

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2022

課題番号：17K00659

研究課題名（和文）風力発電用ブレードの損傷モニタリングと磁性エラストマーによる振動エネルギー回収

研究課題名（英文）Damage Monitoring of Wind Turbine Blade and Development of Device for Vibration Energy Harvest Using Magnetic Elastomer

研究代表者

渋谷 嗣 (Shibuya, Yotsugi)

秋田大学・電動化システム共同研究センター・特別教授

研究者番号：00154261

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）：風力発電システムのヘルスマニタリングに適用のために磁性エラストマーの変形と電磁特性の関係を粒子レベルの微視的解析によって評価した。電気的負荷の変化に対する磁性エラストマーに関するFractional Calculus（分数階微分）を用いた粘弾性特性の同定結果から微視的、巨視的な力学特性評価の妥当性を明らかにした。また、実際の風力発電用のブレードを模擬した構造物について、構造のヘルスマニタリングのためにブレードにセンサを配置した損傷検出について検討を行った。さらに、構造のモニタリングシステムのエネルギー源として振動から変換される環境発電に着目し、振動エネルギー回収器の有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

再生可能エネルギーとして風力発電は世界的に注目され、風力エネルギーから効率的に発電量を確保するために、風力発電のタービン・ブレードはより大型化する傾向にある。特に、洋上風力発電はブレードの大型化とともに期待がさらに高まっている。洋上における保守点検は地上の風力発電と比較してもアクセスが難しいなどの問題があり、風力発電用ブレードの損傷モニタリングは社会的にも重要である。また、高度化された機器開発にはこれまでにない機能を有する材料創生が重要であり、その開発ツールとしての磁性エラストマーの評価法は、微視的、巨視的特性評価に基づく材料評価として学術的な意義がある。

研究成果の概要（英文）：By recent climate change, the structure may be subjected to mighty wind force. In order to minimize unanticipated damage, remote surveillance system is important to keep the structure healthy condition. Detection of damage in structures of the wind power system is considered to avoid such problems. First, micromechanical analysis is made for a magneto-rheological elastomer to develop functional material, and macroscopic behavior of the material is identified with fractional derivative model to design devices. Next, dynamic response of the wind turbine blade is investigated to detect damage by using CAE model. Mode shape of the structure can be estimated by response of sensors placed in the blade. The result makes detection of damage in the structure as easy understanding. To realize the system, electric power generation from vibration energy of the structure is demonstrated as an application of the magneto-rheological.

研究分野：機械工学

キーワード：損傷モニタリング 機能性材料 環境エネルギー回収

1. 研究開始当初の背景

風力発電用ブレードなどに関する大型構造のヘルスマonitoringを研究の対象として考える。風力発電システムは、出力を大きくするために風車ブレードが非常に大型化されている。また、近年の気候変動によって想定を超える負荷を受ける可能性もある。振動減衰のために比較的剛性の高いエラストマーに磁性粒子を分散した粘弾性減衰材料が機能性材料として注目されている。そこで、磁性エラストマーを用いてブレードの振動エネルギーを吸収し、自立した環境電源として活用することにより、無線送信機を内蔵した加速度センサを構造中に配置することによって、構造のヘルスマonitoringのために多くのセンサを配置し、データを収集することができる。そのセンサシステムの自立した環境電源の機器開発のために磁性エラストマーに着目する。磁性エラストマーの変形と電磁特性の関係を粒子レベルの微視力学的解析によって評価、電磁気的負荷の変化に対する磁性エラストマーの挙動についてFractional Calculus(分数階微分)を用いた同定、振動応答から固有モード形状の推定とそのモード形状に基づく損傷のモニタリング、磁性エラストマーを応用した振動エネルギー回収器についての検討が必要である。

2. 研究の目的

磁性エラストマーの変形と電磁特性の関係を粒子レベルの微視力学的解析によって評価する。この評価法を用いて、磁性エラストマーの変形と電磁誘導特性の関係を考慮した環境発電の設計法を検討する。柔軟に変形可能な磁性エラストマーを試料にして、電磁加振器を用いて過渡応答試験を行う。電気的負荷の変化に対する磁性エラストマーに関するFractional Calculus(分数階微分)を用いた粘弾性特性の同定結果から微視的、巨視的な力学特性評価の妥当性を明らかにする。また、風力発電用のブレードを模擬した構造物について、構造のヘルスマonitoringのためにブレードに加速度センサを配置して、振動応答から固有モード形状を推定し、モード形状の変化から損傷検出について検討を行う。

さらに、構造のモニタリングシステムのエネルギー源として振動から変換される環境発電に着目し、送信機を内蔵した加速度センサを適用した、構造の応答モニタリングシステムにおける電源供給システムが有効性を示す。

3. 研究の方法

(1) 粒子レベルの微視力学的解析

磁性粒子分散複合材料の磁気応答について検討するために、微視的な周期構造について、一辺の長さ l の立方体の単位セルを図1に示している。全体の磁気エネルギーから、応力 τ とひずみ γ の関係に関する磁気効果の寄与を求める。2つの i, j 番目粒子の磁気モーメントを m_i, m_j とすると、その相互作用エネルギー U_{ij} は次式のように書くことができる。

$$U_{ij} = -\frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3(m_i \cdot r_{ij})(m_j \cdot r_{ij}) - r_{ij}^2 m_i \cdot m_j}{r_{ij}^5} \right] \quad (1)$$

ここで、 μ_0 は真空の透磁率である。また、 r_{ij} は粒子 i から粒子 j に向かう相対位置ベクトルであり、 r_{ij} は粒子間距離である。外部磁場 H_0 によって励起される磁性粒子の磁気モーメント m_i を次式のように仮定する(文献)

$$m_i = \frac{1}{6} \pi d^3 \chi_e H_0 \quad (2)$$

ただし、 d は粒子の直径、 χ_e は複合材料の見かけの磁化率である。複合材料の電磁エネルギー密度 W_m は相互作用エネルギー U_{ij} の系全体の和として得られる。

(2) Fractional Calculus(分数階微分)を用いた粘弾性特性の同定

非線形粘弾性特性の同定のために図2に示す磁性エラストマーの周期的せん断変形を考える。非線形特性を精度よく同定するために次の分数階微分を用いた応力ひずみ関係を提案する。

$$\tau = \sum_{i=1}^M c_i \gamma^i + \sum_{j=1}^N \frac{d^q}{dt^q} \left(\sum_{i=1}^M d_{ij} \gamma^i \right) \quad (3)$$

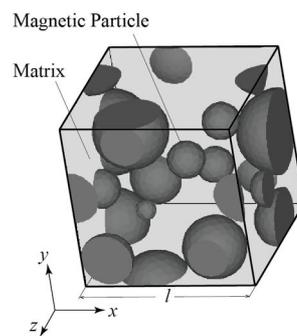


Fig. 1 Unit cell model.

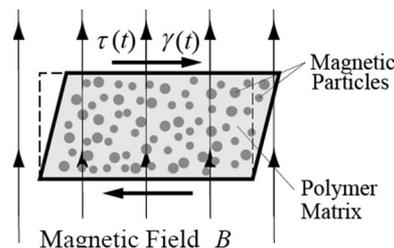


Fig. 2 Shear deformation in magnetic field.

ただし、 τ はせん断応力、 γ はせん断ひずみ、 t は時間である。また、 M はせん断ひずみに関する多項式の項数、 N は時間に関する分数階微分項の項数である。非整数 q_j ($0 < q_j < 1$) は分数階微分の階数である。係数 c_i と d_{ij} はそれぞれ弾性と粘性特性に関連する未知パラメータであり、実際の材料特性と調和するように決定されるものである。分数階微分を定義するために、次の Riemann-Liouville fractional integral (文献) を用いる。

$$D^{-\nu} \gamma(t) = \frac{1}{\Gamma(\nu)} \int_0^t (t-\xi)^{\nu-1} \gamma(\xi) d\xi, \quad (\nu > 0) \quad (4)$$

ただし、 $\nu (> 0)$ は非整数値、 $\Gamma(\cdot)$ は Gamma 関数である。上式を微分することにより分数階微分を以下のように定義することができる。

$$\frac{d^q}{dt^q} \gamma(t) = D[D^{-\nu} \gamma(t)] = D^{-\nu} [D\gamma(t)] + \frac{\gamma(0)}{\Gamma(\nu)} t^{\nu-1}, \quad (q = 1 - \nu, 0 < q < 1) \quad (5)$$

粘弾性特性の同定は、 P 個の応力ひずみデータからなるデータセットを用いて、最小二乗法を用いて次の関数 S を最小になるように、係数 c_i と d_{ij} を決定する。

$$S = \sum_{p=1}^P [\tau_p - \tau(t_p)]^2 = \sum_{p=1}^P \left[\tau_p - \sum_{i=1}^M c_i \gamma_p^i + \sum_{j=1}^N \frac{d^{q_j}}{dt^{q_j}} \left(\sum_{i=1}^M d_{ij} \gamma_p^i \right) \right]^2 \quad (6)$$

上式に含まれる分数階微分 ($0 < q_j < 1$) については、 $L1$ -algorithm (文献) を適用して、比較的容易に数値計算を実行することができる。

(3) 風車ブレードの損傷検出

風車ブレードの損傷検出を考えるために、図 3 に示したような風車に関する模擬モデルを想定する。構造物の振動応答に関する離散化した運動方程式は次のように記述することができる。

$$\mathbf{M} \frac{\partial^2 \mathbf{u}(t)}{\partial t^2} + \mathbf{C} \frac{\partial \mathbf{u}(t)}{\partial t} + \mathbf{K} \mathbf{u}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (7)$$

ここで、 \mathbf{M} は質量マトリックス、 \mathbf{C} 減衰マトリックス、 \mathbf{K} は剛性マトリックス、 $\mathbf{u}(t)$ は構造の応答変位ベクトル、 $\mathbf{f}(t)$ は任意の強制外力ベクトルである。運動方程式はフーリエ変換によって周波数領域に次のように変換することができる。

$$(-\omega^2 \mathbf{M} + i\omega \mathbf{C} + \mathbf{K}) \bar{\mathbf{u}}(\omega) = \bar{\mathbf{f}}(\omega) \quad (8)$$

ただし、 ω は角振動数である。微小振動の線形系では、任意の強制力に対する応答はインパルス応答の重ね合わせとして取り扱うことができる。したがって、外力によらず固有振動数 ω_{ri} 、固有モード変位 $\bar{\mathbf{u}}^*(\omega_{ri})$ は周波数応答のピーク周波数およびピーク値の分布として得ることができる。

(4) 振動エネルギー回収

磁性エラストマーを適用した振動エネルギー回収と振動減衰を目的とした振動エネルギー回収器の概略図を図 4 に示している。原理としては振動による磁束の変化によってコイルに起電力を発生させるものであるが、磁性エラストマーのせん断変形を利用して運動機構を単純化することができる。また、磁束密度をより高めるために磁性エラストマーを永久磁石の間に設置する。

4. 研究成果

(1) 粒子レベルの微視力学的解析

磁性エラストマーの特性を理論的に理解するために、図 1 に示した一辺 l の立方体の単位セル領域の中に 10 個の磁性粒子がランダムに分布させ、その他の空間をマトリックス樹脂で満たされた単位セルを作成した。このような単位セルが 3 つの方向に周期的に配列している微視力学モデルを用いて数値計算を行った。計算においては、単位セル内の 10 個の磁性粒子の平均直径は $3.8 \mu\text{m}$ 、単位セルの大きさは $l = 13.5 \mu\text{m}$ とした。

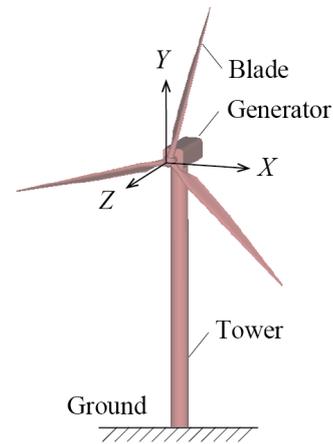


Fig. 3 CAE model of wind turbine generator.

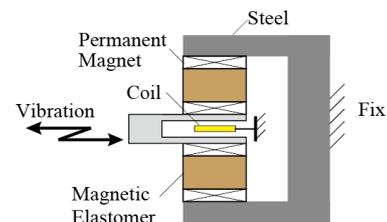


Fig. 4 Outline of electric generator from vibration.

図5は周期的なひずみ負荷における応力応答に対する磁気力の効果について、複合材料の見かけの磁化率 χ_e を変えて示したものである。ここでは、ひずみの付加変動に比較して粒子の磁化変動は十分早いものとして、周波数による影響を無視して考えている。図からひずみ負荷における応力応答は磁化率に対して大きく変化することがわかる。図6は周期的な応力ひずみ応答について、負荷の周波数を変えて示したものである。図から、周波数の増加とともに曲線の傾き及びループの面積が増加することがわかる。

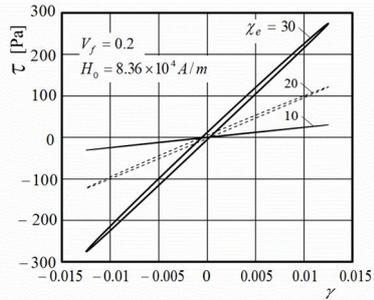


Fig. 5 Effect of magnetic force on stress-strain relation of composite.

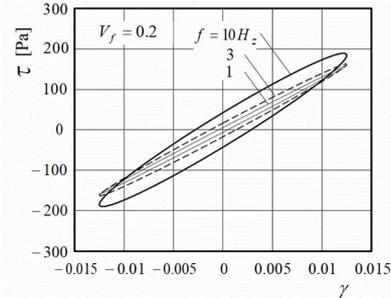


Fig. 6 Effect of viscoelastic resin on stress-strain relation of

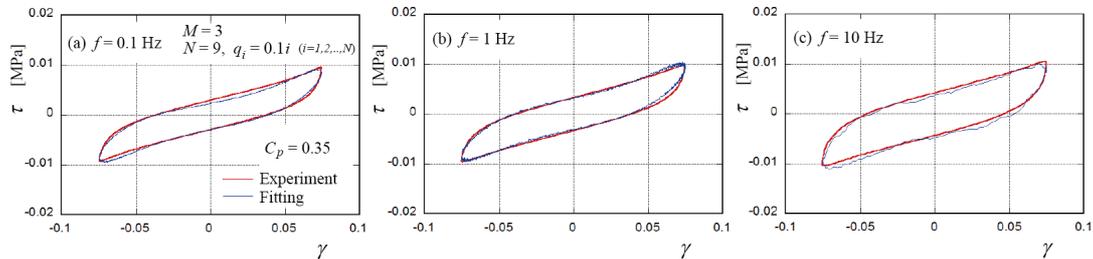


Fig. 7 Fitting result for wide frequency range with $M=3$ and $N=9$.

(2) Fractional Calculus (分数階微分) を用いた粘弾性特性の同定

非線形粘弾性特性について分数階微分モデルを用いて磁性エラストマーの周期的応力ひずみ関係の同定を行った。非整数の微分の階数 q_i ($0 < q_i < 1$) に対して、微分の項数を $N=9$ とし、 $q_i (i=1,2,\dots,9) = 0.1, 0.2, \dots, 0.9$ を採用した。また、せん断ひずみの多項式の項数を $M=3$ とした。同定の結果と実験結果の比較を図7(a), (b), (c)に示している。図において(a), (b), (c)はそれぞれ周波数が0.1Hz, 1Hz, 10Hzであるが、周波数によらず同定された非線形特性が実験結果とよく一致することがわかる。さらに、図8は磁性粒子の含有率を変えて、ヒステリシスループに囲まれた領域の面積に相当する減衰容量と周波数の関係について図7と同様の条件で同定の結果と実験結果を比較し

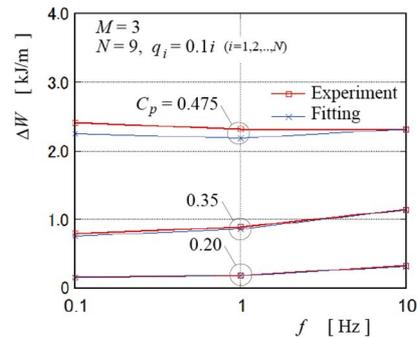


Fig. 8 Damping capacity with variation of particle volume fraction under

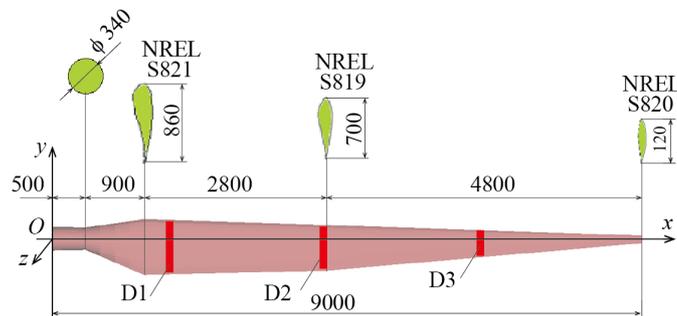


Fig. 9 Shape and dimension of wind turbine blade.

たものである。同定に使用したモデルは磁性粒子の含有率を変えた場合にも有効であることが理解できる。

(3) 風車ブレードの損傷検出

風車ブレードの損傷を検出するために図3に示した風車の模擬モデルから1つのブレードを対象として損傷検出の結果を示す。図9は対象とした模擬ブレードの形状寸法と座標系を示している。風車ブレードの形状寸法は文献を参考に長さは9mとした。また、翼形状は図に示した3つの断面について、それぞれNREL S821, S819, S820(文献)を採用し、その間は直線的に内挿した。材質は表面をGlass/Epoxy複合材料、内部にBalsa材を想定した。また、赤色で示した領域はバードストライクなどで損傷が生ずることを想定し、剛性低下として損傷を模擬した。基本的な応答特性を確認するために固有値解析をおこない、損傷のない風車ブレードの固有振動数、固有振動モード形状を図10に示している。また、D1, D2, D3の領域に損傷がある場合を含めて、固有振動数を表1にまとめて示している。表に示されているように損傷によって風車ブレードの剛性低下によって固有振動数が変化することから、風車ブレードのx軸上に配置したセンサの応答から損傷を検出できると考える。その一例としてD2の領域に損傷がある場合について1次と3次応答に相当する周波数スペクトルのピーク値から推定させる固有モード形状を正規化して図11に示す。図において、印はセンサにより周波数スペクトルを取得した点を表している。ブレードの振動周波数スペクトルからモード形状を再現できることから、損傷の位置推定に関しては文献の手法の適用が可能になる。

(4) 振動エネルギー回収

振動エネルギー回収試験として、図4に示した振動エネルギー回収器を用いて振動加振部分に正弦波状の周期振動を与え、コイルと負荷抵抗(324)からなる回路を形成し、抵抗電極間の電圧を計測した。負荷抵抗をその結果が図12に示されている。図において横軸は、周波数と時間の積として無次元に正規化して表している。加振周波数に対応した起電力電圧が計測されていることから、エネルギー回収器として機能していることが確認された。

<引用文献>

- Sherman, S.G., Paley, D.A., Wereley, N.M., Massively Parallel Simulation of Chain Formation and Restructuring Dynamics in a Magnetorheological Fluid, Proc. ASME Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, SMASIS2011-5188, (2011).
- Miller, K. S., and Ross, B. (1993). An Introduction to the Fractional Calculus and Fractional Differential Equations, John Wiley & Sons, (1993).
- Oldham, K and Spanier, J., The Fractional Calculus, Dover, New York, (2006).
- Bazilevs, Y., Korobenko, A., Deng, X., Yan, J., Fluid-Structure Interaction Modeling for Fatigue-Damage Prediction in Full-Scale Wind-Turbine Blades, Trans. ASME J. Applied Mechanics, 2016, 83, (2016), 061010-1.
- Tangler, J.M and Somers, D.M., NREL Airfoil Families for HAWTs, NEREL/TP-442-7109, (1995).
- Shibuya, Y., Damage Detection of Large Space Structures Using Mode Shapes Estimated from Transient Responses, Proc. ACMFMS2012, (2012), 295-298.

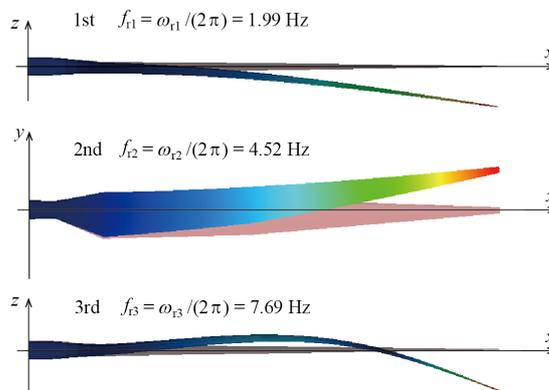


Fig. 10 Eigen value problem of wind turbine blade.

Table 1 Effect of damage on resonant frequency

	1 st [Hz]	2 nd [Hz]	3 rd [Hz]
No damage	1.99	4.52	7.69
D1 damage	1.79	4.41	7.56
D2 damage	1.91	4.49	7.38
D3 damage	1.98	4.51	7.30

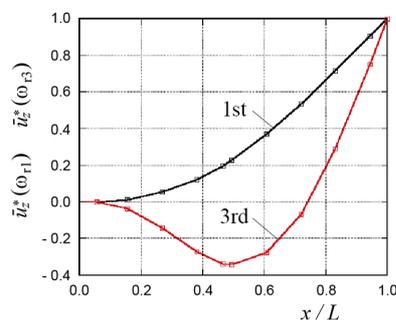


Fig. 11 Estimation of eigen mode shape from frequency spectrum.

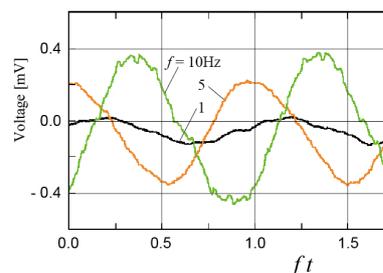


Fig. 12 Output voltage of vibration generator.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 渋谷 嗣
2. 発表標題 Fractional Calculus を使った複合材料のモデル化と特性評価
3. 学会等名 日本複合材料学会 第45回複合材料シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shibuya, Yotsugi
2. 発表標題 Viscoelastic Behavior of Particle Reinforced Elastomers under Harmonic Shear Loading
3. 学会等名 The 7th Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures (ACMFMS2020+1) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渋谷 嗣
2. 発表標題 熱可塑性炭素繊維複合材料の粘弾性特性評価
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 揚, 渋谷 嗣, 小宮山 剛
2. 発表標題 磁性粒子分散複合材料の磁場中の粘弾性応答における微視構造の影響
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 Yotsugi Shibuya and Kazuya Ito
2. 発表標題 Simulation of Multiple Interlaminar Cracks and Delamination in CFRP Laminated Plates with a Hole
3. 学会等名 The 13th China-Japan Joint Conference on Composite Materials, Lanzhou China (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yotsugi Shibuya
2. 発表標題 Identification of Nonlinear Damping Properties of Magneto-Rheological Composites Based on Fractional Derivative Model
3. 学会等名 The 6th Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures, Tainan Taiwan (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 渋谷 嗣, 三浦 正知
2. 発表標題 磁性粒子分散複合材料の磁場中における振動特性の解析
3. 学会等名 第42回複合材料シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 渋谷 嗣
2. 発表標題 分数階微分に基づく熱可塑性樹脂のモデルを用いた炭素繊維複合材料の特性評価
3. 学会等名 日本機械学会東北支部第53期秋季講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yotsugi Shibuya
2. 発表標題 Identification of Nonlinear Damping Properties of Magneto-Rheological Composites based on Fractional Derivative Model
3. 学会等名 The 6th Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures (国際学会)
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
---------	---------