

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：11301
 研究種目：基盤研究(B) (一般)
 研究期間：2017～2019
 課題番号：17H03140
 研究課題名(和文) 環境発電IoTデバイス適用への磁歪・圧電界面ドメイン増殖型高感度スマート複合材料

研究課題名(英文) Development of High Performance Smart Composite Material with Enhancing Domain Density at the PZT/Magnetostrictive Interface for Designing Energy Harvesting, IoT Devices

研究代表者
 古屋 泰文 (FURUYA, YASUBUMI)
 東北大学・マイクロシステム融合研究開発センター・特任教授

研究者番号：20133051
 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：自立分散型IoTセンサや環境発電エネルギーハーベスト型の高性能スマート材料・デバイス設計・開発およびその実証実験を行うことを目標とした。まず、そのための異相界面ナノドメイン・マルチフェロイクシナジー効果を活かした、圧電・磁歪材(薄板、ファイバ)複合機能型材料創製と環境発電デバイスを2018年度に試作して、大学特許申請を行った。更に、この新素材の電磁的スマート機能デバイス(応力センサ・環境発電素子)を使って、青森県(深浦町、弘前大)の風車、東北大間での遠隔的なワイヤレスIoTセンサーネットワークを構築、複数風車のインフラ状況データをクラウド型で解析できるソフトウェアを開発し、目標を達成できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義
 世界的に環境保全や食糧危機へのSDGsが必須である。そのための一環として、新たな材料ナノ組織設計による、環境センサや環境発電可能な高性能スマート材料・デバイス設計・開発に成功し、新たな学術的新規性を得た。その社会工学的な実装応用として、これらの新素材からなる電磁的機能デバイス(応力センサ・環境発電素子)を使って、青森県と宮城県間で、ワイヤレスLAN-IoTセンサーネットワーク構築し、新エネルギー関連の複数風車の振動、回転数、応力計測等のデータをクラウド上に集積させPC上でソフトウェアで解析できた。以上から、高感度スマートデバイスによる遠隔地からIoTインフラ診断技術でSDGsにも貢献出来る。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to develop the multi-functional smart materials and devices, and their practical application for sensor/actuator combining with wireless IoT network. First, we tried to fabricate the new materials of piezo/magnetostrictive laminated or fiber-reinforced composite which has synergetic effect of nano-domains scale multi-ferroics effect. This new material PZT/FeCo/laminated composite was proposed for patent in 2018 from Tohoku University. Then, electro-magnetic smart devices which have stress/strain sensor or micro-energy harvester under mechanical vibration.
 By using the developed sensor/actuator and energy harvesting devices, in final year of 2019, the verification of the experimental test of wireless IoT sensor network system was done by using three small wind-mills in the area of Fukaura-town and Hirosaki University of Aomori Prefecture and Tohoku University in Sendai. The time-dependent data could be monitored in cloud-style, which means successful.

研究分野：スマート材料・デバイス

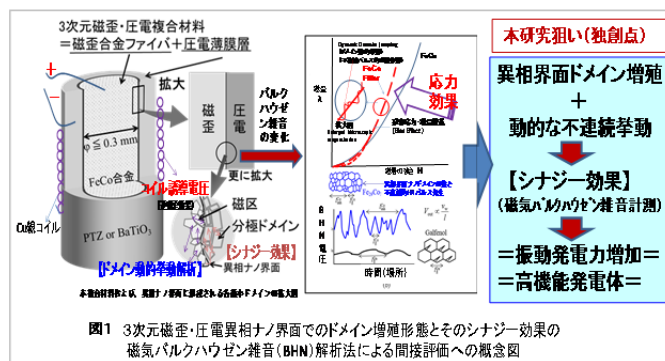
キーワード：スマート材料・デバイス 複合機能化 マルチフェロイクス 環境発電デバイス 磁歪合金 ナノドメイン IoTセンサネットワーク インフラ診断

1. 研究開始当初の背景

2025年目標の国際的技術水準である、工場での製品化自動製造ラインや道路でのEV自動運転、先進医療福祉機器の高精細動作、社会インフラ構造物への遠隔的診断向けの、「インダストリー4.0(ドイツ)やSociety5.0(日本)」向けの自補給電型「IoT対応可能な」自立分散型センシングデバイス設計・開発が急務となっている。その際に必要となる“電磁的スマート センサ・アクチュエータ型材料”として代表的な圧電セラミックスや磁歪合金は、フェロイクス(ferroic)系エネルギー変換型機能性材料として分類される。そこでは、材料内部ナノ領域での原子配列や電子スピン挙動に起因するドメイン分極域(domain)の発生・移動・消滅過程での相互作用メカニズムを通して、電磁気と力学的エネルギー変換が行なわれ、その結果として、電極やコイルを通してマクロ的に利用可能な電力エネルギー(発電力)を抽出することが可能となる。

本研究参加者の、和田(山梨大)は、ナノ・ドメインエンジニアリングアプローチ[1]、古屋(東北大)らは、高強度・延性に優れるFeCo過剰型の磁歪合金のマイクロ材料因子改良で磁歪感度と発電性能の強い相関性を実証[2]した。さらに、成田(東北大)は、このFeCo線材樹脂埋め込み型で大きな残留応力を導入した磁歪コンポジットで、振動発電性能の大幅なアップを報告[3]している。また一般的に、材料物性が急変する微視異相(ヘテロ)界面部では、物理的エネルギー不連続性に起因した、ナノサイズドメイン発生頻度が促進[4]されることがわかっている。それは、同時に巨大な圧電・磁歪特性を持たせ、かつ易動度の高いドメイン壁の存在相対比率を増加[1]させることに繋がるからである。

以上の推察から、これらフェロイクス系材料に共通した、“異相界面ナノ構造”と“ドメインダイナミクス”現象による弾性歪みエネルギー変換メカニズム支配因子とその機能要素インテグレーション(統合化)を最適化させれば、新たな、応力感度の大きな電磁材料創生への新展開(ブレークスルー)が実現する。(図1参照)それゆえに、環境発電型マイクロ電池で作動するIoT対応型センサやアクチュエータデバイスの実用化への独自の重要技術となり、IoTセンサーネットワーク実証試験に繋げる研究が展望できる。



2. 研究の目的

本研究では、自立分散型IoTセンサや環境発電エネルギーハーベスト型の高性能スマート材料・デバイス設計・開発およびそのセンサーネットワーク実証実験を行うことを目標としている。マルチフェロイクス効果を活かせる、圧電・磁歪材(薄板、ファイバ)複合機能型材料の創製及び環境発電デバイスの実証を行う。そのために、先ず、二種類の電磁・力学的エネルギー変換型フェロイクス(圧電・磁歪)要素材の微視ナノ領域レベルまでの機能融合・効率化設計を実施し、高感度でロバスト性を有する複合機能型バルク材料を開発する。そして、それを用いた、電磁的環境発電や力センシング用スマートデバイス化への基盤設計技術を提示する。特に、まだ未知・黎明領域にある、変動応力下の異相ナノ界面部でのドメイン(磁区、分極域等)増殖とその動的挙動、“ドメインダイナミクス”シナジー効果を解明し、相互エネルギー変換効率を大幅に高める新素材を得る。そして、この圧電・磁歪複合機能型材料への電磁力学的な3次元機能解析を実施し、大幅(≧5倍)な漏れ磁束感度や振動発電量を増加させた、自補給電型“IoT自立分散型”センシングデバイス設計・開発への基盤技術を得ることを目標とする。最終年度(2019年)には、ワイヤレスでのインフラ診断実証試験をして、本研究成果の総括(結論と今後の課題抽出)をする。

3. 研究の方法

本研究では、以下に記載の3大学のエキスパート(新磁歪合金、圧電ドメインエンジニアリング、複合機能型知能材料設計、電磁力場有限要素解析、磁性物理・電磁気計測)の力を結集させて、界面部ドメイン(磁区、分極域)増殖と動的挙動(ドメインダイナミクス)への機能発現シナジー効果を解明する。同時に、複合型デバイス構造の最適化設計により、大幅なセンサ感度や振動発電量増加を実現させる。最終年度に、弘前大の情報通信工学研究者と共同で、IoT型センサ・デバイスを用いた、ワイヤレス・インフラ診断技術の実証も行う。課題と担当機関を以下に示す。

(1) 高性能スマート(センサ・アクチュエータ)要素材料開発(東北大・山梨大、横浜国大)

- 1)平成29年度:発電機能(磁歪、圧電)要素材の加工形質・高性能化
- 2)平成29年度後半～平成31年度前半:圧電体と磁歪合金複合的コンポジット設計・試作

(2) 自補給電・複合機能型センサ・デバイスの試作と性能試験 (横浜国大、東北大)

1) 平成 31 年度～平成 31 年度末: 自補給電IoT対応型センサ・デバイス設計・試作

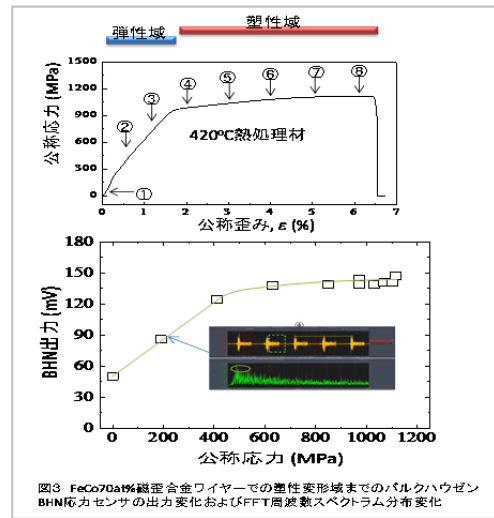
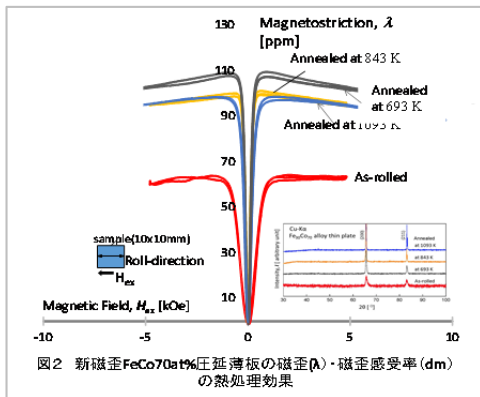
(3) ワイヤレスIoT型センサーのインフラ診断の実証試験 (東北大、弘前大、横浜国大)

1) IoT センサによる、遠隔地のワイアレス・インフラ診断技術確立と研究総括

4. 研究成果

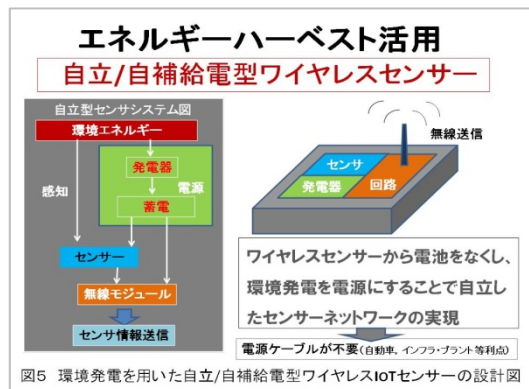
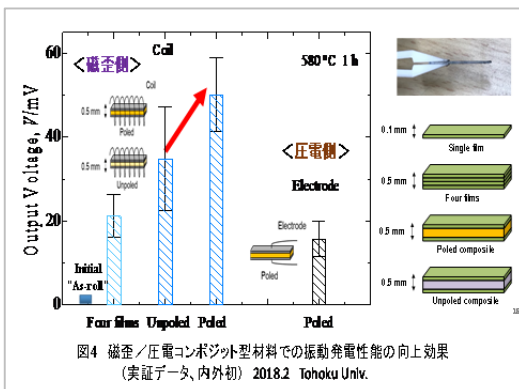
1) 高性能スマート(センサ・アクチュエータ)要素材料の開発

センサ・アクチュエータ機能を両方有する、スマート材料(磁歪、圧電)の強加工・繰り返し圧延プロセスによる、ナノ～マイクロ組織因子(結晶方位・界面制御、磁区構造変化)を微細化制御させて、磁歪型の大変形アクチュエータとセンサ応力感受率の高性能化を達成した。また、電磁気解析手法と実験結果の妥当性を検証する。さらに、磁歪合金の磁化過程で発生するマイクロ磁氣的雑音(バルクハウゼンノイズ, BHN) 計測技法を導入し、界面部でのドメイン(磁区, 分極域)増殖とその動的挙動(ドメインダイナミクス)へのシナジー効果の関連性を明らかにした。これらは、著名な国際英文誌に3編掲載された。図2には、強圧延 FeCo 薄板焼鈍材での磁歪高感度化事例[5]、図3には、マイクロ磁氣的雑音(バルクハウゼンノイズ, BHN)を用いた応力センサ特性[6]を示す。これらは、高性能スマート(センサ・アクチュエータ)材料の創製が出来たことを示している。



2) 自補給電・複合機能型センサ・デバイス試作と性能試験

ユビキタス IoT 社会対応可能な、分散型配置の“自補給電型スマートセンサ・デバイス”モデルの開発に取り組んだ。変動負荷下でのパルス状の振動発電電圧を一旦整流・蓄電用の電子回路を使い、小型バッテリーに蓄電して、その電力で間欠的に無線センサ信号を発信する IoT センサモデルを試作した。さらに、東北大・横浜国大と共同で、磁歪合金ファイバ埋込み方式の複合材料を開発した。(図4参照 [7]) これは、変動負荷受ける、機械構造物(移動体・車両)や土木・建設物の梁不連続接合部から、磁歪ファイバ振動発電微弱電力を取り出しが可能である。これらは、東北大学・知財からの特許申請が認可された。さらに実証試験を通して、エネルギーハーベスト機能を組み込んだ、分散型“IoT向けインフラ用センサ”の技術課題、応用分野を調査した。



3) ワイヤレスIoT型センサーのインフラ診断の実証試験

自補給電型IoT対応型センサデバイス設計・試作: 高出力な振動発電素子の設計・試作および振動パルス整流・蓄電電子回路を組み入れ、自補給電型センサ機能が働くのかを実証試験した。(図 5

参照)そして、開発した電磁的スマート機能デバイス(応力センサ・環境発電素子)を使って、青森県深浦町丘陵地の風車、弘前大理工研究科屋上の風車、東北大間での遠隔的なワイヤレス IoT センサーネットワークの実証試験を行った。近距離通常 WiFi-LAN と低消費電力通信規格 LPWA(RoLaWAN、免許不要、図6参照)を併用して、小型風車(東北大)の回転ギア部のトルク信号、深浦町風車支柱の振動などに関するインフラ診断のモニタリングに成功した。また、これら IoT センサデータをその LAN 経由でクラウド型データに蓄積して、NOTE-PC で解析するソフトウェアを開発した。(図7参照)以上、最終年度の研究目標の、スマート材料・デバイスと IoT センサーネットワークが実証できた。

以上、3年間での基盤技術“環境発電IoTデバイス適用への磁歪・圧電界面ドメイン増殖型高感度スマート複合材料”を創成した、その応用として、ワイヤレスIoT型センサのインフラ診断の実証試験に目的を付け、研究総括(課題、展望)を行った。

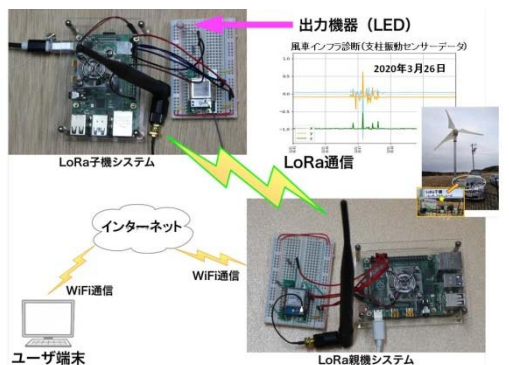


図6 LoRaWANによる双方向通信によるLED点滅(制御)に用いた通信機器ユニット (電子回路とアンテナモジュール、丹波研究室(弘前大))

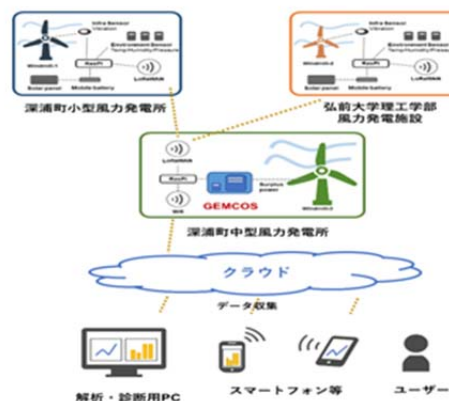


図7 青森県津軽地域で構築した小型風車と低消費電力型IoTインフラ診断用センサーネットワーク

<引用文献>

- ①和田智志, “ナノマクロ複合ドメイン構造の導入によるビスマス系圧電材料における圧電特性向上” 第25回日本MRS年次大会, 2015/12/8-10, 横浜
- ②古屋泰文, FeCo系磁歪合金及びその製造方法, 公開特許2014-084484(2014)及び論文リスト
- ③成田 史生, 後藤 裕平, 朱 驍瓏, FeCo合金フィラーの特徴を生かした磁歪コンポジットの設計, IIP2016(日本機械学会)講演会 CD-ROM 論文集, No.16-12, I-1-5)
- ④(株)UBE 科学分析センターHP, ヘテロ接合界面に生成した微小ドメインの解析, http://www.ube-ind.co.jp/usal/documents/s382_114.htm
- ⑤イジュラル ハシフ, 久保田 健, 松本 實, 山浦 真一, 古屋 泰文, “Fe₃₀Co₇₀ 圧延薄板の磁化と磁歪への熱処理効果”, 日本 AEM 学会誌, 26-1(2018) pp.250-255
- ⑥ Takahiro Yamazaki, Yasubumi Furuya, Wataru Nakao, “Experimental evaluation of domain wall dynamics by Barkhausen noise analysis in Fe₃₀Co₇₀ magnetostrictive alloy wire”, J. Magnetism and Magnetic Materials, 475(2019)pp.240-248, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.11.011>
- ⑦ Takahiro Yamazaki, Kenichi Katabira, Fumio Narita, Yasubumi Furuya and Wataru Nakao, “Microstructure-Enhanced Inverse Magnetostrictive Effect in Fe-Co Alloy Wires”, published on 27 May 2020, <https://doi.org/10.1002/adem.202000026>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Takahiro Yamazakia, Yasubumi Furuya and Wataru Nakao	4. 巻 475
2. 論文標題 Experimental evaluation of domain wall dynamics by Barkhausen noise analysis in Fe ₃₀ Co ₇₀ magnetostrictive alloy wire	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Magnetism and Magnetic Materials	6. 最初と最後の頁 240-249
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.11.011 .	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 イジュラルハシフ、久保田健、松本寛、山浦真一、古屋泰文	4. 巻 26-1
2. 論文標題 Fe ₃₀ Co ₇₀ 圧延薄板の磁化と磁歪への熱処理効果	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本AEM学会誌、	6. 最初と最後の頁 .250-255
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 -
1. 著者名 Takahiro YAMAZAKI, Takahisa YAMAMOTO, Yasubumi FURUYA and Wataru NAKAO	4. 巻 印刷済
2. 論文標題 Magnetic and magnetostrictive properties in heat-treated Fe-Co wire for smart material/device	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of JSME	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 -
1. 著者名 Takahiro Yamazaki, Kenichi Katabira, Fumio Narita, Yasubumi Furuya and Wataru Naka	4. 巻 27 May
2. 論文標題 Microstructure Enhanced Inverse Magnetostrictive Effect in FeCo Alloy Wire	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Engineering Materials, 27 May 2020	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） https://doi.org/10.1002/adem.202000026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 古屋 泰文, 山崎 貴大, 中尾 航
2. 発表標題 新FeCo系磁歪合金を活用したスマートセンサーデバイス実装化の進展
3. 学会等名 [No.18-1] 日本機械学会2018年度年次大会 講演論文集 [2018.9.9-12, 吹田]
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古屋 泰文
2. 発表標題 レジリエント機能を高めたスマート材料・デバイス設計
3. 学会等名 [No.18-1] 日本機械学会2018年度年次大会 講演論文集 [2018.9.9-12, 吹田] (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古屋 泰文
2. 発表標題 “モノ (Goods) とコト (Things) の融合 “化”による次世代研究戦略
3. 学会等名 第26回日本機械学会M&P講演大会、No.18-60, (2018)2018年11月3日(土) 山形大学工学部 (米沢市) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 古屋泰文、山浦真一、久保田健
2. 発表標題 新磁歪FeCo系合金の逆磁歪利用スマートセンサ・振動発電デバイス実装化課題
3. 学会等名 日本機械学会2017年度年次大会 講演論文集 J0430105
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山崎貴大、古屋泰文、中尾航
2. 発表標題 バルクハウゼンノイズ手法を用いた新規Fe-Coワイヤにおける磁壁挙動評価
3. 学会等名 日本機械学会2017年度年次大会 講演論文集 J0430104
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山崎貴大、秦誠一、古屋泰文、中尾航
2. 発表標題 応力センサに向けた磁歪材料のバルクハウゼンノイズ解析
3. 学会等名 次世代材料の創製に向けたジョイントセミナー2019(名古屋大学、2019年7月2日、名古屋)(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y.Furuya
2. 発表標題 Smart Materials and Devices for New Energy and Sustainable Development
3. 学会等名 2020 Japan New Energy and Sustainable Development Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古屋 泰文
2. 発表標題 北日本地区での融合技術型スマートアグリプロジェクト(提案)
3. 学会等名 AICシンポジウム 2019 (岩手大学復興祈念銀河ホール)(招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 応力センサー	発明者 山崎貴大、古屋泰文、中尾航、座間誠一	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特許、P20170329（東北大学管理番号）	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 微量元素添加効果による高感度ロバストFeCo磁歪合金	発明者 古屋泰文、松本實、石山和志、座間誠一	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、発明届受理P201704049（東北大学）	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 応力センサー	発明者 山崎貴大、古屋泰文、中尾航、座間誠一	権利者 東北大学、横浜国立大学、フィンガルリンク
産業財産権の種類、番号 特許、P20170329（東北大学管理番号）	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究分担者	千葉 晶彦 (Chiba Akihiko) (00197617)	東北大学・金属材料研究所・教授 (11301)	
研究分担者	成田 史生 (Narita Fumio) (10312604)	東北大学・工学研究科・教授 (11301)	
研究分担者	和田 智志 (Wada Satoshi) (60240545)	山梨大学・大学院総合研究部・教授 (13501)	
研究分担者	中尾 航 (Nakao Wataru) (60361870)	横浜国立大学・大学院工学研究院・教授 (12701)	

6. 研究組織（つづき）

	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	戸津 健太郎 (Totsu Kentaro) (60374956)	東北大学・マイクロシステム融合研究開発センター・准教授 (11301)	
研究分担者	丹波 澄雄 (Tanba Sumio) (70179927)	弘前大学・理工学研究科・准教授 (11101)	