

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420207

研究課題名(和文) 機能性ゲルを用いた自己センシング制振と精密機器への応用に関する研究

研究課題名(英文) Self-Sensing and Damping Using Functional Gels for Application to Precision Mechanical Equipment

研究代表者

渋谷 嗣 (Shibuya, Yotsugi)

秋田大学・理工学研究科・教授

研究者番号：00154261

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：機能性ゲルの自己センシングと制振特性評価のため導電性粒子や磁性粒子の機能性粒子を分散した導電性ゲルと磁性ゲルを対象として研究を行った。導電性ゲルの機械・電気的特性を評価し自己センシングのためのひずみセンサとしての特性を調べた。その自己センシングとして、複合構造の損傷モニタリングのためのセンサ網を配置に適用し、損傷に伴う急激なひずみの変化のモニタリングを可能にした。磁性ゲルを対象とし、Fractional Calculusを適用し、磁性ゲルの非線形特性について周波数特性の同定モデルを提案した。磁性ゲルの微視的力学的モデルに基づくモデルで評価し、粘弾性と電磁の相互効果の存在の可能性を示唆した。

研究成果の概要(英文)：Conductive gels and magneto-rheological gels are investigated to clarify possibility as functional gels for self-sensing and damping. The conductive gel is one of candidates for strain sensor. Damage detection on a composite structure with a hole is performed to make validation of the sensor network with the conductive gel. A fractional calculus model is proposed to evaluate nonlinear rheological properties of the gel under magnetic fields. Properties of the gel are evaluated on the basis of micromechanical model. It is suggested that other interaction between viscoelastic and magnetic effects exists in the phenomenon.

研究分野：材料力学

キーワード：機能性材料 粘弾性 Fractional Calculus 動的応答 非線形特性

## 1. 研究開始当初の背景

最新の半導体デバイスの配線幅が数十 nm に達しており、今後も高密度化や省エネルギー化の要求からさらに半導体デバイスの微細化が進むと予測されている。磁気媒体や半導体デバイスの評価のために、圧電素子を用いた高速・高精度の微動アクチュエータや制御法を考案されてきた。その技術を用いた動作範囲  $50 \mu\text{m}$ 、1 次共振周波数  $5\text{kHz}$  タイプの圧電型微動アクチュエータが 99.7% の確率で  $0.315\text{nm}$  の範囲に位置決めできる結果を得られている<sup>(1)</sup>。さらに、この微動アクチュエータを x-y の 2 軸に拡張した平面位置決め装置を提案し、従来の装置より格段に高速動作可能な走査ステージとして、プローブ顕微鏡や半導体検査装置への応用を目指している。

一方、半導体ウエハは大口径になり、検査装置の走査範囲も大きくなる問題がある。このような大きな機械システムを動的に安定化し高精度に位置決めすることは非常に難しい問題となっている。高精度位置決めを達成するために、材料の粘弾性変形により柔軟にしかも摩擦無しに振動を減衰することにより、アクチュエータの動的安定性を高めることが期待できる。また、圧電素子はヒステリシス特性を有するため高価な変位センサを用いてフィードバック制御を行う必要がある。そこで、粘弾性ゲルの変形をセンシングできるように機能性粒子を分散したゲルの適用の可能性について検討する必要がある。本研究では導電性や磁性などの機能性粒子を分散したセンシング機能を有する粘弾性ゲルについて、その特性を Fractional Calculus (分数階微分) を用いて評価する。また、センシング機能を有する粘弾性ゲルを適用した制振特性について検討することとした。

## 2. 研究の目的

機能性ゲルの自己センシングと制振特性評価のため導電性粒子や磁性粒子の機能性粒子を分散した導電性ゲルと磁性ゲルを対象として次の 4 つの項目に着目して研究を行った。

第 1 の項目として導電性ゲルの特性評価を行った。導電性ゲルの機械・電気的特性評価のため微動アクチュエータによる導電性ゲルの変形と電気抵抗変化による応答から自己センシングのためのひずみセンサとしての特性を調べる。

第 2 の項目として導電性シリコンを用いた自己センシングの適用として、複合構造の損傷モニタリングのためのセンサ網を配置に適用し、損傷に伴う急激なひずみの変化のモニタリングを行う。

第 3 の項目として磁性ゲルの非線形同定を行う。機能性ゲルの別の系としてアクティブ・セミアクティブダンパとして応用が期待されている磁性ゲルを対象とし、磁場の増加とともに剛性や減衰および非線形性が大き

くなる複雑な性質を示すことから、Fractional Calculus (分数階微分) を適用し、巨視的な特性評価の観点から周波数特性の同定モデルを検討する。

第 4 の項目として第 3 の項目で巨視的観点からの検討の対比として、磁性ゲルの微視的力学的評価に基づくモデルを提案する。

## 3. 研究の方法

### 3.1 導電性ゲルの特性評価

導電性ゲルの機械・電気的特性評価のために図 1 示すような変位拡大機構<sup>(2)</sup>を有する動作変位  $500 \mu\text{m}$  の圧電型 Nano-Motion Actuator (NMA) を設計製作した。NMA は A, B, C の部分が弾性ヒンジであり、積層型圧電素子 (PZT) の微小な変形を A 部の弾性ヒンジを中心として回転し、弾性ヒンジ間距離  $a$  と  $b$  の比として変位拡大され、D 部が平行に矢印の方向に変位する。なお、図に示した NMA は有限要素解析によって特性を評価し、圧電素子に印可電圧が  $150\text{V}$  のときに動作変位  $500 \mu\text{m}$  になるように  $b/a$  は約 7.8 としている。

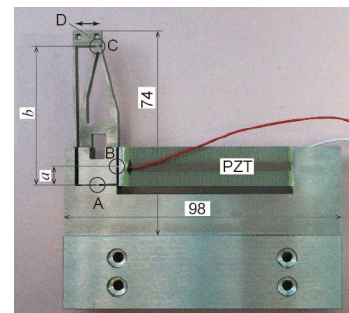


Fig. 1 Structure and dimension of Nano-motion Actuator.

図 2 は導電性ゲルの機械・電気的特性評価の実験の概略を示している。2 つの電極間に寸法  $10\text{mm} \times 6\text{mm} \times 0.5\text{mm}$  の導電性ゲルの試料を設置し、NMA で加振してせん断変形を与えると同時に、NMA の変位および荷重をそれぞれレーザー変位計と荷重計で計測する。

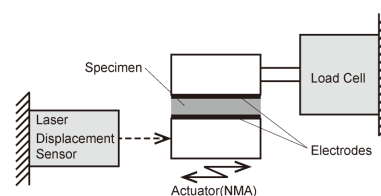


Fig. 2 Outline of measurement.

### 3.2 導電性シリコンのセンシング効果

図 3 に示すように内部に線状の導電性シリコンによる電気回路を有する試料を用いて引張試験における導電性シリコンの抵抗変化とひずみの関係を調べた。試料は Glass/Epoxy の GFRP を基板とし、試料の長手方向に 2 本の導電性シリコンを配置した GFPP のサンドイッチ構造を作製した。また、

引張試験時において導電性シリコンの電気特性を計測するために1から10の番号を付した10個の電極端子を設置し、端子1と10の間に一定の電流を加え、端子2から9の電位を測定した。

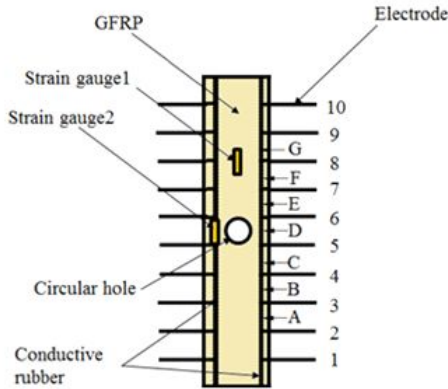


Fig.3 Configuration of the specimen.

### 3.3 磁性ゲルの非線形同定

磁場によって特性が変化する磁性ゲルの非線形特性を同定するために、Fractional Calculus (分数階微積分) に基づく定式化を行った。

せん断変形において、非線形の応ひずみ関係を次のように書くことができる。

$$\tau(t) = K[\gamma(t)]\gamma(t) + C[\gamma(t)] \frac{d^q \gamma(t)}{dt^q} \quad (1)$$

ただし、 $\tau$  はせん断応力、 $\gamma$  はせん断ひずみ、 $t$  は時間である。また、 $q$  ( $0 < q < 1$ ) は非整数の微分のオーダーである。それぞれの係数  $K[\gamma(t)]$ 、 $C[\gamma(t)]$  はひずみに関する項数  $N$  のべき級数で次式のように仮定する。

$$K[\gamma(t)] = \sum_{n=0}^N k_n [\gamma(t)]^n \quad (2)$$

$$C[\gamma(t)] = \sum_{n=0}^N d_n \left\| [D^{-v} \gamma(t)]^n \right\| \quad (3)$$

ここで、 $k_n$ 、 $d_n$  は磁性ゲルの特性に関する同定によって定まる未知係数である。また、 $\|\cdot\|$  は関数の絶対値である。分数階積分の一つとして、関数  $f(t)$  の Riemann-Liouville の定義が以下のように与えられている<sup>(3)</sup>。

$$D^{-v} f(t) = \frac{1}{\Gamma(v)} \int_0^t (t-\xi)^{v-1} f(\xi) d\xi, \quad (0 < v < 1) \quad (4)$$

上式を微分すると、非整数の分数階微分を次のように定義することができる。

$$\begin{aligned} \frac{d^q}{dt^q} f(t) &= D[D^{-v} f(t)] \\ &= D^{-v} [D f(t)] + \frac{f(0)}{\Gamma(v)} t^{v-1}, \\ &\quad (q = 1 - v, 0 < q < 1) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} D^q f(t) &= \frac{d^q f(t)}{dt^q} \\ &= \frac{1}{\Gamma(1-q)} \int_0^t \frac{d}{dt} \left[ \frac{f(\xi)}{(t-\xi)^q} \right] d\xi + \frac{t^{-q}}{\Gamma(1-q)} \end{aligned} \quad (6)$$

磁性ゲルの周波数応答特性を調べるために、調和関  $f(t) = e^{i\omega t}$  の非整数の分数階積分  $D^{-v} f(t)$  ( $0 < v < 1$ )、と分数階微分  $D^q f(t)$  ( $0 < q < 1$ )、を時間が十分経過した場合について調べると、以下のように得ることができる。

$$D^{-v} e^{i\omega t} \Big|_{t \rightarrow \infty} = \omega^{-v} e^{i(\omega t - \pi v/2)} \quad (7)$$

$$D^q e^{i\omega t} \Big|_{t \rightarrow \infty} = \omega^q e^{i\omega(t + \pi q/2)} \quad (8)$$

したがって、調和関数においては分数階の微積分は上式に示すように同様に扱うことができる。

### 3.4 磁性ゲルの微視モデルに基づく評価

磁性ゲルに関して、図4に示すような微視的、巨視的モデルを考える。磁性ゲルは外部磁場が作用すると、磁場の強さに応じた粒子間の引力によって外力なしに圧縮されている。微視構造の周期モデルから単位セルを考え、単位セルに対するせん断変形挙動について調べる。

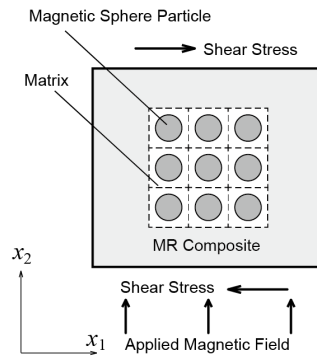


Fig.4 Realistic micro-structural model of MR composite for shear test in magnetic field.

超弾性を示す等方性材料に対して、構成関係を得るためにひずみエネルギー密度関数について考える。ひずみエネルギー密度関数は三つの不変量 ( $I_1, I_2, I_3$ ) や主伸長比 ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ) の関数として次のように与えることができる。

$$W = W(I_1, I_2, I_3) = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (9)$$

右 Cauchy-Green テンソル  $C$  と変形勾配テンソル  $F$  との関係、および Green-Lagrange ひずみテンソル  $E$  は以下のように定義されている。

$$C = F^T F, \quad E = \frac{1}{2}(C - I) \quad (10)$$

超弾性問題において、応力はひずみエネルギー密度関数から次のように導かれる<sup>(4)</sup>。

$$S = \frac{\partial W}{\partial E} = 2 \frac{\partial W}{\partial C} \quad (11)$$

$$\sigma = \frac{1}{J} F^T S F, \quad P = J F^{-1} \sigma \quad (12)$$

ただし、

$$J = \det(F) \quad (13)$$

ここで、 $S$  は第 2 種 Piola-Kirchhoff の応力テンソル、 $\sigma$  は Cauchy 応力テンソル、 $P$  は第 1 種 Piola-Kirchhoff の応力テンソルである。

有限要素法に基づく数値計算においては超弾性と粘弾性の成分に分離し、粘弾性成分については以下のように指数関数級数で記述する。

$$\begin{aligned} W &= W_\infty + \sum_{n=1}^N W_n \exp(-t/t_n) \\ &= W_0 [\delta_0 + \sum_{n=1}^N \delta_n \exp(-t/t_n)] , \\ \delta_0 + \sum_{n=1}^N \delta_n &= 1 \end{aligned} \quad (14)$$

ただし、 $t$  は時間、 $t_n (n=1 \dots N)$  は時定数である。また、超弾性成分  $W_0$  については等容変形項  $W_0^{dev}$  と体積変形項  $W_0^{vol}$  に分けて次のように考える。

$$W_0 = W_0^{dev} + W_0^{vol} \quad (15)$$

ここでは、等容変形項  $W_0^{dev}$  に Ogden モデルを用いて次のようにあらわす。

$$W_0^{dev} = \sum_{k=1}^M \frac{\mu_k}{\alpha_k} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_k} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_k} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_k} - 3) \quad (16)$$

$$\text{ただし、} \quad \bar{\lambda}_i = J^{-\frac{1}{3}} \lambda_i, \quad (i=1,2,3)$$

体積変形項  $W_0^{vol}$  のひずみエネルギー密度関数は以下のように与えられている。

$$W_0^{vol} = \frac{9K}{2} (J^{-\frac{1}{3}} - 1)^2 \quad (17)$$

ただし、 $K$  は体積弾性係数である。

## 4. 研究成果

### 4.1 導電性ゲルの特性評価

導電性ゲルの特性評価に用いた Nano-Motion Actuator (NMA) の静特性について図 5 に示している。縦軸が NMA の D 部分の拡大変位  $u_D$ 、横軸が圧電素子に加えられた入力電圧  $E_p$  を示している。圧電素子のヒステリシス効果により、入力電圧の上昇行程と降下行程におけるヒステリシスが生じているが、入力電圧 150V における拡大変位は  $523 \mu\text{m}$  に達し

ており、目標の  $500 \mu\text{m}$  を超える変位が得られた。図 6 は NMA の周波数応答特性を示したものである。グラフの目盛りはゲインが左側、位相が右側の縦軸に示している。この結果から 1 次の共振周波数は  $1584\text{Hz}$  であり、十分に高い周波数特性を示していることがわかる。

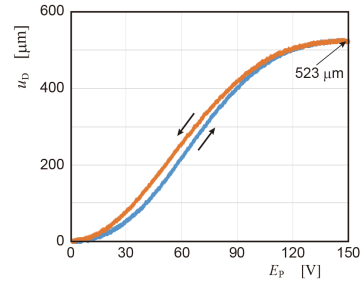


Fig. 5 Hysteresis of magnified displacement.

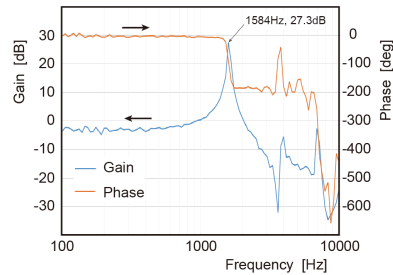


Fig. 6 Frequency response of NMA.

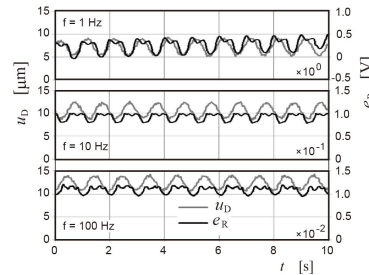


Fig. 7 Relation between displacement and output of conductive gel sensor.

次に、この NMA を用いて導電性ゲルのせん断応答特性試験を行った。図 7 に導電性ゲルのせん断変形と電気抵抗の関係を見るために、加振周波数 1Hz、10Hz、100Hz の場合について NMA アクチュエータの変位  $u_D$  と電気計測信号電圧  $e_R$  との関係を示したものである。NMA の圧電素子に対する正弦波の入力信号に対して電気抵抗に関する波形は変位が大きくなるにしたがって飽和する傾向にあり、周波数が高くなるにしたがってその傾向は顕著になることがわかる。しかし、変位の小さいところでは、NMA の変位と相似な傾向を示していることがわかる。

### 4.2 導電性シリコンのセンシング効果

試料に引張荷重を適用し、最終破断にいたるまでの導電性シリコンの電極間の電気抵抗変化を計測した。図 8 は試料が最終破断にいたるまでの円孔部分に相当する区間 D (図 3 参照) における導電性シリコンの抵抗変化率とひずみの関係を示している。また、図 9

に区間 A から G ( 図 3 参照 ) における導電性シリコンの抵抗変化率と試験機のクロスヘッドのストロークとの関係を示したものである。電極間の抵抗変化率  $\Delta R/R_0$  は変形前の電極間抵抗  $R_0$  からの抵抗変化  $\Delta R$  と変形前の抵抗との比として示している。円孔部に相当する区間 D の抵抗変化率は、ストロークが 2.5mm 付近までは他の領域と同様に線形的に変化するが、その後、変化が大きくなり、最終破断直前で急激に上昇し、破断にいたっている。したがって、平行部の抵抗変化率と円孔部の抵抗変化率を比較することによって、円孔部の抵抗の異常な変化を検出し、損傷の発生をモニターできることが期待できる。

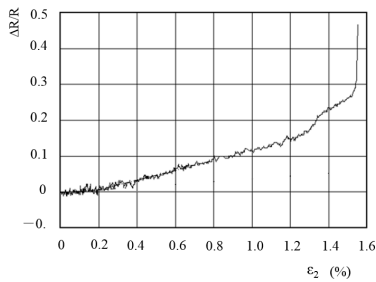


Fig. 8 Relation of specific electrical resistance and strain at region D.

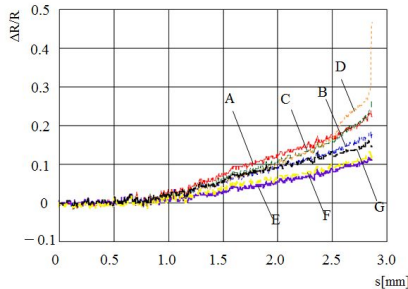


Fig. 9 Variation of specific electrical resistance between electrodes.

#### 4.3 磁性ゲルの同定

磁性ゲルは磁場の強さにより剛性や減衰容量が変化することから、スマート材料として期待されている。図 10 はシリコンゲルに Fe-Si-Ni 系の磁性粒子を体積割合 35% 含む磁性ゲルに磁場の強さを変えて、1Hz の周波数で加振した場合に、実験的に計測されたせん断変形における応力ひずみ関係を示している。線形の場合は、ヒステリシスループが楕円となり、傾きが大きいほど剛性が高いことを意味している。また、ヒステリシスループに囲まれた面積が大きいほど減衰容量が大きいことをあらわしている。図から磁束密度が大きいほど、剛性、減衰容量が大きく、また、非線形性も顕著になることがわかる。

前章で示した Fractional Calculus に基づくモデル化を行い、磁性ゲルの非線形特性の同定を行った。同定は、式(1)-(3)の定式に基づいて、最小二乗法で未知係数  $k_n$  ,  $d_n$  を決定した。

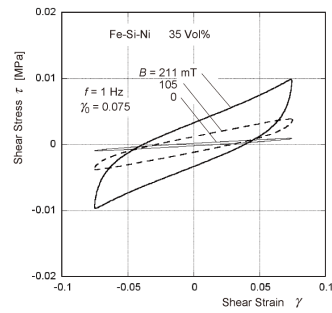


Fig. 10 Effect of the magnetic flux density on the stress strain relation.

図 11, 12 は磁性粒子の体積含有率が 20% と 35% の磁性ゲルについて、磁束密度  $B = 211$  mT の磁場中でひずみ振幅  $\gamma_0 = 0.075$ 、周波数 1Hz と 10Hz の正弦波状に加振した場合のせん断変形における応力ひずみに関するヒステリシスループを示した。実線が実験による測定値、破線が同定値である。非線形性を示す場合にも、同一パラメーターで周波数の異なる周波数においても測定値と同定値が比較的良好に一致している。粒子含有率が大きくなるほどヒステリシスループが楕円形状からの変化がより大きくなり、非線形特性が顕著になることが理解できる。

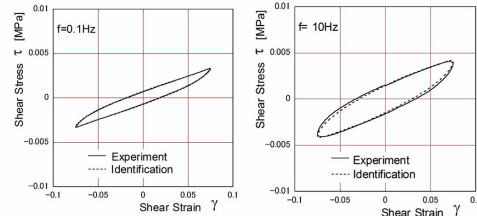


Fig. 11 Identified stress strain relation in case of Fe-Si-Ni type 20% Vol.

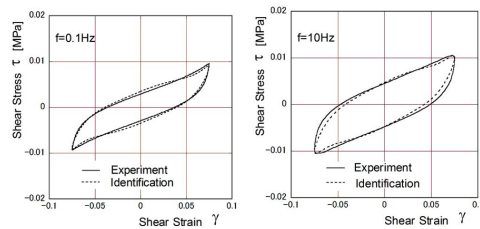


Fig. 12 Identified stress strain relation in case of Fe-Si-Ni type 35% Vol.

#### 4.4 磁性ゲルの微視モデルに基づく評価

前節の巨視的レベルからの特性の同定に対して、磁性ゲルの特性発現のメカニズムを理解するために、シリコンゲルを超弾性体として取り扱った。球状の磁性粒子が周期的配列していると仮定し、微視モデルに基づく磁性粒子を含むユニットセルの 3 次元有限要素解析を行った。微視モデルの解析においては磁性粒子のヤング率  $E_p = 200$  GPa , ポアソン比  $\nu_p = 0.3$  とした。また、式(14) - (17)に示された Ogden モデルに基づく超弾性・粘弾性体の材料パラメーターはシリコンゲルの実験から決定した。

図 13 は磁性粒子の体積含有率 35% の磁性ゲルに対して磁場がない場合 ( $B = 0$ ) と磁

束密度  $B = 211 \text{ mT}$  の場合について、せん断変形における応力ひずみに関するヒステリシスループを計算値と測定値を比較して示したものである。図において計算値は実線、測定値は破線で示している。磁場がない場合について、計算値と実験値を比較すると傾きはほぼ同等であるが、ループに囲まれた面積が計算値のほうが大きいことから、シリコンゲルの減衰容量を少し大きく見積もっている可能性がある。一方、磁束密度  $B = 211 \text{ mT}$  の場合には、シリコンゲルの減衰容量を少し大きく見積もられているにもかかわらず、推定された特性は測定値のほうがループに囲まれた面積が計算値より大きい。このように、ヒステリシスループにおける減衰特性が磁場の有無によって異なる予測結果が得られることは、磁性ゲルの磁場下での減衰特性は母材の特性と磁気に関する別の相互作用が存在することを示唆している。

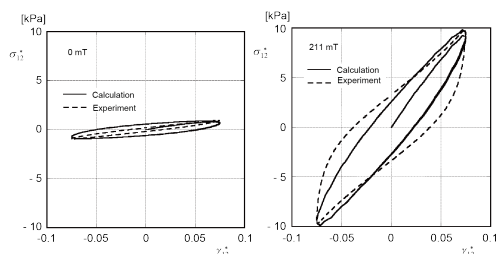


Fig. 13 Stress strain relation for the magnetic fields  $B = 0 \text{ mT}$  and  $211 \text{ mT}$ .

#### < 引用文献 >

- S. Mori, et al., Nano-Motion Actuator with Large Working Tracking Following, *Microsyst. Technol*, Vol.13 (2007), pp.873-881.  
 渋谷 嗣, 森 英樹, 長縄明大, 大日方五郎, 変位拡大装置, 特許 5025949 (2012).  
 K.S. Miller and B. Ross, *An Introduction to Fractional Calculus and Fractional Differential Equations*, (1993), John Wiley & Sons.  
 久田俊明, 野口裕之, 非線形有限要素法の基礎と応用, (1995), 丸善.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 0 件)

[学会発表](計 7 件)

- Y. Shibuya, Viscoelastic Homogenization Approach for Creep Compliance of Carbon Fiber Reinforced Composites Using Fractional Calculus, The National Science and Technology Conference on Mechanical

Transportation Engineering (NSCMT 2016) (Hanoi, Vietnam), 2016 年 10 月 13 日.

坪田竹志, 渋谷 嗣, 円孔近傍に損傷を有する複合材料の損傷検出のためのひずみ応答解析, 日本機械学会東北支部第 52 期秋季講演会(秋田), 2016 年 9 月 17 日.

Y. Shibuya, Fractional Derivative Model of Polymer Matrix for Evaluation of Creep Properties of CFRP, The 12<sup>th</sup> China-Japan Joint Conference on Composite Materials (Kochi, Japan), 2016 年 9 月 14 日 - 18 日.

Y. Shibuya and K. Sunakoda, Evaluation of Nonlinear Damping Properties of Magneto-Rheological Gels Using Fractional Calculus, The ASME 2015 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems (Colorado Springs, USA), 2015 年 9 月 21 日 - 23 日.

Y. Shibuya, H. Nasuno and K. Sunakoda, Micro-Structural Model of Magneto-Rheological Composites with Magnetically Induced Stress for Harmonic Shear Deformation, The ASME 2014 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems (Newport, USA), 2014 年 9 月 8 日 - 10 日.

渋谷 嗣, 山脇崇平, 導電性シリコンゴムを用いた複合構造の損傷モニタリング, 第 39 回複合材料シンポジウム(秋田), 2014 年 9 月 18 日 - 19 日.

渋谷 嗣, 山脇崇平, ひずみ分布検出のための導電性エラストマーの電気特性評価, 日本機械学会 M&M2014 材料力学カンファレンス(福島), 2014 年 7 月 18 日 - 21 日.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

渋谷 嗣 (SHIBUYA, Yotsugi)

秋田大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 00154261

##### (2) 研究分担者 なし

##### (3) 連携研究者 なし

##### (4) 研究協力者 なし