーク周波数の 2 種類のパラメータを同時に用い、各 AE 信号をそれらの 2 パラメータから成るベクトルとして 2 次元グラフ上にプロットしたものが図 11 である。そしてこれらのデータに、パターン認識の 1 手法である階層的クラスタ分析を適用し、3 クラスタに分類したところ、これらの AE 信号の発生源を、トランスバースクラック、層間剥離、繊維破断に分類することができた。このように、AE 波形に含まれる複数の特徴量（この場合は振幅比とピーク周波数）を正確に抽出し、組み合わせて解析することで、その損傷形態を同定することが可能になると考えられる。

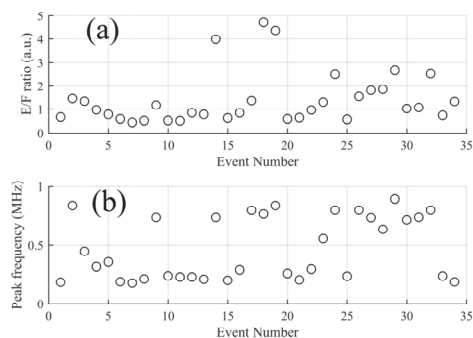


図 10 CFRP 直交積層板の曲げ試験中に得られた 34 個の AE 信号から抽出した特徴量：(a) E/F 比、(b) ピーク周波数

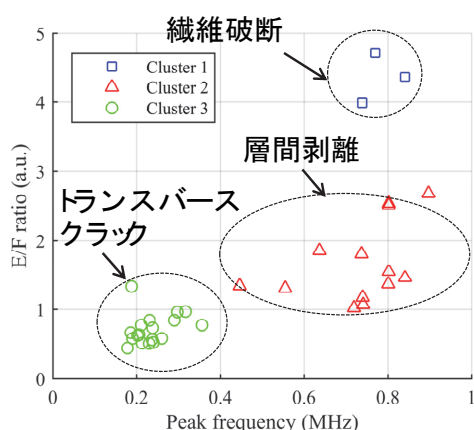


図 11 2 個の特徴量で表した AE データのパターン認識に基づく分類結果

(6) 以上の結果をまとめると、まず、PSFBG を用いた遠隔 AE 計測法を確立することで、1000 度レベルの高温環境においても AE 波形を遠隔で正確に計測可能となった。この手法は、国内外でも他に例を見ない、極めて高

い性能を有する AE 計測法である。そして、正確な AE 波形を取得できることで、AE 波形から物理的な特徴量を抽出でき、それによって、複合材料中の AE 信号の発信源となる損傷形態を推定することができた。また、PSFBG から再生 FBG を形成することで、高温での直接的な超音波受信も可能にした。これらはいずれも、国内外でトップレベルの性能を有する独創的な高温用超音波計測法であると考えている。ただし、補助事業期間内で CMC 材料を入手することができず、その代替として CFRP 積層板への適用を行ってきた。そのため今後は、CMC 等の耐熱複合材料にも実際に本システムを適用し、高温環境下での損傷進展挙動を把握するために極めて有用な計測手法になりうることを実証していきたい。

<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), 2012, 28353-28362

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① 于豊銘、岡部 洋二、高温で計測可能な光ファイバ超音波センサの構築、日本機械学会論文集、査読有、84 巻、2018、17-00406 DOI: 10.1299/transjsme.17-00406
- ② F. Yu and Y. Okabe, Fiber-optic sensor-based remote acoustic emission measurement in a 1000 ° C environment, *Sensors*, 査読有, Vol.17, 2017, 2908 DOI: 10.3390/s17122908
- ③ F. Yu, Y. Okabe, Q. Wu, and 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, *Composites Science and Technology*, 査読有, Vol.135, 2016, 116-122 DOI: 10.1016/j.compscitech.2016.09.017
- ④ F. Yu, Y. Okabe, Q. Wu, and N. Shigeta, Fiber-optic sensor-based remote acoustic emission measurement of composites, *Smart Materials and Structures*, 査読有, Vol.25, 2016, 105033 DOI: 10.1088/0964-1726/25/10/105033
- ⑤ F. Yu, Q. Wu, Y. Okabe, S. Kobayashi, and K. Saito, The identification of damage types in carbon fiber-reinforced plastic cross-ply laminates using a novel fiber-optic acoustic emission sensor, *Structural Health Monitoring*, 査読有, Vol.15, 2016, 93-103 DOI: 10.1177/1475921715624503

[学会発表] (計 14 件)

- ① F. Yu and Y. Okabe, High-temperature Ultrasonic/AE sensing System Using Fiber-optic Bragg Gratings, 9th European Workshop on Structural Health Monitoring, 2018
- ② 于豊銘、岡部洋二、耐熱複合材の損傷評価を可能にする高温用光ファイバ AE/超音波計測法の構築、第9回日本複合材料会議、2018
- ③ F. Yu, Y. Okabe, and N. Shigeta, Damage-type Identification in a CFRP Cross-Ply Laminate from Acoustic Emission Signals Detected by a Fiber-optic Sensor in a New Remote Configuration, 21th International Conference on Composite Materials, 2017
- ④ Y. Okabe, F. Yu, and N. Shigeta, Identification of Damage Types in Composites Based on Remote AE Measurement With a Fiber-Optic Sensor, JSME 2017 International Conference on Materials & Processing, 2017
- ⑤ 于豊銘、岡部洋二、超高温で計測可能な光ファイバ超音波センサの構築、第24回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2016)、2016
- ⑥ F. Yu, Y. Okabe, Q. Wu, N. Shigeta, Damage type identification based on acoustic emission detection using a fiber-optic sensor in carbon fiber reinforced plastic laminates, 32nd European Conference on Acoustic Emission Testing, 2016
- ⑦ Y. Okabe, F. Yu, Q. Wu, and N. Shigeta, AE Measurement of Composite Materials under Ultimate Environments Using a Novel Optical Fiber Sensing System, 17th US-Japan Conference on Composite Materials, 2016
- ⑧ 于豊銘、岡部洋二、呉奇、極限環境下での複合材料に対する光ファイバセンサを用いたAE計測法、第40回複合材料シンポジウム、2015

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡部 洋二 (OKABE, Yoji)
東京大学・生産技術研究所・准教授
研究者番号：90313006

(2) 研究協力者

于 豊銘 (YU, Fengming)
東京大学・生産技術研究所・特任研究員