

Fe-Co 系磁歪合金を用いた 複合材料の振動・衝撃発電特性

成田 史生*

1. はじめに

あらゆるモノがインターネットにつながる IoT (Internet of Things: モノのインターネット) が全世界に破壊的イノベーションをもたらそうとしている。設備や機器にセンサ (目・耳) が搭載され、アナログ情報がデジタルデータとして可視化された後、インターネットを経由してクラウド上に蓄積され、分析される。そして、分析された情報は、最適化され、アクチュエータ (手・足) によって現実世界にフィードバックされる。これにより、品質・効率・生産性の向上や新しい価値・サービスの創出が可能となり、人々の生活が大きく変わろうとしている。一方、センサの数は、今後爆発的な勢いで増えることが予想され、2030年には1兆個に達するといわれている⁽¹⁾。センサの駆動やデータの通信には、数 μ ~mW 程度の電力が必要であるが、1兆個レベルのセンサに電池を使用する場合は、環境、資源およびコストの面で極めて大きな社会問題となる。このため、自然界環境に広く存在する未利用のエネルギー (振動、熱、光、電波など) から電力を回収するエネルギーハーベスティング (環境発電) が注目を集め⁽²⁾、センサ駆動・データ通信用電力としての利用が期待されている。

エネルギーハーベスティング材料として有望な圧電セラミックスは、脆く、また、絶縁体であるため、振動で得られる電圧が大きくても電流が小さく、大きな電力は得られない現状にある。また、チタン酸ジルコン酸鉛 (PZT) 系圧電セラミックスには、有害物質 (鉛) が含まれているため、環境問題上、非鉛系圧電材料の開発が要望されている⁽³⁾。一方、超磁歪特性を示す Tb-Dy-Fe 合金 (Terfenol-D) や Fe-Ga 合金 (Galfenol) がエネルギーハーベスティング材料として注目さ

れ、盛んに研究が進められている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。また、スパッタ法により Fe-Co 薄膜⁽⁶⁾が、鍛造・冷間加工によって Fe-Co 合金⁽⁷⁾が開発され、磁歪特性に及ぼす熱処理などの影響が検討されている。さらに、センサへの応用を目指し、Fe-Ga/Fe-Co 積層材料⁽⁸⁾、AlN/Fe-Co 積層材料⁽⁹⁾、Tb-Dy-Fe/Fe-Co 積層材料⁽¹⁰⁾や Fe-Co コーティング⁽¹¹⁾が開発されている他、Fe-Co 系マイクロワイヤの応力誘起磁壁移動に関する研究⁽¹²⁾も行われている。

複合材料は、使用目的に応じて2種類以上の材料を組み合わせ、単独では得られない特性を持たせたもので、様々な分野で利用されている。最近、軽量さと高い強度・剛性を備えた複合材料に全く新しい別の機能 (例えば、センサ、アクチュエータ、エネルギーハーベスティング・貯蔵、自己治療、モーフィングなどの機能) を追加して複数の機能を同時に実現するマルチファンクショナル複合材料の研究開発が進められ、複合材料の新しい用途展開と市場拡大に向けて研究トレンドが変化してきている。

本稿では、Fe-Co 合金を用いた機能性複合材料を対象に、エネルギーハーベスティングの基礎的事項を取り上げ、逆磁歪特性評価の概要について述べる。また、振動・衝撃発電特性に関する最近の研究状況についても言及する。

2. 磁場—力学場相互干渉と基礎式

本章では、磁歪材料の基礎式について述べる。直交座標系 $O-x_1x_2x_3$ において、長さ l 、断面積 A の細長い磁歪丸棒を考え、磁化容易軸を、長さ方向と一致させ、 x_3 方向とする。丸棒の長さが直径に比べ極めて大きい場合は一次元問題に帰着され、磁歪材料の構成方程式は次式で与えられる⁽¹³⁾。

$$\epsilon_{33} = s_{33}\sigma_{33} + (d_{33} + m_{33}H_3)H_3 \quad (1)$$

* 東北大学 大学院工学研究科 材料システム工学専攻; 教授 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-02)
Magnetostrictive Fe-Co Integrated Composites for Kinetic Energy Harvesting; Fumio Narita (Tohoku University, Sendai)
Keywords: *mechanics of electromagnetic materials, energy harvesting test, finite element simulation, iron-cobalt fiber, composite materials, clad plates, inverse magnetostrictive effect, output power*
2019年8月20日受理 [doi:10.2320/materia.59.16]

$$B_3 = (d_{33} + m_{33}H_3)\sigma_{33} + \mu_{33}H_3 \quad (2)$$

ここに、 σ_{33} 、 ϵ_{33} は、それぞれ応力テンソル、ひずみテンソルの成分、 B_3 、 H_3 はそれぞれ磁束密度ベクトル、磁場の強さベクトルの成分、 s_{33} は弾性コンプライアンス係数、 d_{33} は圧磁定数、 μ_{33} は透磁率である。また、 m_{33} は応力に依存する2次の磁気弾性定数⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾である。

簡単のため、磁歪丸棒の磁化容易軸方向すなわち x_3 方向に、時間 t に依存する一様な圧縮荷重 $\sigma_0(t)A$ が作用する場合を考える。このとき、丸棒には一様な垂直応力 $\sigma_{33} = \sigma_0(t)$ が生じ、その結果、式(2)より丸棒内部の磁束密度 B_3 が変化する。単位長さあたりの巻き数 n のコイルを通して磁歪丸棒に発生する電圧 V_{out} は、Farady の法則から次のように得られる。

$$V_{out} = -nlA \frac{dB_3}{dt} \quad (3)$$

式(2)を式(3)に代入してみると、出力電圧はコイルの巻き数 n 、磁歪材料の体積 Al の他に、圧磁定数 d_{33} や負荷速度 $d\sigma_{33}/dt$ に依存することが容易に理解できる。

3. Fe-Co ファイバー複合材料

Fe-Co 合金は、加工性と強度に優れ、磁化・磁歪特性も良く、線材にして樹脂に埋め込むことが可能である。本章では、Fe-Co ファイバー複合材料の特徴と逆磁歪特性を解明した最近の結果について概説し、パンプスのヒール部に応用して衝撃発電実験を行った例も示す。

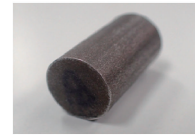
(1) 特徴と逆磁歪特性

磁束がファイバーの長さ方向に浸透しやすい性質を引出し、かつ、エポキシ樹脂内部に埋め込む際の製造工程を工夫して、磁歪ファイバー複合材料が設計・開発されている。図1は様々な磁歪材料を示したもので、(a)は Terfenol-D、Galfenol、(b)は直径 0.2 mm の Fe-Co ファイバー、Fe-Co ファイバーとポリエステルファイバーとの織物材、(c)は Fe-Co ファイバー/エポキシ樹脂複合材料、Fe-Co ファイバーを埋め込んだ炭素繊維強化プラスチック(CFRP)積層板である。図の Galfenol と Fe-Co ファイバー/エポキシ樹脂複合材料は体積がほぼ同じで重さがそれぞれ約 12.8 g、2.14 g (ファイバーのみで 0.625 g) であるので、Fe-Co ファイバー複合材料は、軽量化を実現しており、また、構造体に成形一体化できるので設計の自由度も高い。この複合材料の外側にコイルを配置しておくと、圧縮応力 $\sigma_{33} = \sigma_0(t)$ により磁束密度 B_3 が変化して電圧 V_{out} が発生する。単位体積当りの出力電圧は、負荷速度の増大に伴い増大し、ファイバーの直径⁽¹³⁾、引張残留応力⁽¹⁶⁾、初期バイアス磁場⁽¹⁷⁾、熱処理温度⁽¹⁷⁾などに依存して変化する。

最近、Fe-Co ファイバーとポリエステルファイバーとの織物材を用いてエポキシ樹脂複合材料が作製され、圧縮・三点曲げ荷重による磁束密度変化が計測されている⁽¹⁸⁾。Fe-Co ファイバーは、磁気異方性が高い上、縦弾性係数がエポ

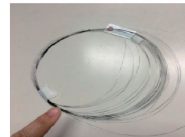


Terfenol-D

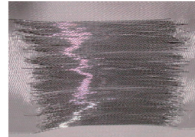


Galfenol

(a)

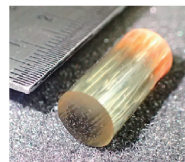


Fe-Co fiber

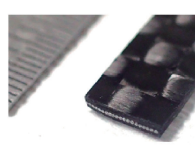


Fabric made of Fe-Co and polyester fibers

(b)



Fe-Co fiber/epoxy composite



Fe-Co fiber inserted CFRP

(c)

図1 磁歪材料の例。(a)バルク。(b)ファイバー。(c)複合材料。

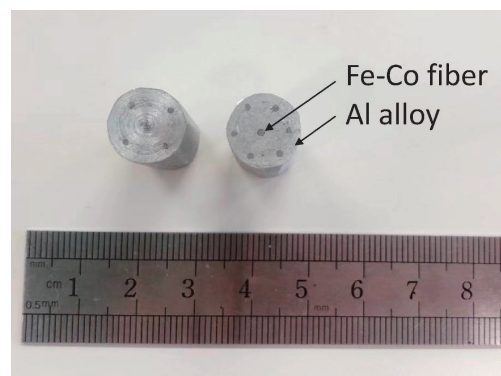


図2 Fe-Co ファイバー/Al 合金複合材料。

キシ樹脂と大きく異なるため、複合材料にすることで、外力を作用させると Fe-Co ファイバーのみに大きな応力が生じる⁽¹³⁾。したがって、Fe-Co ファイバー複合材料の見かけの逆磁歪特性は Terfenol-D に匹敵する結果となる。また、Fe-Co ファイバーを埋め込んだ CFRP 積層板の逆磁歪特性および損傷自己検知機能についても検討されている⁽¹⁹⁾。さらに、図2に示すような Fe-Co ファイバー/Al 合金複合材料が作製され、圧縮荷重によって約 5.5 mW の電力出力が

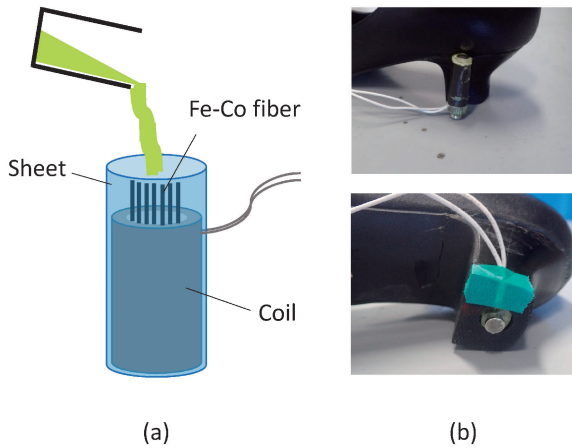


図3 コイル内蔵 Fe-Co ファイバー複合材料. (a)試作イメージ. (b)発電ポンプへの埋め込み.

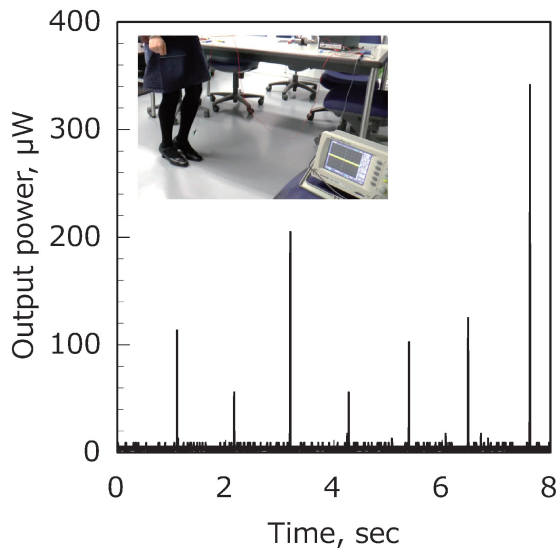


図4 Fe-Co 磁歪ファイバー埋込型ポンプの衝撃発電実験結果.

得られている⁽²⁰⁾.

(2) パンプスへの応用

Fe-Co ファイバー埋込型ポンプが試作され、歩行運動中の足踏みによる出力電力が評価されている⁽²¹⁾. 図3(a)はコイルを内蔵させた Fe-Co ファイバー複合材料(直径 10 mm, 長さ 35 mm)を示したもので、図3(b)のように市販のポンプのヒールに搭載され、100~200 N 程度の衝撃荷重で LED の点灯が確認されている. 図4に示すように、ばらつきが認められるが、歩行時の衝撃によって 100 μW 以上の電力が得られている. また、結果は示していないが、出力電力は、ヒトの体重ではなく、歩行時の習性に依存して変化する.

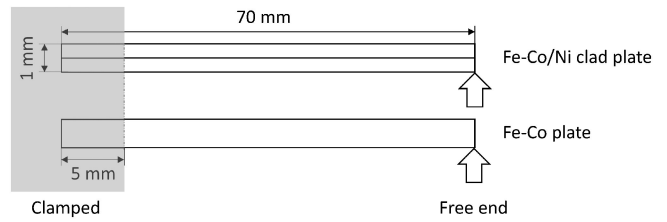


図5 Fe-Co/Ni クラッド鋼板および Fe-Co 平板の片持ちはり.

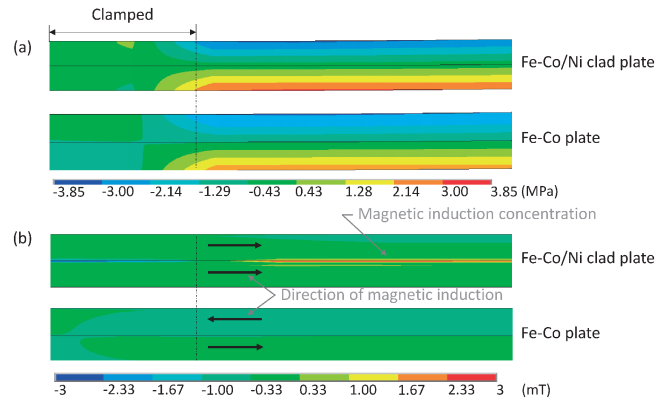


図6 静的曲げを受ける片持ちはりの(a)応力分布と (b)磁束密度分布.

4. Fe-Co クラッド鋼板

磁歪平板に曲げ荷重が作用し、下側が凸になるように変形する場合、平板の上側には圧縮応力が、下側には引張応力が生じる. 圧縮応力が生じている部分と引張応力が生じている部分の境界は中立面と呼ばれ、この中立面より上側と下側とで応力 σ_{33} の正負が異なる. その結果、式(2)の磁束密度 B_3 は一様にならず、これが磁歪平板の高出力の妨げになっている. したがって、曲げ振動による出力電力を可能な限り大きくするには、磁歪材料設計に工夫が必要である⁽²²⁾⁽²³⁾. 本章では、Fe-Co クラッド鋼板の振動発電特性に注目し、最近の研究成果について述べる.

(1) 機能発現メカニズム

Fe や Ni などの冷間圧延板と Fe-Co の冷間圧延板とを熱拡散接合させたクラッド鋼板は、曲げ振動を受けると、Fe-Co 平板単独の場合よりも大きな振動発電出力が得られる⁽²⁴⁾. 図5は自由端に集中荷重を受ける Fe-Co/Ni クラッド鋼板と Fe-Co 平板の片持ちはりを示したもので、長さは 65 mm, 厚さは 1 mm, 幅は 5 mm である. 自由端に 0.05 mm の強制たわみを負荷し、磁場-力学場の相互干渉を考慮した有限要素解析を実施すると、図6(a)に示すように、材料内部に生じる長さ方向垂直応力分布は両材料ともほぼ同程度となる. 材料に生じる応力が等しいにも関わらず、クラッド鋼板の振動発電特性が大きくなる点は、両材料の磁束密度

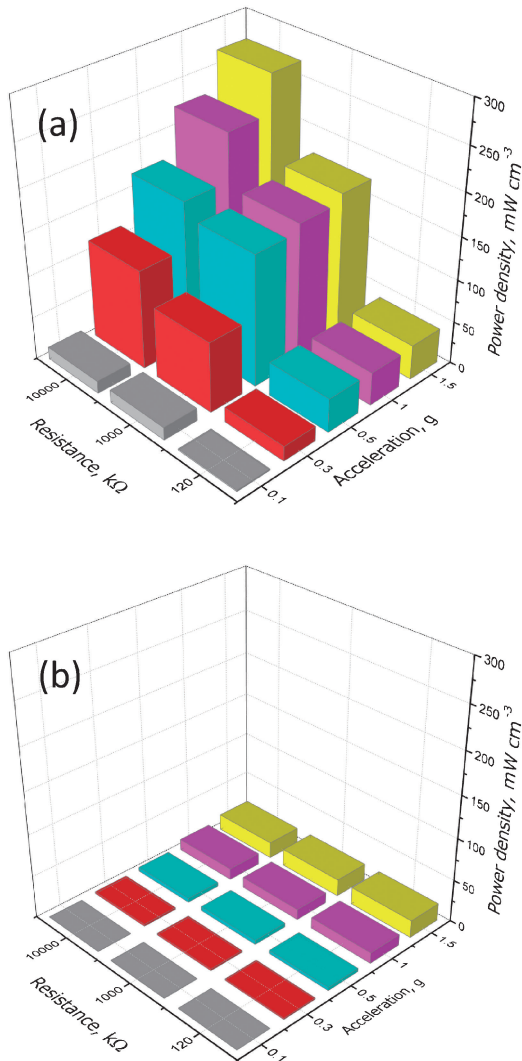


図7 (a) Fe-Co/Ni クラッド鋼板および(b) PZT 系圧電セラミック平板の振動発電実験結果.

分布の違いから理解できる. 図6(b)のように, Fe-Co/Ni クラッド鋼板の磁束密度は中立面より上側と下側とで方向が一致しているが, Fe-Co 平板の場合は方向が中立面の上下で逆になっている. すなわち, Fe-Co 平板は, 曲げ振動によって中立面より上側と下側の磁束が互いに逆方向に変化するため, 式(3)の dB_3/dt が小さくなる. 一方, 曲げ振動によって, Fe と Fe-Co とのクラッド鋼板は, Fe-Co のみ磁束が変化し, また, Fe の代わりに負の圧磁定数をもつ Ni を用いたクラッド鋼板の場合には, Ni と Fe-Co の磁束が同じ方向に変化して, 出力電力が増大する. さらに, 両材料に応力集中は認められないが, Fe-Co/Ni クラッド鋼板の場合は界面で磁束密度集中が生じている. この磁束密度集中も出力電力を増大させる理由の一つである. これは Fe-Co と Ni の界面における磁束密度ベクトルの法線方向成分と磁場の強さベクトルの接線方向成分の連続性に起因していると考えられる.

(2) 振動発電特性

図7は, 振動発電デバイスを用いて, 曲げ振動発電実験を実施した結果の一例である⁽²⁵⁾. コイルの巻き数は64000である. 図7(a), (b)は, それぞれ Fe-Co/Ni クラッド鋼板と PZT 系圧電セラミック平板(市販品)の曲げ振動によって出力される電力密度と負荷抵抗・加速度の関係を示したもので, 振動数 50 Hz の場合である. Fe-Co/Ni クラッド鋼板は, PZT 系圧電セラミック平板では達成できない微小振動からも電力が得られ, 様々な応用が期待される.

最近, Fe-Co クラッド鋼板の逆磁歪特性に及ぼす窒化処理⁽²⁶⁾, 切欠き⁽²⁷⁾および初期バイアス磁場方向⁽²⁸⁾の影響が検討されている. クラッド鋼板の曲げ振動による出力電圧は, 窒化処理を施したり, 切欠きを導入することで増大するようであり, 振動発電特性の増大も予想される.

5. おわりに

本稿では, Fe-Co 合金を用いた複合材料に注目し, 逆磁歪特性および振動・衝撃発電特性に関する理論的・実験的研究の現状を展望した. まず初めに, Fe-Co ファイバー複合材料の逆磁歪特性と衝撃発電に関する最近の研究状況について概説した. 次に, Fe-Co クラッド鋼板に注目し, 曲げによる磁気力学場の数値シミュレーションと振動発電実験の結果を示して, 考察した. 今後, Fe-Co 系磁歪合金を用いたエネルギーハーベスティング複合材料の開発がますます進むことが予想され, 電磁材料力学に基づく高機能化研究のさらなる発展が望まれる.

本研究の一部は, 東北特殊鋼株式会社 取締役 研究開発部長 江幡貴司氏をはじめ, 多くの方々との共同研究成果である. また, 国立研究開発法人 科学技術振興機構(JST)研究成果展開事業 地域産学バリュープログラム「逆磁歪効果を利用した衝撃発電ヒール・パンプスの開発 ～スポーツシューズへの展開を目指して～」の成果を含む.

文 献

- (1) J. Bryzek: TSensors Summit, (2013).
- (2) F. Narita and M. Fox: Adv. Eng. Mater., **20**(2018), 1700743.
- (3) Z. Wang and F. Narita: J. Appl. Phys., **126**(2019), 224501.
- (4) J. Atulasimha and A. B. Flatau: Smart Mater. Struct., **20**(2011), 043001.
- (5) Z. Deng and M. J. Dapino: Smart Mater. Struct., **26**(2017), 103001.
- (6) T. Nakajima, T. Takeuchi, I. Yuito, K. Kato, M. Saito, K. Abe, T. Sasaki, T. Sekiguchi and S. Yamaura: Mater. Trans., **55**(2014), 556-560.
- (7) S. Yamaura, T. Nakajima, T. Satoh, T. Ebata and Y. Furuya: Mater. Sci. Eng. B, **193**(2015), 121-129.
- (8) L. Liu, Q. Zhan, H. Yang, H. Li, S. Zhang, Y. Liu, B. Wang, X. Tan and R.-W. Li: AIP Adv., **6**(2016), 035206.
- (9) S. P. Bennett, J. W. Baldwin, M. Staruch, B. R. Matis, J. LaComb, O. M. Jvan'tErve, K. Bussmann, M. Metzler, N.

- Gottron, W. Zappone, R. LaComb and P. Finkel: Appl. Phys. Lett., **111** (2017), 252903.
- (10) L. Zhu, K. Li, Y. Luo, D. Yu, Z. Wang, G. Wu, J. Xie and Z. Tang: J. Rare Earths, **37** (2019), 166–170.
- (11) W. Wang, Y. Jia, X. Xue, Y. Liang and Z. Du : Smart Mater. Struct., **27** (2018), 105040.
- (12) S. Bhatti, C. Ma, X. Liu and S. N. Piramanayagam: Adv. Electronic Mater., **5** (2019), 1800467.
- (13) F. Narita and K. Katabira: Mater. Trans. **58** (2017), 302–304.
- (14) Y. Wan, D. Fang and K.-C. Hwang: Int. J. Non-Linear Mech., **38** (2003), 1053–1065.
- (15) Z. Jia, W. Liu, Y. Zhang, F. Wang and D. Guo: Sens. Actuators A, **128** (2006), 158–164.
- (16) F. Narita: Adv. Eng. Mater., **19** (2017), 1600586.
- (17) K. Katabira, N. Kimura, T. Yamazaki and F. Narita: Mat. Design Process. Comm., (2019), <https://doi.org/10.1002/mdp2.81>
- (18) K. Katabira, Y. Yoshida, A. Masuda, A. Watanabe and F. Narita: Materials, **11** (2018), 406.
- (19) K. Katabira, H. Kurita, Y. Yoshida and F. Narita: Sensors, **19** (2019), 4984.
- (20) Z. Yang, K. Nakajima, L. Jiang, H. Kurita, G. Murasawa and F. Narita: Mater. Des., **175** (2019), 107803.
- (21) H. Kurita, K. Katabira, Y. Yoshida and F. Narita: Materials, **12** (2019), 2055.
- (22) 成田史生 : パリティール, 丸善, **33** (2018), 46–49.
- (23) 成田史生 : パリティール, 「特集 : 物理科学, この1年」, 丸善, **34** (2019), 25–27.
- (24) Z. Yang, K. Nakajima, R. Onodera, T. Tayama, D. Chiba and F. Narita: Appl. Phys. Lett., **112** (2018), 073902.
- (25) Z. Yang, H. Kurita, R. Onodera, T. Tayama, D. Chiba and F. Narita: Smart Mater. Struct., **28** (2019), 034001.
- (26) K. Nakajima, H. Kurita and F. Narita: Sens. Actuators A, **295** (2019), 75–83.
- (27) Z. Yang, H. Kurita, H. Takeuchi, K. Nakajima and F. Narita: Sens. Mater., **31** (2019), 3681–3690.
- (28) Z. Yang, R. Onodera, T. Tayama, M. Watanabe and F. Narita: Appl. Phys. Lett., in press.



成田史生

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★

1998年3月 東北大学大学院工学研究科博士後
期課程修了

1998年4月より 株式会社トーキン

1999年4月より 東北大学助手

2006年10月より 東北大学助教授

2007年4月より 東北大学准教授

2017年4月より 現職

専門分野 : 材料力学, 複合材料, 材料システム設計

◎圧電・磁歪複合材料やナノ複合材料の設計・開発・
評価に従事. マルチスケール・マルチフィジックス
数値シミュレーションを用いた構造・機能解析技術
を中心に活動.

★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★★