

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04853

研究課題名（和文）多機能光ファイバセンサの信号解析による新規ひずみ・樹脂硬化度分離評価技術の構築

研究課題名（英文）New extraction and evaluation technique of strain and degree of resin curing by signal analysis of multifunctional optical fiber sensors

研究代表者

武田 真一（Takeda, Shin-ichi）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・主任研究開発員

研究者番号：60435815

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：現在まで航空宇宙構造で用いられる樹脂複合材の成形中の状態（ひずみ、温度、樹脂硬化度）を同時に推定する手法は提案されていなかった。本研究ではシリカガラス光ファイバから製作する傾斜型FBGセンサ（TFBGセンサ）の多機能性に着目し、1つのセンサで成形中の状態をリアルタイムで、同時に把握できることを示した。さらに、センサの信号を解析することで推定精度を大幅に向上する手法も提案し、樹脂複合材の成形にとって有益な新しい推定評価技術を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多機能性があるTFBGセンサを樹脂複合材に埋め込んで使用した場合、その信号はひずみ、温度、樹脂硬化度の3つの影響を大きく受ける。信号を解析することで3つを分離して推定する手法、その推定精度向上の手法を示したことは基礎研究の新しい展開を押し進める成果となっている。ここで示した手法を航空機や宇宙システムの樹脂複合材構造に応用することで、構造の成形中に発生する歪み（スプリングイン等と呼ばれる）だけでなく、内部の樹脂硬化の状態を知る有力な手掛かりとなる。構築した推定評価技術は、従来より高精度な樹脂複合材構造の製造の実現に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：No method had been proposed to simultaneously estimate the in-molding conditions (strain, temperature, and degree of resin curing) of resin composite materials used in aerospace structures until now. This study focused on the multi-functionality of a tilted FBG sensor (TFBG sensor) fabricated from silica glass optical fiber, and showed that a single sensor can simultaneously determine the conditions during molding in real time. Furthermore, we proposed a method to significantly improve the estimation accuracy by analyzing the sensor signals, and developed a new estimation technique that is beneficial to the molding of resin composite materials.

研究分野：航空宇宙工学、複合材料工学

キーワード：樹脂複合材 光ファイバセンサ FBG 同時計測 リアルタイムモニタリング 樹脂硬化度

1. 研究開始当初の背景

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は軽量・高強度であることから航空機、宇宙輸送システム、人工衛星、宇宙構造物などの構造材料として適用されている。CFRP 構造の成形プロセスでは、熱膨張や熱収縮、樹脂硬化による収縮などの相互作用で生じる残留応力により、CFRP 部材を成形型から取り出す際にスプリングインと呼ばれる残留反り変形を引き起こす[1]。残留変形は部材同士の組立強度を低下させる要因となるため、その改善は喫緊の課題となっている。近年、CFRP 内部に予めセンサを埋め込むことで、成形中の樹脂硬化挙動、成形後のスプリングイン、運用時の変形状態を把握するライフサイクルモニタリングが提唱されている[2]。そのためには、同一箇所での「ひずみ」と「樹脂硬化度」および「温度」の時系列変化を、高精度で測定可能なセンサが必要とされている。

CFRP 内部へ埋め込み可能な「ひずみ」センサとして、光ファイバ FBG センサがある[3]。これは光ファイバのコアの一部に長さ数 mm 程度にわたって屈折率の異なる格子状の領域 (Grating) を形成したものである。FBG センサの透過スペクトルでは、ブラッグ反射にともなうピーク波長が測定され、センサの長手方向にひずみが生じると、格子間隔の変化に伴ってブラッグ波長がシフトする。温度が既知であれば、「ひずみ」を高精度で測定できる。これに対して傾斜型 FBG センサ (Tilted FBG : TFBG センサ) とは、格子が光軸に対してわずかに傾いた FBG センサである。TFBG センサの透過スペクトルはブラッグモードに加えて、複雑な光散乱・回折に起因したゴーストモードおよびクラディングモードと呼ばれる多数のピークが測定される。ブラッグモードおよびクラディングモードの波長シフト量から、温度に依存しないひずみの測定が可能であることが報告されている[4]。また、ゴーストモードおよびクラディングモードの振幅および波長変化から TFBG センサ部の周囲に接している材料の屈折率測定が可能であることも示されている[5]。屈折率と樹脂硬化度には一対一対応があることから、樹脂硬化度の直接測定が可能となる。しかしながら「ひずみ」「温度」「樹脂硬化度」のそれぞれが変動する場合の透過スペクトル応答は相乗的に複雑になるため、これら 3 つの物理量を同時に測定する手法は確立していない。また、TFBG センサが CFRP 等に埋め込まれた場合の応答については全く報告例がない。

2. 研究の目的

本研究では TFBG センサの多機能性に着目し、1 つのセンサと計測系によって同時に、同一箇所各物理量を個別に推定評価する手法を確立することを目標とする。目標達成のためには、実験で取得した TFBG センサの信号となる透過スペクトルの効率的な解析、さらには高い推定精度が必要となる。したがって、各物理量を適切に評価できる実験系の構築だけでなく、より簡便に評価できる指標の提案、機械学習の利用による推定精度の向上も目的となる。

3. 研究の方法

本研究で実施する透過スペクトルの解析手順を図 1 に示す。最初に各物理量 (ひずみ、温度、屈折率) に対して高感度を示す TFBG センサの仕様を実験的に決定し、温度と付与ひずみの条件が異なる環境で多数の透過スペクトルを取得する。取得した透過スペクトルを解析することで、ひずみと温度が分離評価できることを実験と解析で示す。次に、CFRP に代表される熱硬化樹脂材料を対象とし、成形プロセスにおいてひずみと樹脂硬化度を分離評価できることを実験と解析で示す。ここでは、透過スペクトルの解析 (順解析) 方法について検討し、より高効率となる手法の獲得も目指す。最後に、解析によって得られたデータから特徴点を抽出し、取得された透過スペクトルとセットとなる教師データとすることで、機械学習から各物理量をアウトプットとして推定 (逆解析) する。研究実施期間 (3 年) で実施する内容は、TFBG センサの多機能性を用いてひずみ・温度・樹脂硬化度を推定評価するための新しい手法を確立するための基盤となる。

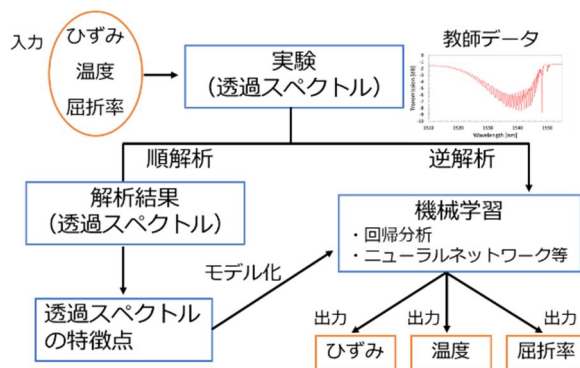


図 1 透過スペクトルの解析手順

4. 研究成果

温度と付与ひずみの条件が異なる環境で TFBG センサの透過スペクトルを取得するため、図2に示す治具を考案して使用し、透過スペクトルを取得した。透過スペクトルのブラッグ波長の変化と熱電対による温度測定を併用してひずみを評価する手法(2つのセンサを使う従来手法で精度は高い)クラディングモードの変化のみを用いてひずみを評価する手法(1つのセンサのみで推定する、本研究が提案する新しい手法)を比較した。図3に示すようにクラディングモードを用いた手法はひずみと温度の評価推定の精度が低いことが分かる。これは、クラディングモードの変化に温度が影響を与えており、推定精度の改善が必要であることを示す。本研究では透過スペクトルの解析に行列式を適用し、多数のピークが存在するクラディングモードから最適な2つのピークを抽出して推定する解析手法を提案した。その結果、図4に示すようにひずみ推定精度は $\pm 100\mu\epsilon$ 程度、温度推定精度も $\pm 10^\circ\text{C}$ 程度となった。クラディングモードから任意の2つのピークを抽出した場合と比べ、大幅な精度改善を達成できたと言える。

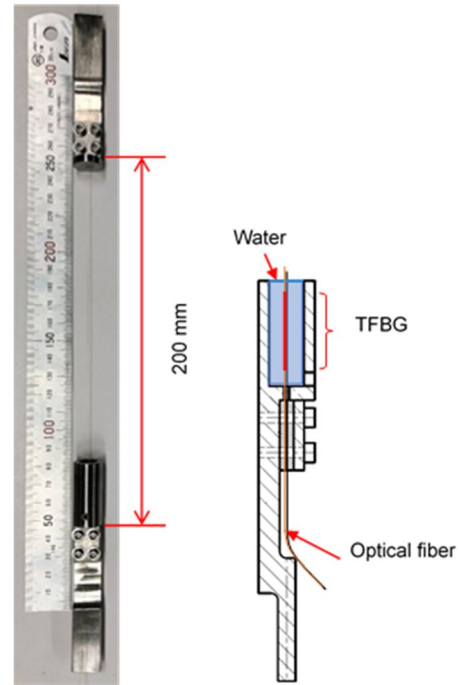


図2 TFBG センサの試験治具

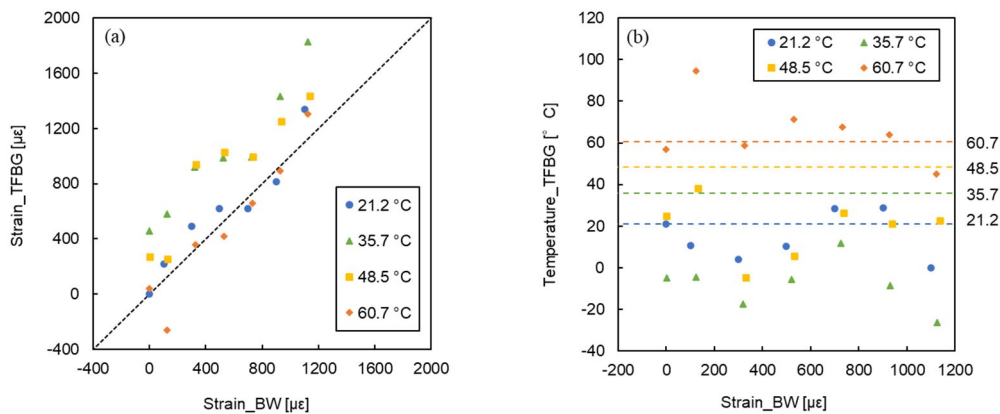


図3 クラディングモードの変化のみを用いた推定評価：(a)ひずみ, (b)温度

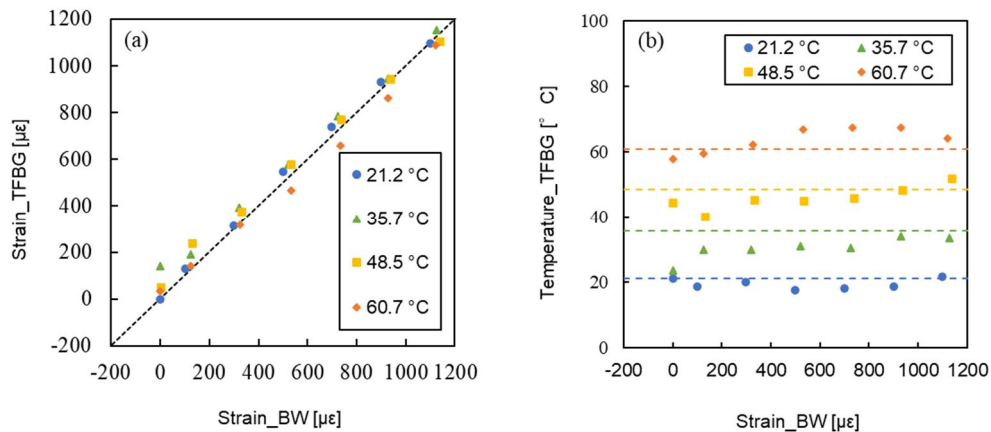


図4 提案手法により改善された推定評価：(a)ひずみ, (b)温度

TFBG センサを屈折率の異なる溶液に浸し、ひずみを付与して透過スペクトルを取得した。図5に示すようにひずみによってブラッグ波長はシフトし、屈折率変化でクラディングモードが大きく変化することが分かる。クラディングモードの包絡面積の変化を用いて評価することが過去の研究で提案されたが、解析コストが増大する。本研究ではクラディングモードの弧長 (Arc length) の変化を用いることで、解析コストを低減させつつ高精度で屈折率が評価できることを示した。また、予め屈折率と樹脂硬化度の関係を熱分析 DSC で取得しておくことで、熱硬化樹脂の成形プロセスで樹脂硬化度が定量的に評価できることも示した。図6に示すように、従来のフレネル型センサ (樹脂硬化度のみ評価可能でひずみは評価できない) と比較して、熱硬化樹脂の硬化度上昇にしたがって応答時のノイズが少ないこと、ひずみも同時に評価できることを実証した。

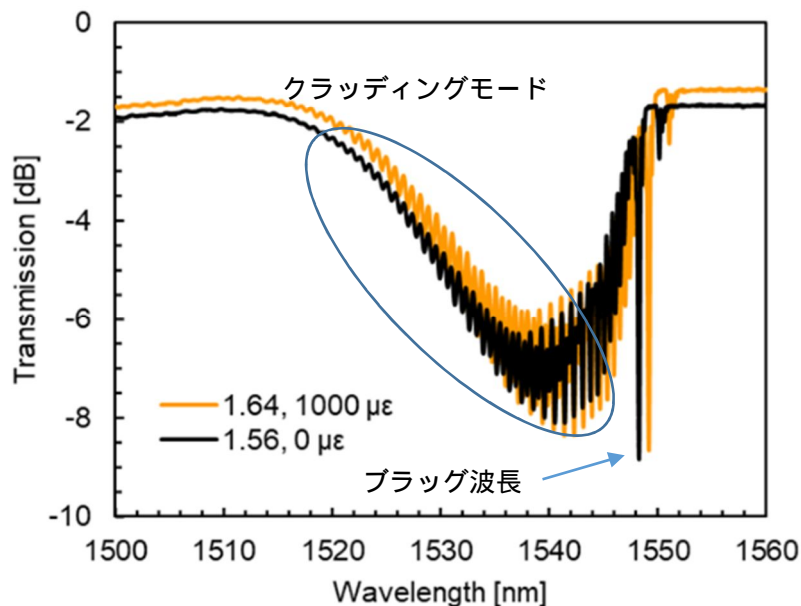


図5 TFBG センサで測定した透過スペクトル

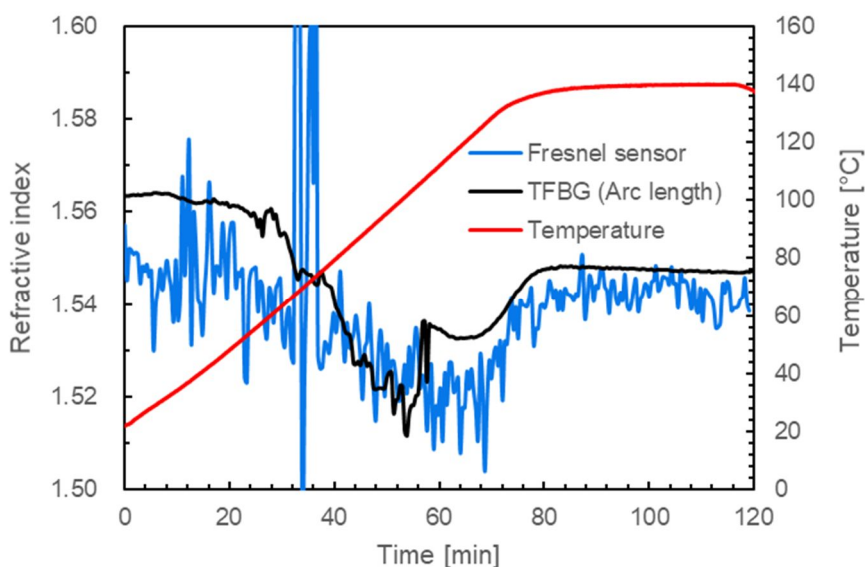


図6 熱硬化樹脂の硬化度変化に対する TFBG センサの応答

透過スペクトルを用いたひずみと温度の同時推定に対して機械学習を適用し、推定精度の向上を試みた。本研究では従来方式の交差感度法（TFBG センサの透過スペクトルが持つひずみ・温度の感度差を利用）、NN(LM algorithm)、NN(Bayesian regularization)およびSVRを始めとする各種学習手法と比較した。例えばひずみの精度をRMSEで評価した結果（図7参照）、温度の精度も同様に実施して表1として纏めた。Bayesian regularizationを用いた場合、温度およびひずみのRMSEはそれぞれ1.49°C、25.9 $\mu\epsilon$ となり、推定精度が大きく向上した。また、第一段階でひずみを推定し、第二段階で温度を推定するアルゴリズムを採用することで、温度環境の異なるデータが少ない場合でも精度良く推定できる可能性も示唆した。

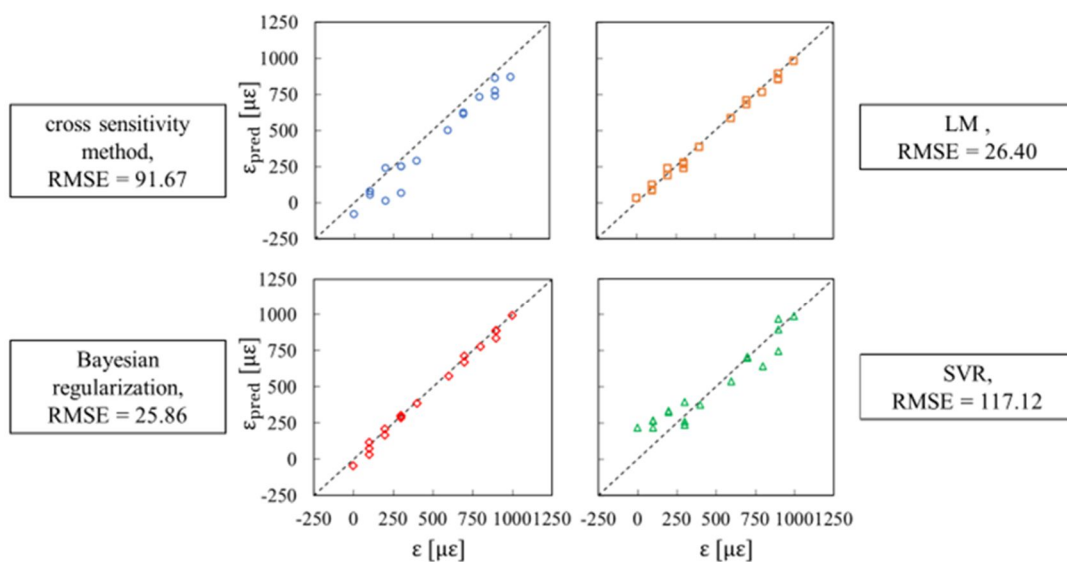


図7 TFBG センサの透過スペクトル情報を用いたひずみの推定精度

表1 ひずみ及び温度の推定精度の比較

Machine learning method	RMSE	
	Temperature (°C)	Strain ($\mu\epsilon$)
Cross-sensitivity method	6.23	91.7
Neural network (LM algorithm, 1 step)	11.5	26.4
Neural network (LM algorithm, 2 step)	2.31	
Neural network (Bayesian regularization)	1.49	25.9
SVR	2.80	117.1
Random forest regressor	15.6	200.5
Bagging regressor	16.0	207.1
Gradient boosting regressor	13.7	206.5
AdaBoost regressor	18.6	206.1

< 引用文献 >

- [1] Michael R. Wisnom et al., Journal of Composite Materials, 41(11), pp. 1311-1324, 2007
- [2] S. Minakuchi, S. Takeda et al., Composites Part A, 42(6), pp. 669-676, 2011
- [3] S Takeda, Y Aoki, Y Nagao, Composite structures, 79 (1), pp. 133-139, 2007
- [4] J.Albert et al., Laser Photonics Rev. 7, Vol. 1, pp. 83-108, 2013
- [5] Tuan Guo et. al, Optics & Laser Technology, Vol. 78, pp. 19-33, 2016

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Takeda Shin-ichi, Sato Masashi, Ogasawara Toshio	4. 巻 335
2. 論文標題 Simultaneous measurement of strain and temperature using a tilted fiber Bragg grating	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors and Actuators A: Physical	6. 最初と最後の頁 113346 ~ 113346
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.sna.2021.113346	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 Hirota Itsuhiko, Takeda Shin-ichi, Ogasawara Toshio	4. 巻 158
2. 論文標題 Evaluation of thermosetting resin curing using a tilted fiber Bragg grating	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Composites Part A: Applied Science and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 106956 ~ 106956
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.compositesa.2022.106956	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 Kikuchi Mikiko, Ogasawara Toshio, Shumpei Fujii, Takeda Shin-ichi	4. 巻 -
2. 論文標題 Application of machine learning for improved accuracy of simultaneous temperature and strain measurements of carbon fiber-reinforced plastic laminates using an embedded tilted fiber Bragg grating sensor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Composites Part A: Applied Science and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 -
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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 菊地美紀子、藤井駿平、武田真一、小笠原俊夫
2. 発表標題 傾斜型FBG センサ埋め込みによるCFRP の温度・ひずみ同時計測への機械学習の応用
3. 学会等名 第13回 日本複合材料会議（JCCM-13）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shumpei Fujii, Mikiko Kikuchi, Shin-ichi Takeda, Toshio Ogasawara
2. 発表標題 CURE AND STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF CFRP LAMINATE USING MULTI-FUNCTIONAL TILTED-FBG SENSOR
3. 学会等名 17th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤井駿平、菊地美紀子、武田真一、小笠原俊夫
2. 発表標題 傾斜型 FBG 光ファイバセンサによるCFRP 積層板の成形・構造モニタリング
3. 学会等名 日本機械学会 第 29 回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 広田逸彦、武田真一、小笠原俊夫
2. 発表標題 傾斜型FBGセンサを用いたリアルタイム計測に適したひずみ・屈折率同時計測手法の開発
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 藤井駿平、広田逸彦、武田真一、小笠原俊夫
2. 発表標題 TFBGセンサを用いたCFRP成形中の温度・ひずみ同時計測
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 広田逸彦、武田真一、小笠原俊夫
2. 発表標題 傾斜型FBGセンサを用いたCFRP積層板成形におけるひずみ・樹脂硬化度モニタリング
3. 学会等名 日本機械学会 第28回機械材料・材料加工技術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shunpei Fujii, Masashi Sato, Itsuhiko Hirota, Shin-ichi Takeda, Toshio Ogasawara
2. 発表標題 Concurrent measurement of temperature and strain during cure process of epoxy film adhesive using tilted FBG sensor
3. 学会等名 JISSE-16(16th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Itsuhiko Hirota, Masashi Sato, Shin-ichi Takeda, Toshio Ogasawara
2. 発表標題 Cure Process Monitoring for Carbon Fiber/Epoxy Composites Laminates Using Tilted FBG sensors
3. 学会等名 ASC 34th Technical Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>日本非破壊検査協会2020年度秋季講演大会 新進賞（優秀講演賞） 受賞者：広田逸彦（東京農工大学、工学府・博士前期課程 機械システム工学専攻2年）</p>
--

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	小笠原 俊夫 (Ogasawara Toshio) (20344244)	東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (12605)	

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