

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 15 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560520

研究課題名(和文) 磁気計測にもとづく鉄鋼構造物の状態監視技術に関する研究

研究課題名(英文) Studies on Condition Monitoring of Ferromagnetic Structured Materials using Magnetic Measurements

研究代表者

小島 史男 (Kojima, Fumio)

神戸大学・その他の研究科・教授

研究者番号：70234763

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円

研究成果の概要(和文)：東日本大震災以降、鉄道や道路等の高架建造物、トンネル、橋梁、高層ビルに関する保守技術の高度化がますます重要になってきている。本研究においては、鉄鋼構造物の機能劣化進展を検知する遠隔監視システムの構築を行う。材料の初期劣化による微視的な兆候から疲労き裂や腐食減肉などの巨視的な欠陥にいたるまでの進展を磁気センサネットワークで多角的にモニタリングすることで、材料劣化の進展評価から損傷へのリスクの定量評価につながる材料の継続的な状態監視技術の実現をめざした。

研究成果の概要(英文)：After the Great East Japan Earthquake, it is important to establish advanced maintenance strategies of infrastructures, such as elevated tracks, tunnels, bridges used in railway and roads. The purpose of this study is to develop a remote monitoring system that makes it possible to detect and to characterize degradation level of structured ferromagnetic materials. The final goal is to construct a quantitative evaluation method starting from early detection of anomalies to continuous surveillance of material defect process using magnetic sensor networks.

研究分野：非破壊検査科学

キーワード：計測工学 非破壊検査 構造物健全性 経年劣化 金属疲労 磁性 信号処理 診断

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災以降、鉄道や道路等の高架建造物、トンネル、橋梁、高層ビルに関する保守技術の高度化がますます重要になってきている。これらの社会インフラ設備には鉄鋼材料で構成されるものが多く、これらの建造物の機能損傷劣化を適切に評価することはシステムの安全性を確保する基本となる。ところで、建造物の診断はこれまで、定期的な目視検査、超音波探傷による欠陥検出が主体であり、これらは建造物の設計仕様に依存してあらかじめ一律に検査法が決められていることが多い。しかしながら建造物の経年劣化が進んでいくにつれて、建造物ごとの設備利用率や計画外停止頻度などの運転履歴を考慮してシステムの状態を監視(Condition Monitoring, CM)していくことが求められてきている。一方近年の情報通信技術およびロボット技術は飛躍的に進展し、これらを融合するインフォメーションロボティクス(IRT)における研究の展開において、その要素技術としてさまざまなセンサ技術が利用可能となってきている。このなかでも磁気センサによる計測技術は、比較的安価で建造物に常時設置可能であり、また試験信号を電氣的に駆動できることから遠隔的に継続的な検査は可能であるなどCMへの適合性が高い検査技術である。これらのセンサをネットワーク化し建造物の劣化を監視する方法が考えられているが、その設置点数やセンサ機器の耐環境性、信頼性について解決すべき技術課題も多い。本研究では、この分野における学術研究の発展に着目し、建造物の機能損傷に至るシナリオをモニタリング可能かどうかについてセンサ技術の観点から研究を展開する。

2. 研究の目的

本研究においては、磁気特性と材料劣化との関連に関する研究にもとづき、建造物の機能劣化監視を実現することを目的とした磁気センサネットワークによる遠隔監視システムの構築を行う。建造物の機能劣化とは、供用開始後における建造物の様々な繰り返し負荷の状況のもとで、材料構造の疲労の蓄積において生ずる経年変化のことを意味している。鉄鋼材料のき裂の初期き裂の発生を劣化診断によって予知すること、および建造物の設計強度に影響をおよぼすまでの履歴を磁気センサによってモニタリングの適応性を検証し、供用中の鉄鋼建造物に複数の多機能磁気センサを配置することで、オンラインで建造物の供用履歴にもとづく機能劣化を監視するシステム構築のインフラストラクチャを形成する研究を実施する。

3. 研究の方法

建造物の機能劣化進展は運転条件とも絡んで複雑・多様であり、機能損傷につながる劣化進展のプロセスをとらえる研究は著し

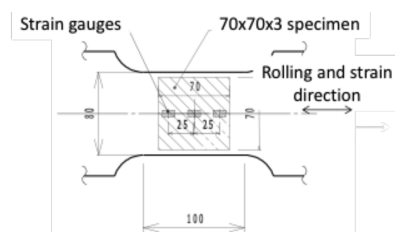
く遅れている。そこで、本研究においては、材料の初期劣化による微視的な兆候から疲労き裂や腐食減肉などの巨視的な欠陥にいたるまでの進展を磁気センサネットワークで多角的にモニタリングすることで、材料劣化の進展評価から損傷へのリスクの定量評価につながる材料の継続的な監視技術の実現をめざして、下記の方法で研究を実施した。

- (1) 磁気センサによる建造物機能劣化モニタリングの基本性能の確認
- (2) 状態監視のための技術課題の抽出と問題解決
- (3) センサネットワークと建造物機能劣化評価法の実機適用可能性の確認

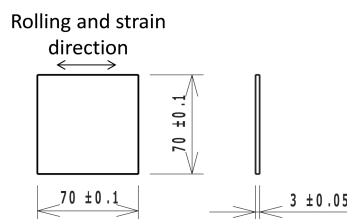
4. 研究成果

- (1) 磁気センサによる建造物機能劣化モニタリングの基本性能の確認

試験体母材として一般構造用圧延鋼材の平板を用意し(Fig. 1-(a)), 引張試験により歪み試験体を作成した。母材中央 70x70[mm]の範囲で片面あたり3枚計6枚の歪みゲージを用いて母材の歪みを計測し、規定の歪み毎に、母材から 70x70x2.95t[mm]の試験体を切り出した(Fig. 1-(b))。本実験では0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1%歪みを有する計6種類の試験体を準備した。測定装置の概要をFig. 2に示す。



(a) Base metal test specimen



(b) Dimension of test sample

Fig. 1 Sample specimen in the experiments

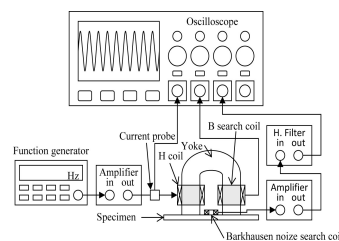


Fig. 2 Experimental setup

ファンクションジェネレータ、フェライトを用いた U 字型磁化器、プリアンプ、パワーアンプ、ハイパスフィルタにより構成されている。試験材の引張方向に併せて磁化し、H-Coil への入力電流履歴および B-Coil の鎖交磁束による誘起電圧出力はオシロスコープで記録した。実験においては、巻き数 600 の磁化器に対して、周波数 10Hz , 0.47A の電流を付与して励磁し、磁気測定をおこなった。Fig. 3 に各試験材の起磁力を、各歪み試験体と残留磁束密度の関係を図 4 に示す。歪みの進行とともに残留磁束密度が減少傾向にあることがわかるが、0.4%歪み以上の試験体では有意差がみられない。Fig. 5 はインピーダンスメータを取り付けて、インピーダンス測定を実施した結果を示したものである。0.076A, 0.47A, 0.65A の励起電流に対してインピーダンス測定を行った結果、0.47A の励磁電流においては歪みとの相関が顕著に表れており、インピーダンス値が鋼材歪みの検出に鋭敏であることを確認した。これまでバルクハウゼンノイズや残留磁束密度などの磁気特性が材料劣化に関して鋭敏であることが指摘されてきたが、非破壊検査への適用拡大は十分とはいえなかった。今回の実験で磁化器のインピーダンス特性が鋼材歪みを高感度に検出できることを確認した。

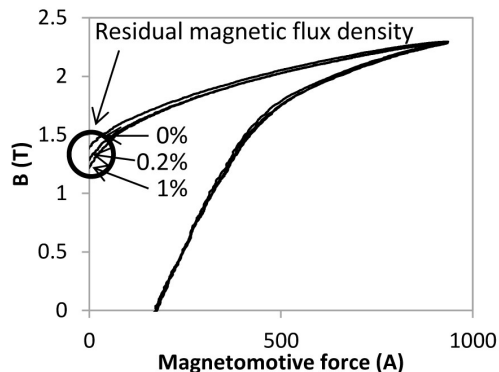


Fig. 3 B-H curves related to magnetomotive force

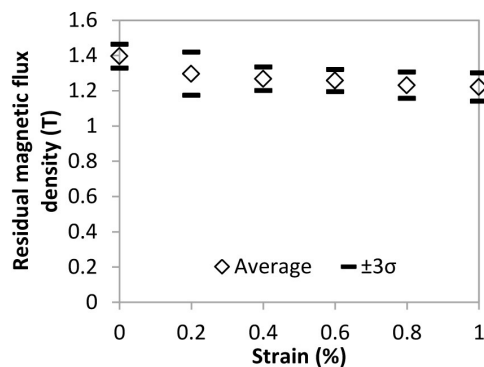


Fig. 4 Strain and residual magnetic flux density

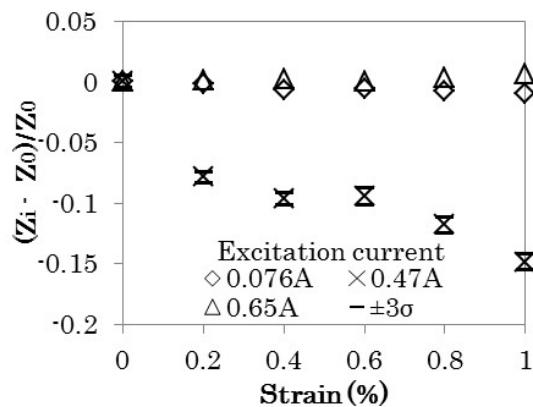


Fig. 5 Strain and impedance

(2) 状態監視のための技術課題の抽出と問題解決

① 磁気センサの耐環境性に関する課題

化学プラントや発電プラント稼働中に状態監視を実現するためには、高温環境下で計測可能であることが求められる。プラントで多用される炭素鋼配管に磁気センサを用いると自己保持が可能で有効性が期待できるが、一方高温環境下では熱減磁により磁石の磁束密度が減少する現象が生じる。高温環境下で配管肉厚計測が可能かについて磁気デバイスを用いて検証した。Fig. 6 は高温環境を模擬した実験装置の概要である。磁気デバイスとしては、永久磁石とコイルを組み合わせた電磁超音波探触子を採用した。永久磁石によるバイアス磁場とコイルに交流電圧を励起することにより発生する動的磁場との相互作用により超音波を発生させ、共鳴効果を利用して肉厚を測定した。Fig. 7 は室温から摂氏 200 度まで加熱した環境での肉厚計測結果である。結果からは摂氏 200 度においても最大誤差は 0.134mm であり、高温環境下での磁気デバイスの使用は可能であることを確認した。

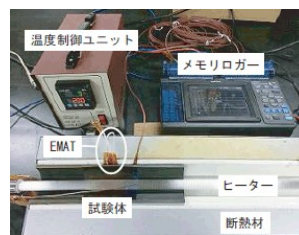


Fig. 6 Laboratory experiments

② 計測結果の信頼性評価

状態監視技術に必要な機能として現場でのその場計測より遠隔的な診断技術が求められる。磁気センサネットワークによる状態監視技術では、計測技術者の熟練度ではなく、デバイスの標準的な検査機能を評価する必要がある。本研究では、従来検査技術者のパフォーマンスの評価に使われてきた検出確率 (Probability of detection) を磁気デバイスの検査機能評価に適用し、その評価法の

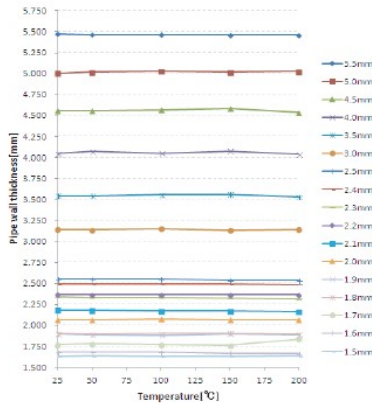


Fig. 7 Measurement results

有効性について検証した。Fig. 8は評価の対象とした電磁超音波探触子である。この磁気デバイスは2つの永久磁石とコイルからなる。永久磁石の寸法を同条件としてコイルの巻数と層数をパラメータとして、計測特性を評価した。Table-1にその条件を示す。検査対象としてFig. 9にある炭素鋼配管を例として、PODを用いて減肉計測の性能評価を実施した。Fig. 10はその結果をまとめたものである。T15L2がほかの2種類の設計よりも測定信頼性が高いことが定量的に評価できている。

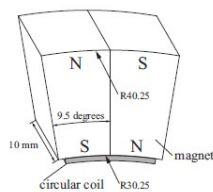


Fig. 8 Structure of magnetic device

Table 1. Design parameters

Indices	T40L1	T40L2	T15L2
Number of turns	40	40	15
Number of layers	1	2	2

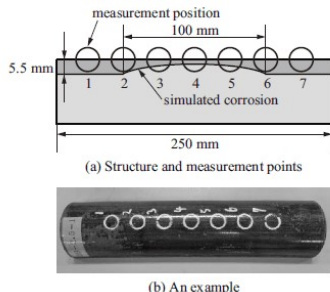


Fig. 9 Sample specimen

(3) センサネットワークと構造物機能劣化評価法の実機適用可能性の確認

磁気計測にもとづく状態監視の実機適用事例として都市部のインフラ設備の点検への

応用を考えた。神戸市が管理している街路灯は防犯灯等含めて約9万本あり、目視点検が実施されている。しかし照明柱地際部の腐食の目視点検には、道路工事が伴い、点検コストも増大している。磁気デバイスによる状態監視が可能となれば、点検効率の向上とともに、道路交通の安全確保の観点から適用性が期待できる。本研究の最終年度においては神戸市と連携して、磁歪効果を利用した磁気デバイスの開発を進め、切り出しサンプルによる非破壊評価試験を実施し、その有効性を検証した。

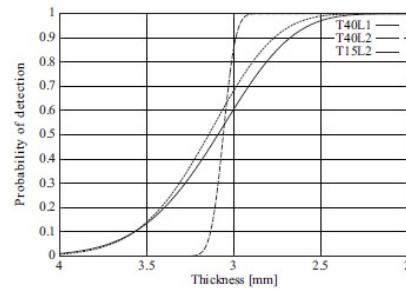


Fig. 10 POD functions

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① Fumio KOJIMA and Shunsuke UCHIDA, Advanced management of pipe wall thinning based on prediction-monitor fusion, International Journal of Nuclear Safety and Simulation, 査読有, Vol. 3, 2012, 194-200
- ② Fumio KOJIMA and Mitsuhiro KIKUCHI, Stochastic inverse methodologies for structural health monitoring using electromagnetic measurements, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, Vol. 37, 2012, 100-105  
DOI: 10.3233/978-1-61499-092-5-100
- ③ Teruo USAMI and Fumio KOJIMA, Monitoring method for underground condition, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, Vol. 37, 2012, 228-235  
DOI: 10.3233/978-1-61499-092-5-228
- ④ Daigo KOSAKA, Hiroki TABATA, Hiroyuki NAKAMOTO, and Fumio KOJIMA, Exact pipe wall thinning management with flow accelerated corrosion using electromagnetic acoustic transducer, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, Vol. 37, 2012, 236-243  
DOI: 10.3233/978-1-61499-092-5-236
- ⑤ 中本 裕之、小島 史男、加藤 翔、検出確率を用いた超音波厚さ計測による配管減肉検査の信頼性評価について、保全学、査読有、12巻、3号、2013、89-95

- ⑥ Hiroyuki NAKAMOTO, Fumio KOJIMA, and Sho KATO, Reliability assessment for thickness inspection of pipe wall using probability of detection, E-Journal of Advanced Maintenance, 査読有, Vol. 5, No. 4, 2013, 228-237
- ⑦ Daigo KOSAKA, Fumio KOJIMA, and Rika TANAKA, Material aging diagnosis using magnetic NDE, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, Vol. 45, 2014, 917-922  
DOI: 10.3233/JAE-141925
- ⑧ Hiroyuki NAKAMOTO, Fumio KOJIMA, Hiroki TABATA, and Daigo KOSAKA, Reliability evaluation of pipe thickness measurement by electromagnetic acoustic transducer, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, Vol. 45, 2014, 923-929  
DOI: 10.3233/JAE-141926
- ⑨ Fumio KOJIMA, Hiroyuki NAKAMOTO, Hiroki TABATA, Sho KATO, and Daigo KOSAKA, Reliability assessment of EMAT-NDE system for pipe wall thinning management, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, Vol. 38, 2013, 3-8  
DOI: 10.3233/978-1-61499-354-4-3
- ⑩ Hiroyuki NAKAMOTO, Fumio KOJIMA, Atsushi MORIKAWA, Hiroki TABATA and Daigo KOSAKA, Pipe-wall thickness measurement at high temperature by electromagnetic acoustic transducer, Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, Vol. 39, 2014, 256-262  
DOI: 10.3233/978-1-61499-407-7-256
- ⑪ Akinori FURUSAWA, Fumio KOJIMA, Atsushi MORIKAWA, Mode control of guided wave in magnetic hollow cylinder using electromagnetic acoustic transducer array, Nuclear Engineering and Technology, 査読有, Vol. 47, No. 2, 2015, 196-203  
DOI: 10.1016/j.net.2014.12.007
- ⑫ 古澤 彰憲、三輪 有弘、森川 敦、小島 史男、電磁超音波探触子を用いた超音波ガイド波による鋼管内部の減肉検査、日本 AEM 学会誌、査読有、23 巻、2015、350-355
- [学会発表] (計 24 件)
- ① 伊藤 崇文、小島 史男、EMAT の磁性体内における超音波発生メカニズムのシミュレーション、第 9 回保全学会学術講演会、2012. 7. 26、一橋大学 (東京都)
- ② 小坂 大吾、小島 史男、中本 浩之、田端 大樹、加藤 翔、電磁超音波探触子を用いた配管減肉計測の信頼性評価、第 9 回保全学会学術講演会、2012. 7. 27、一橋大学 (東京都)
- ③ Fumio KOJIMA, Reliability assessment of EMAT-NDE system for pipe wall thinning management (Invited Talk), The 17th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE2012), 2012. 7. 30, Rio de Janeiro (Brazil)
- ④ 小島 史男、シミュレーションと計測技術を融合した構造物健全性評価、第 57 回システム制御情報学会研究発表講演会、2013. 5. 16、兵庫県民会館 (兵庫県)
- ⑤ 森川 惇、小島 史男、中本 裕之、田端 大樹、電磁超音波探触子を用いた高温環境下における配管減肉寸法測定、第 57 回システム制御情報学会研究発表講演会、2013. 5. 17、兵庫県民会館 (兵庫県)
- ⑥ 伊藤 崇文、小島 史男、電磁超音波法における磁性材料の加振メカニズムのシミュレーション、第 57 回システム制御情報学会研究発表講演会、2013. 5. 17、兵庫県民会館 (兵庫県)
- ⑦ Fumio KOJIMA, Takafumi ITO, and Teruo USAMI, Numerical simulation of ultrasonic signal processing for EMAT based NDE system, The 18th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE2013), 2013. 6. 27, Bratislava (Slovak Republic)
- ⑧ Fumio KOJIMA, Hiroyuki NAKAMOTO, Daigo KOSAKA, and Hideo NSHINO, Reliability assessment of condition monitoring for pipe wall thinning, International Symposium on Symbiotic Nuclear Power Systems for 21st Century (ISSNP2013), 2013. 11. 23, Beijing (China)
- ⑨ 小島 史男、小坂 大吾、中本 裕之、磁気測定にもとづく炭素鋼の経年劣化評価法の開発、第 22 回 MAGDA コンフェレンス in 宮崎、2013. 12. 2、宮崎観光ホテル (宮崎県)
- ⑩ 小島 史男、中本 裕之、田端 大樹、電磁超音波探触子による配管厚さ寸法計測の性能評価、第 14 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会、2013. 12. 19、神戸国際会議場 (兵庫県)
- ⑪ Fumio KOJIMA, Quantitative evaluation of material degradation with hybrid use of simulation and monitoring and its application to pipe wall thickness management (Invited Talk), ElyT Workshop 2014, 2014. 2. 19, Frejus (France)
- ⑫ Fumio KOJIMA, Numerical simulation of ultrasonic signal processing for EMAT based NDE system (Invited Talk), The 19th International Workshop on Electromagnetic Nondestructive Evaluation (ENDE2014), 2014. 6. 24,

- Xi' an (China)
- ⑬ Fumio KOJIMA, On-site structural health monitoring for nuclear power plants and its application to reliability assessment (Keynote Speech), International Symposium on Future I&C for Nuclear Power Plants and International Symposium on Symbiotic Nuclear Power Systems (ISOFIG/ISSNP 2014), 2014. 8. 26, Jeju Island (Korea)
  - ⑭ Akinori FURUSAWA, Fumio KOJIMA, and Atsushi MORIKAWA, Mode control of guided wave in magnetic hollow cylinder using electromagnetic acoustic transducer array, International Symposium on Future I&C for Nuclear Power Plants and International Symposium on Symbiotic Nuclear Power Systems (ISOFIG/ISSNP 2014), 2014. 8. 27, Jeju Island (Korea)
  - ⑮ Atsushi MORIKAWA, Akinori FURUSAWA, and Fumio KOJIMA, Development of guided wave transmitter-receiving system using EMAT and evaluation of the propagation of L and T-mode guided wave, The 2nd International Conference on Maintenance Science and Technology (ICMST-Kobe 2014), 2014. 11. 4, Kobe University (Hyogo)
  - ⑯ 古澤 彰憲、三輪 明弘、森川 惇、小島 史男、電磁超音波探触子を用いた超音波ガイド波による鋼管内部の減肉検査、第 23 回 MAGDA コンフェレンス in 高松、2012. 12. 5, サポートホール高松 (香川県)
  - ⑰ 古澤 彰憲、三輪 有弘、中島 大岳、中村 大地、小島 史男、EMAT を用いた L-mode ガイド波の配管検査への応用、第 27 回 電磁力関連のダイナミクスシンポジウム、2015. 5. 14、ハウステンボス (長崎県)
  - ⑱ 古澤 彰憲、中村 大地、小島 史男、EMAT ガイド波検査による液滴衝撃エロージョンの寸法化、第 58 回システム制御情報学会研究発表講演会、2015. 5. 20、京都テルサ (京都府)
  - ⑲ Fumio KOJIMA, Akinori FURUSAWA, and Takafumi ITO, Impact model and control of ultrasonic excitation using electromagnetic acoustic transducer, The 10th Asian Control Conference, 2015. 6. 3, Kota Kinabalu (Malaysia)
  - ⑳ 中島 大岳、古澤 彰憲、小島 史男、磁性材料に関する電磁超音波探触子を用いた超音波送信機構の解析、第 12 回日本保全学会学術講演会、2015. 7. 15、日立シビックセンター (茨城県)
  - ㉑ Akinori FURUSAWA, Atsushi MORIKAWA, and Fumio KOJIMA, Pipe wall thinning detection and sensitivity investigation of longitudinal guided wave using EMAT guided wave testing

- system, International Symposium on Socially and Technically Symbiotic Systems and International Symposium on Symbiotic Nuclear Power Systems (STSS/ISSNP 2015), 2015. 8. 27, Kyoto University (Kyoto)
- ㉒ Fumio KOJIMA, Arihiro MIWA, Hirota NAKAJIMA, Akinori FURUSAWA, and Hiroyuki NAKAMOTO, Mode analysis of ultrasonic testing using magnetic device and its application to inspection of illumination pillars (Invited Talk), The third International Symposium on Smart Layered Materials and Structures for Energy Saving, 2015. 10. 28, Sendai International Center (Miyagi)
  - ㉓ Fumio KOJIMA and Akinori FURUSAWA, Impact modeling of electromagnetic acoustic transducer for guided wave testing (Invited Talk), The 4th International Conference on Applied Mathematics, Design and Control Mathematical Methods and Modeling in Engineering and Life Sciences, 2015. 11. 4, Buenos Aires (ARG)
  - ㉔ 三輪 有弘、古澤 彰憲、中本 裕之、中村 大地、小島 史男、超音波ガイド波の照明柱検査への適用、第 24 回 MAGDA コンフェレンス in Tohoku、2015. 11. 12、東北大学 (宮城県)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小島 史男 (KOJIMA, Fumio)  
神戸大学・  
大学院システム情報学研究科・教授  
研究者番号：70234763

### (2) 研究分担者

中本 裕之 (NAKAMOTO, Hiroyuki)  
神戸大学・  
大学院システム情報学研究科・助教  
研究者番号：30470256

### 2) 研究分担者

宇佐美 照夫 (USAMI, Teruo)  
京都学園大学・経済経営学部・教授  
研究者番号：60456746