

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 26 日現在

機関番号：11101

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2015

課題番号：15K13821

研究課題名(和文)新FeCo合金の大逆磁歪・ロバスト加工性を活かした機械構造物経年変形センシング

研究課題名(英文) Degradation sensing of the machines and infrastructures by the inverse magnetostrictive effect of new and robust magnetostrictive FeCo alloy

研究代表者

古屋 泰文 (FURUYA, YASUBUMI)

弘前大学・北日本新エネルギー研究所・教授

研究者番号：20133051

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：申請者(弘前大・古屋)グループが2011年に開発した、新開発の大磁歪、高感度、加工量産性・低コストを達成した、ロバスト(堅牢)な鉄基FeCo過剰型磁歪合金素材(技術シーズ、特許3件申請済み)を、機械・建設系構造物の支柱や梁構造に固定設置し、負荷応力に伴う“逆磁歪漏れ磁束・発電効果”を利用した経年変形・劣化診断用のセンサ計測システムの可能性を調査した。FeCo線材の熱処理で磁歪感度は3倍以上増加し、また、磁歪線材をアルミ梁に接着し曲げ変形による漏れ磁束を計測し、わずかであるが曲げによって漏れ磁束が変化したので、逆磁歪効果を利用した力センサの可能性は十分あることが分かった

研究成果の概要(英文)：A new development of FeCo alloy having large magnetic strain and its high sensitivity has developed in 2011 by Dr.Y.Furuya of Hirosaki University It is also robust mechanical properties as well lower cost and mass-productivity. It was already applied for the degradation sensing of the machines and infrastructures under cyclic loading, where the "reverse magnetic strain flux leakage and the following generating electricity effect" were used. The magnetic strain sensitivity was increased more than 3 times by heat-treatment of FeCo wire and then, the inverse magnetic effect .i.e. leakage of magnetic flux was measured from the deformed wire rods which was attached on the aluminum beam by deflection due to bending test. As a result, a considerable flux leakage changed by a cyclic bending. Therefore, it was clarified that a possibility of the force sensor as well as non-destructive degradation sensing by using the reverse magnetic strain effect of FeCo wire under cyclic deformation.

研究分野：知能材料工学

キーワード：逆磁歪効果 磁気センサ 磁歪合金 経年劣化 インフラストラクチャー 非破壊検査

1. 研究開始当初の背景

大型機械・インフラ構造体骨組みの経年の劣化・変形(歪み)や損傷診断に関する測定法に関しては、これまでに、ストレインゲージ法、光ファイバ法、渦電流法などが試みられてきているが、これらは表1に示されるように、センサ部分を構造体の表面や内部に埋め込み方式で計測する方式である。一方、本提案技術は、構造体事態を構成・補強する部材に強度と機械加工性を有する、高感度の新鉄基磁歪合金素材自身を設定し、かつ、応力・歪負荷に伴い発生する、漏れ磁束をセンシングに利用する、“逆磁歪法”という質的に異なる非破壊的な新計測技術提案である。

表1 インフラ変形・経年劣化への非破壊検出法の原理・特徴

計測方法・特徴	原理	利点	欠点	備考
ひずみゲージ法	金属接着剤の電圧抵抗変化	計測容易、普及型、精度高い(マイクロストレーン)	経年劣化、接着剤ブリッジ破壊、零点計測のみ	接着剤劣化、消耗品コスト高
光ファイバ法	石英ファイバ内部での光干渉縞から歪計測	高感度、非破壊、長距離、埋込み可能	ファイバ(脆性)、点計測、温度影響大	経年劣化少、形状分布不可、設置高価
渦電流法	高周波コイルプローブ先端での電磁誘導・相互干渉効果利用	磁歪反応、比較的簡単なセンサプローブ、ポータブル性	周辺ノイズ影響、多くの金属に反応、検査やや高価	対象物の磁歪精度問題、反応因子多い
逆磁歪法	歪力(歪)発生、素材表面の漏れ磁束の強さから歪算	磁歪性(鉄系)のみ反応、シンプル原理、非破壊型(コイルレス)	強磁性体材質に限定、漏れ磁束量は弱い	素材(磁歪感受率)に敏感、低コスト、経年劣化は少

磁歪 (Magnetostriction) とは、磁化過程において、ミクロ的磁気モーメント(磁区、ドメイン)の移動に伴い、わずかな歪を発現する現象である。一方、逆磁歪とは、応力を加え金属結晶歪を加えると、漏れ磁束が発生し、材料外周コイルに起電力が発生する物理現象 (Villari 効果) で、応力(歪)センサや振動発電に応用が展開されてきている。(図1参照) 提案方式のセンサ実現には、逆磁歪効果の大きな素材の選択がまず大事であるが、2000年前は、実用磁歪合金は、すべて希土類系(Terfbnol-D)であり脆弱で加工性が悪く、量産も困難で高価であった。この点、米国発明(2000年)の磁歪合金FeGa系が注目されて磁歪関連の応用デバイス研究も活性化しているが、更に飽和磁束密度、剛性、磁歪感度の大きな強磁性2元素のFeCo系素材の適用有利さを

研究申請者(弘前大学からの出願特許2)は検証するに至った。特に、技術シーズとなる未踏域Co過剰域(Co 65~76at%)でのFeCo合金の磁歪、磁気特性の組成依存性とともにより優れた磁歪感受率(=逆磁歪効果)を利用した、トルクセンサや振動発電特性データ蓄積を申請者らは最近公表している。

新FeCo磁歪合金は、環境変化にロバスト

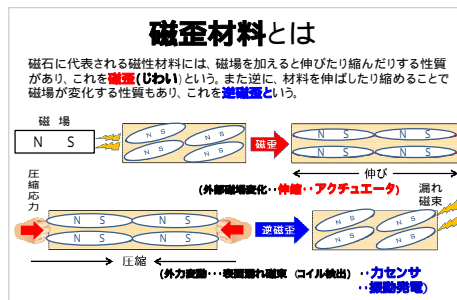


図1 磁歪発現そのセンサ応用(逆磁歪効果)

で、キューリー点は900と高く、常温物性も安定で、従来の点計測の抵抗線歪みゲージ法や光ファイバ法の技術課題克服策となる。大型機械やインフラ構造物の経年劣化・変形センシング技術分野で、内外で独自のスマート材料イノベーションが期待できる。この“磁歪・発電合金”機能性を用いた初めてのスマート材料・デバイスを活用した構造健全性診断技術開発(スマートストラクチャー・ヘルスマニタリング)への基盤技術に関する実証型研究である。新磁歪合金素材開発の上に立った独自の発想による新規な研究提案(“逆磁歪ひずみ計測法”)であり、内外で取組み事例はなく、次世代のスマートセンデバイス設計工学への学術貢献も期待できる。

2. 研究の目的

大きな逆磁歪効果を発現するこの素材は、申請者代表(弘前大、古屋研グループ 2011年)らが開発してきた、大磁歪感度、強度(ロバスト性)と機械加工性を併せ持つ、新鉄基・非希土類系“FeCo過剰型磁歪合金”(69Co 76at%、大学シーズ:特開2013-177664)であり、東北特殊鋼(株)との産学共同プロジェクト(2001年度~)から、工場製造ラインで一定品質での量産化・低コ

スト化に成功メドを付けている。この新開発の大磁歪、高感度、加工量産性・低コストを達成した、ロバスト（堅牢）な鉄基 FeCo 過剰型磁歪合金素材（技術シーズ、特許 3 件申請済み）を、機械・建設系構造体の支柱や梁構造に固定設置し、負荷応力に伴う“逆磁歪漏れ磁束・発電効果”を利用した経年変形・劣化診断用のセンサ計測システムの可能性を調査する。そして、機械・建設系構造体の支柱や梁構造に固定設置し、負荷応力に伴う“逆磁歪漏れ磁束・発電効果”を利用した経年変形・劣化診断用のセンサ計測システム基盤技術の確立を目的とする。

3. 研究の方法

本実験で使用する試料（素材）は、アーク溶解により作製した FeCo 合金および比較材料として FeCoV、FeGaAlZrC も用いた。まず、強加工（線引き）で得た FeCo 線材（直径 = 1 mm）や薄板試料（厚さ 1[mm]、幅 2[mm]、長さ 34[mm]）に加工して使用した。これらの試料の磁化特性を、VSM、磁歪特性をひずみゲージで計測し、X 線構造解析によって、その結晶構造を解析して、バルク溶解材と比較して、磁気・磁歪特性の変化を調べた。振動発電能の計測・評価は、材料の種類（異なるヤング率 E）や梁の長さ（質量 m、長さ l）を変えて電圧の出力特性、周波数特性を調査した。図 2 に今回用いたアルミ梁に磁歪材料及びコイルを接着した振動発電機能試験の実験概要図を示す。はりを振動させる加振器は日本スリーバー・サイエンティフィック株式会社製振動発生装置を用いた。また、コイルについてはソレノイドコイル（8100 巻き）を用いた。

4. 研究成果

図 3 に FeCo の磁歪曲線を示す。飽和磁歪量は 107[ppm]、磁歪定数は 82[1/kOe]となった。

表 2 に図 3 から求めた飽和磁歪量、磁歪定数を示す。飽和磁歪は FeCo66、FeCo66、純鉄の順だった。また磁歪定数については

表 2 各磁歪合金の飽和磁束密度と磁歪定数（感受率）の比較

Sample	Saturation Magnetostriction λ [ppm]	Magnetostriction constant d [1/kOe]
Fe34Co66	107.6451613	82.5765
Fe49Co49V2(Cold rolling)	67.4	37.832
FeGaAlZrC	50.76315789	56.035

FeCo66, FeGaAlZrC、FeCoV の順であった。

さらに、振動負荷（繰返し応力）条件下での、試験片からの逆磁歪効果（漏れ磁束）強さの指標を得るために。図 4 には各磁歪

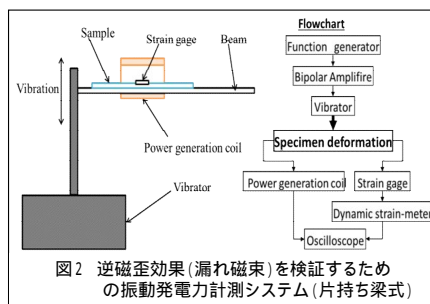


図 2 逆磁歪効果（漏れ磁束）を検証するための振動発電計測システム（片持ち梁式）

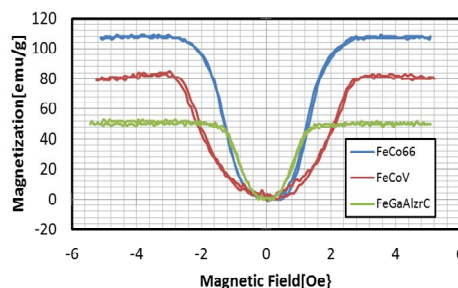


図 3 各種磁歪合金の磁歪曲線の比較

材料コイルから検出された振動電出力特性を示すが、磁歪量と磁歪感受率が高い FeCo66（Co 過剰型）磁歪合金が一番大きな値を示しており、機械構造物。インフラ診断用のセンサ材料としては適していることが判明した。

次に、単純引張り試験における、応力センサ感度について調べた。ワイヤー（1 mm）表面からの漏れ磁束を検出した。これは、磁気センサ部での測定原理は、磁歪合金が外力（応力）を受けると、その表面から応力に対応した形で漏れ磁束が発生する、いわゆる“逆磁歪現象”を利用する。その漏れ磁束の強さを、高感度の磁気センサ（ガウスメータ、ホール IC）で経年・継続的

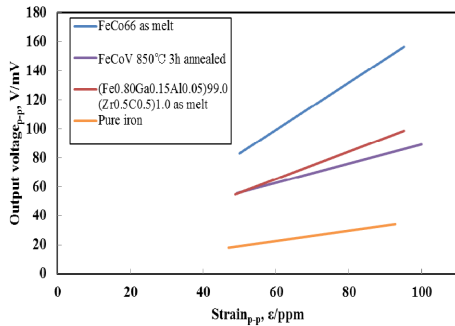


図4 各磁歪合金の振動発電力の比較

に計測し、歪み蓄積や損傷劣化を非破壊評価できることになる。

図5には、単純引張り試験における応力と漏れ磁束の相関性を示す。磁束センサ反対面にバイアス磁石の有無で磁束量および変化勾配（感度）はことなり、適切なバイ

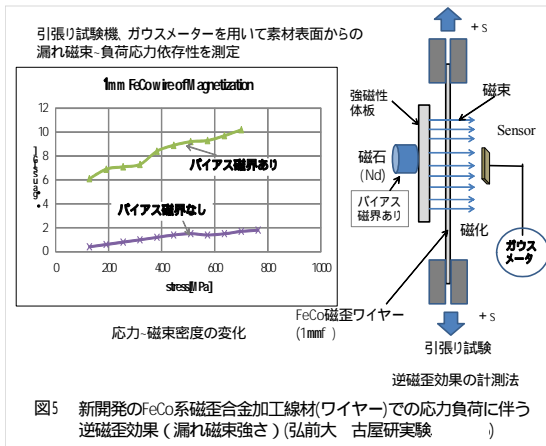


図5 新開発のFeCo系磁歪合金加工線材(ワイヤー)での応力負荷に伴う逆磁歪効果(漏れ磁束強さ)(弘前大 古屋研実験)

アス磁場と計測部の調整も注意する必要性がわかる。

以上から、材料磁気特性項目の中で、以下の因子を揃えることが必須となる。(1) 磁歪量()が大きい、(2) 磁歪感受率(勾配: $dm = d / dH$)が大きい (3) 磁化曲線(ヒステリシスカーブ) での残留磁束密度(B_r)が大きいこと、保磁力(H_c)が中程度あること、(4) 結晶異方性、即ち、鉄の容易磁化軸< 1 0 0 >配向性強い素材を作製することが重要である。 磁歪(逆)特性は、磁区の易動度(再配列しやすさ)に敏感であり、そのためには、加工後の熱処理で材質改善を行うことで、磁歪感度は大いに改善できることを実証できた。また、磁歪素材表面からの応力負荷に伴う漏れ磁束はせいぜい数 ~ 1

0 Oe (エルステッド)程度と小さいので、センサ外部からの電磁ノイズ遮断対策が不可欠である。また、インフラ構造体での2次元的面状の歪み(応力)分布、劣化診断を計測可能とする。この場合、漏れ磁束は素材表面からの距離に敏感であるので、センサ先端部と素材表面での計測間隔を精度よく一定に保つセンサ移動・距離精度保持に機構に工夫が要ることが判った。

以上の知見を以下にまとめて結論とする。本研究では、ロバスト(堅牢)な鉄基 FeCo 過剰型磁歪合金素材(技術シーズ、特許3件申請済み)を、機械・建設系構造体の支柱や梁構造に固定設置し、負荷応力に伴う“逆磁歪漏れ磁束・発電効果”を利用した経年変形・劣化診断用のセンサ計測システムの可能性を調査した。そして、磁歪線材を組み入れたアルミ梁構造物への力センサとしての実証実験を行って、以下の知見を得た。

1. Fe29Co71[mass%]は結晶構造回析により配向性を持ち、熱処理により、飽和磁歪量は1.3倍、磁歪感受率は最大3.5倍上昇して、応力下での漏れ磁束を増して高感度力センサとなることが判った。
2. 熱処理し磁歪感受率が増加した材料の引張り試験から、漏れ磁束の感度は0.0264mT/ μ と未熱処理に比べ13倍近くとなった。
3. インフラ構造物用の力・歪センサとして、磁歪線材をアルミ梁に接着し曲げ変形による漏れ磁束を計測し、わずかであるが曲げによって漏れ磁束が変化したので、逆磁歪効果を利用した力センサの可能性は十分ある。
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1件)
(1) 木村奈津子、久保田健、古屋泰文、急冷CoFe合金薄帯の磁気・磁歪特性におよぼす熱処理・圧延効果、日本金属学会誌、査読有、2015,79-9, 441-446

[学会発表](計4件)
(1) 古屋泰文 ロバストFeCo系磁歪合金の逆磁歪利用スマートセンサ・振動発電

バイス設計, MRS-J2015 年度年次大会
(Key-note 講演), A3-K9-00, (横浜、
12.2015)

(2) 木村奈津子、久保田健、古屋泰文、
Co75Fe25 の急冷薄帯とバルク材における磁
気特性の比較およびセンサへの応用に向け
た検証、MRS-J2015 年度年次大会, A3-010-003,
(横浜、12.2015)

(3) 古屋泰文、木村奈津子、山本貴久、久保
田健、横山紀雅、山浦真一、新開発 FeCo
過剰型磁歪合金の特性を生かした逆磁歪利
用センサ・アクチュエータデバイス、
MRS-J2015 年度年次大会, A3-010-004,(横浜、
12.2015)

(4) 古屋泰文、木村奈津子、久保田健、山浦 真
一、ロバスト FeCo 合金の磁気・磁歪特性
とスマートデバイスへ応用展開, 日本機械
学会・2015 年度情報・知能・精密機器部門
講演論文集
(CR-ROM)(東京 3,2016)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕
特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古屋泰文 (FURUYA YASUBUMI)

弘前大学・北日本新エネルギー研究所・教授
研究者番号：20133051