

令和 元年 6 月 18 日現在

機関番号：11201

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2016～2018

課題番号：15KK0193

研究課題名（和文）傾斜磁区を有する高感度・超小型磁界センサ開発と局所領域の微小磁界計測への応用展開（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Development of miniaturized magnetic field sensor with higher sensitivity using inclined magnetic domain and its application for detection of localized weak field(Fostering Joint International Research)

研究代表者

菊池 弘昭 (Kikuchi, Hiroaki)

岩手大学・理工学部・准教授

研究者番号：30344617

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,500,000円

渡航期間： 6ヶ月

研究成果の概要（和文）：磁気インピーダンス効果を利用した薄膜磁界センサの小型化を検討し、1ミリ長の素子で300%のインピーダンス変化率を実現した。この値は薄膜で実現した場合にこれまで報告例のない高い値である。また、30ミクロンに小型化した素子において20%以上の変化率を実現できた。この寸法で大きな変化率を実現できたことで高感度・高空間分解能を有する磁界センサの実現可能性を明らかにしたことに意味がある。一方、高感度な小型磁界センサを組み込んだスキャニング型の電磁非破壊評価システムを開発し、30ミクロン程度の鋼材の欠陥を検出可能にするとともに、非磁性体が劣化により局所的に一部強磁性化する事例にも対応可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

社会基盤構造物の高経年化が進展しており、その健全性評価が重要であるとともに、構造物を構成する上で不可欠な鋼材を提供する鉄鋼会社においては、その信頼性評価が必要で、いずれの場合も非破壊評価が重要な役割を果たす。鋼材は磁性を示すことから電磁的な評価が適用可能でその技術の高度化が期待されている。高度化のひとつとして検査領域の局所化への対応がある。本研究成果は高感度を維持しつつセンサ素子の小型化を実現したもので、検査領域の局所化へ対応するものである。同時にシステム構成を実演したものであり、人々の安心、安全な暮らしの実現へ貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：Miniaturization of highly sensitive thin-film sensor element using magnetoimpedance effect was investigated. The element with 1 mm achieved 300% of impedance changes, which has not been reported elsewhere. The element with 30 micrometers length with 20% impedance changes was also accomplished. This is also significant that such miniaturized sensor element shows superior performance. Meanwhile, a scanning system of electromagnetic nondestructive evaluation using highly sensitive and small sized magnetic field sensor was developed. The inclusion with 30 micrometers diameter in steel can be detected using the system. The system also enables us to detect weaker field by localized ferromagnetic areas due to deterioration of materials.

研究分野：電磁非破壊評価

キーワード：電磁非破壊評価 薄膜磁界センサ 微小欠陥検出

1. 研究開始当初の背景

社会基盤構造物の経年劣化が進行しており、その健全性評価が急務であり、電磁現象を利用した非破壊評価技術の高度化への期待が世界的に高まりを見せている。その高度化のためには高感度かつ小型な磁界センサが重要な役割を果たすと期待される。磁気インピーダンス効果を用いたセンサが大きく貢献できると考え、その小型化を進めており、より高感度化について検討の必要がある。また、その高感度磁界センサの適用先としてバルクハウゼンノイズ計測、渦電流計測、磁束漏洩計測が考えられ、特に渦電流計測、磁束漏洩計測においては検査対象の局所化や微小化から高感度・高空間分解能な磁界センサが求められている。例えば、鋼材中における 50  $\mu\text{m}$  以下の非磁性を示す欠陥の検出や非磁性材料が劣化により強磁性化する様子を検出する必要がある。そのため、小型・高感度な磁界センサを組み込んだ電磁非破壊評価システムの開発が望まれる状況にあった。

2. 研究の目的

磁束漏洩法などの電磁非破壊評価においてこれまでは、配管減肉など比較的大きい欠陥を対象としてきたが、鋼材に含まれる介在物等微小物を検知する用途への適用も期待されている。その場合、強磁性体中の非磁性体による磁場の乱れを検出することになるが、その乱れは強度的・空間的に非常に微小なので、高感度で小型な磁界センサが必要である。このような背景に対処すべく、薄膜磁界センサの小型化を推進するとともに薄膜磁界センサを用いた電磁非破壊評価用のスキャンニングシステム開発を国際共同研究で実施する。

3. 研究の方法

(1) 薄膜磁界センサの小型化

センサ自身の小型化については、CoZrNb アモルファス薄膜を利用したものについて岩手大学を中心に、また、NiFe と Cu を積層したものについては、ザールラント大学協力のもと作製した。いずれの場合も、スパッタ装置により成膜し、フォトリソ技術によりパターニングをした。小型化で高感度を目指すことから、素子長は 1 mm 以下の素子を作製し、ネットワークアナライザを用いて素子インピーダンスの外部磁界依存性を計測し、変化率や感度について評価した。

(2) 小型高感度磁界センサを用いたスキャンニングシステム

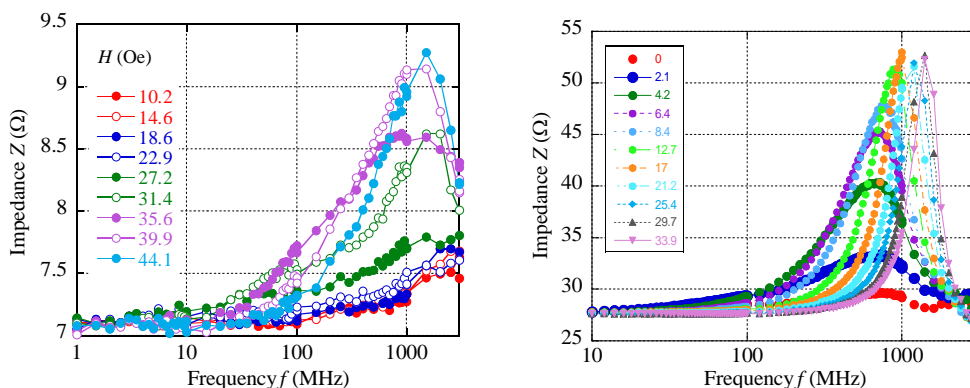
1.5 mm からサブ mm と比較的小型な磁界センサと試料励磁用の磁気ヨークから構成される励磁系と 3 次元に移動するステージを用いて、スキャンニングシステムを構成した。スキャンニングシステムの制御やソフトウェアについてはフラウンホーファー研究所が開発したものを使用した。

4. 研究成果

(1) 薄膜磁界センサの小型化

インピーダンスの周波数特性

図 1 は、作製した単層アモルファス CoZrNb 薄膜及び NiFe/Cu 多層膜の磁気インピーダンス素子のインピーダンスの周波数特性の一例を示した図である。外部磁界を変化させている。素子長はそれぞれ 30  $\mu\text{m}$  及び 700  $\mu\text{m}$  と 1 mm 以下に小型化したものである。どちらの場合でも磁界印加がゼロの場合、インピーダンスは低周波で一定であり、高周波で増加が見られる。磁場を印加すると高周波、特に 1 GHz 付近でのインピーダンス上昇が著しい。1 GHz 付近での高感度な磁界センサ動作が期待できる。また、特徴的なこととして高周波域で大きな変化を得るために印加する磁界強度はより小型化した素子の方がより強い磁界が必要な点である。これは、反磁界の影響によるものである。

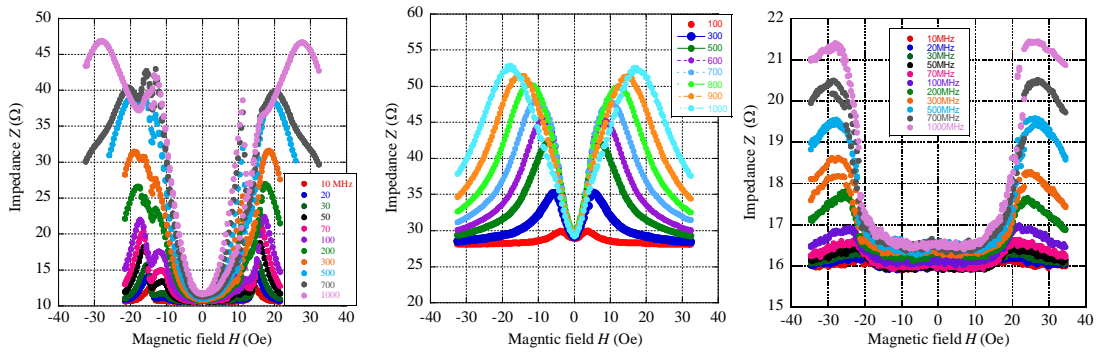


(a) CoZrNb 単層 (b) NiFe/Cu 多層膜

図 1 インピーダンスの周波数特性

## インピーダンスの磁界依存性

図 2 は各周波数における素子インピーダンスの外部磁界依存性を示したものである。(a) は膜厚 3  $\mu\text{m}$  で素子長が 1 mm のもので、本研究のなかで、最大のインピーダンス変化を示した場合である。変化率は 1 GHz で 300% に達しており、1 mm 長以下まで小型化した薄膜磁気インピーダンスセンサの値としてはこれまで報告例のない結果である。(b), (c) はそれぞれ多層膜センサと単層膜センサの結果の一例であり、多層膜では磁性層厚のトータル 1  $\mu\text{m}$  以下、700  $\mu\text{m}$  長、単層膜では膜厚 2  $\mu\text{m}$ 、100  $\mu\text{m}$  長である。最大変化率としては、83%、30% を得た。積層構造の場合、電流を導体層に支配的に通電する形が期待されるので、低インピーダンス化を実現しやすいこと、反磁界の効果を低減できることが小型化の際のメリットである。一方、単層膜は複雑積層構造を有しないことと表皮効果がより顕著なる傾向にあるが、反磁界の強度・分布低減が課題となる。本研究では、100  $\mu\text{m}$  以下に小型化した単層膜素子においては形状工夫により反磁界の問題の低減を図り、30  $\mu\text{m}$  まで小型化した素子においても 1 GHz で 20% 以上の変化率を実現できた。このタイプの磁気センサにおいては、材料の持つ磁気異方性の制御が重要であるが、小型化した素子において図 2 のような特性を示すものについては磁区観察から異方性制御できていることを確認した。ただし、100  $\mu\text{m}$  以下の素子では、その端部の磁区構造が一部制御できていないことも確認され、より小型化して高感度化を実現するための課題として見出された。



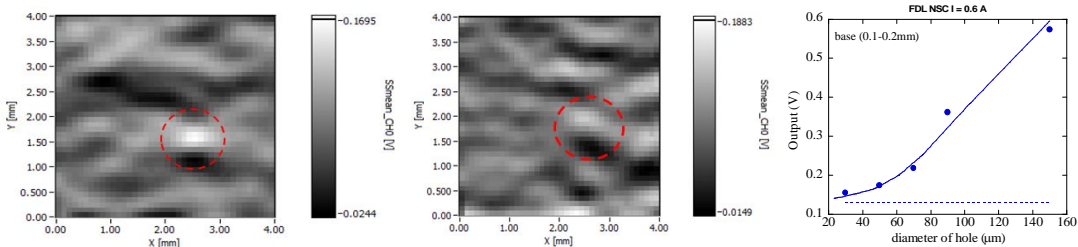
(a) 単層 3  $\mu\text{m}$  厚、長さ 1 mm (b) 多層膜、長さ 700  $\mu\text{m}$  (c) 単層 2  $\mu\text{m}$  厚、長さ 100  $\mu\text{m}$

図 2 小型素子のインピーダンスの外部磁界依存性

## (2) 小型高感度磁界センサを用いたスキャンシステム

### 鋼材の微小欠陥検出

測定試料には低炭素鋼を用いた。微小欠陥を模擬して、鋼材中に直径 150  $\mu\text{m}$  から 30  $\mu\text{m}$  で深さが 0.5 mm 以下の穴を加工した。これらを珪素鋼板で作製した磁気ヨーク上に配置し、磁気ヨークに巻いた励磁コイルに電流を印加することにより試料を磁化した。試料直上に磁気センサを配置して、磁気センサを 2 次元的にスキャンして漏れ磁束分布の 2 次元図を作製した。磁場計測には、市販の GMI (磁気インピーダンス型センサ) 及び GMR (巨大磁気抵抗型) センサを用いた。図 3 (a), (b) は、径が 50  $\mu\text{m}$  及び 30  $\mu\text{m}$  穴を有する鋼材を GMR センサでスキャンしたときの表面漏れ磁束の 2 次元図である。検出磁場は試料内の印加磁界方向 (图中 Y 方向) と平行方向成分である。印加磁界は 26 A/cm であり、穴の周囲 4 mm  $\times$  4 mm の範囲をスキャンした。50  $\mu\text{m}$  及び 30  $\mu\text{m}$  の穴いずれも検知できていることがわかる。ただし、30  $\mu\text{m}$  径の穴を有する試料においては、バックグラウンドノイズの影響が大きくなっている。また、今回の検討では GMR センサを異なる 2 点に配置し、その差分の変化を見ている。図 3 (c) は 2 次元マップにおいてピークの最大値を穴の径に対してプロットした図で、30  $\mu\text{m}$  径の穴までの信号変化を得ている。穴の径に依存して信号出力は変化しているが、現状では穴のサイジングは難しい点や 30  $\mu\text{m}$  以下の穴の検出は今後の課題である。30  $\mu\text{m}$  以下の検出については、鋼材の表面状態分布もしくは表面付近の内部組織の磁気特性を反映している可能性もあり、新たな検討課題として挙げられる。また、GMI センサについては、径 100  $\mu\text{m}$  までの穴の検出は実験的に確認できた。こちらの測定限界については、センサ素子のサイズならびに微小磁界しか印加できない点が挙げられる。



(a) 50  $\mu\text{m}$  径

(b) 30  $\mu\text{m}$  径

(c) ピーク値と穴の径の関係

図 3 GMR センサを利用した鋼材微小欠陥の検出



## インコネル材の強磁性化検出

試料には発電プラントの蒸気発生器細管等に用いられているインコネル 600 合金を用いた。この合金は通常、非磁性であるが、Cr の欠乏が生じて、耐食性が劣化した部分では強磁性を示すことが知られている。強磁性化する箇所は粒界に沿っての局所的な領域であるため、磁気信号は微弱になる。よって高感度磁界センサが必要となる。ここでは、試料を熱時効して強磁性化の状態を変化させた試料を で使用したものと同様のシステムで漏れ磁束マッピングを行った。ただし、走査時に磁気ヨークでの励磁は行わず、別途一度飽和まで励磁させた後の残留磁化状態で評価を行った。検出磁場は試料に対して垂直成分とした。図 4 (a) は、漏れ磁束を計測して 2 次元マップを作製した結果である。熱時効をした場合、時効時間 200 時間程度までは、Cr 欠乏が進み、強磁性化が増進し、200 時間を超えると Cr 濃度の回復が生じ、強磁性化が減少していくことが、過去研究で明らかになっている。今回、磁界センサによりマッピングした結果は、それらの傾向と一致した。図 4 (b) は、VSM(振動試料型磁力計)により試料の磁化曲線を測定し、その結果から求めた飽和磁束密度と今回のマッピングで求められたセンサ出力の値を時効時間に対してプロットした図であり、両者とも対応した結果となっていることが明らかである。

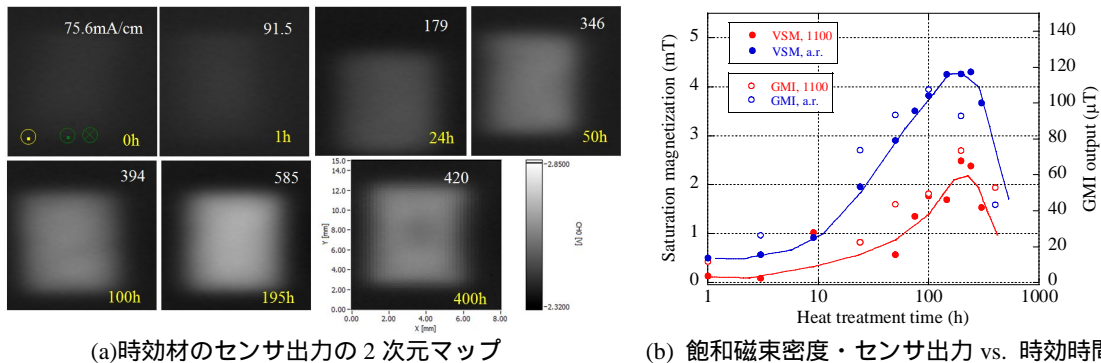


図 4 熱時効したインコネル材の表面漏れ磁束分布検出

## 5 . 主な発表論文等

(研究代表者は下線)

[雑誌論文](計 6 件)

H. Kikuchi, C. Sumida, Observation of changes in static domain structures of thin-film magnetoimpedance elements with DC bias current, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 55, No. 2, article # 4001405, pp. 1–5, 2019. 査読有 DOI: 10.1109/TMAG.2018.2860582

菊池弘昭, 梅崎泰生, 島拓也, 住田千尋, 大江駿, 微細化した薄膜 MI 素子の外部磁界・周波数依存性, 電気学会研究会資料, MAG-18-222, 2018. 査読無

H. Kikuchi, C. Sumida, Incident power influence on magnetoimpedance element with domain wall resonance, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 54, No. 11, article # 4001605, pp. 1–5, 2018. 査読有 DOI: 10.1109/TMAG.2018.2854863

H. Kikuchi, C. Sumida, Analysis of asymmetric property with DC bias current on thin-film magnetoimpedance element, AIP Advances, Vol. 8, No. 5, #056618, pp. 1–5, 2018. 査読有 DOI: 10.1063/1.5006709

H. Kikuchi, S. Oe, H. Uetake, S. Yabukami, Behavior of sensitivity at edge of thin-film magnetoimpedance element, AIP Advances, Vol. 7, No. 5, #056602, pp. 1–5, 2017. 査読有 DOI: 10.1063/1.4972889

H. Kikuchi, T. Shima, H. Uetake, S. Yabukami, Magnetoimpedance characteristics on micromachined thin-film elements with length less than 100  $\mu\text{m}$ , IEEE Magnetics Letters, Vol. 7, No. 1, #6508105, pp. 1–5, 2016. 査読有 DOI: 10.1109/LMAG.2016.2614795

[学会発表](計 6 件)

菊池弘昭, Ralf Tschuncky, Klaus Szielasko, 磁気センサを利用した鋼材中の 100 $\mu\text{m}$  以下の微小欠陥検出, 第 31 回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム SEAD31, 東京工業大学, 2019. 5. 21-23.

菊池弘昭, 梅崎泰生, 島拓也, 住田千尋, 大江駿, 微細化した薄膜 MI 素子の外部磁界・周波数依存性, 電気学会研究会資料, 東北大学, 2018. 12. 20-21, MAG-18-222.

菊池弘昭, Ralf Tschuncky, Klaus Szielasko, 高感度磁気センサを利用した鋼材中の微小欠陥検出, スピニクス特別研究会, 東北大学, 2018. 11. 15-16.

H. Kikuchi, S. Oe, C. Sumida, T. Shima, S. Kamata, Comprehensive analysis of frequency dependence on miniaturized thin-film magnetoimpedance element, PIERS2018, Toyama, Aug. 1-4, 2018.

S. Oe, H. Kikuchi, H. Uetake, S. Yabukami, Behavior of sensitivity at edge of thin-film

magnetoimpedance element, The 61st Annual Magnetism and Magnetic Materials (MMM) Conference, New Orleans, Louisiana, USA, Oct. 31- Nov. 4, 2016.

H. Kikuchi, T. Shima, H. Uetake, S. Yabukami, Magnetoimpedance characteristics on micromachined thin-film elements less than 100-micrometers length, IcAUMS2016, Tainan, Taiwan, Aug. 1-5, 2016.

〔図書〕(計1件)

菊池弘昭他, 磁性材料・部品の最新開発事例と応用技術 [技術情報協会], 第5章 磁気計測, 磁気センサへ向けた磁性材料開発と高感度化 第4節 磁気インピーダンス効果を用いた小型高感度磁気センサ素子の開発, pp. 213-219, 2018.

## 6 . 研究組織

### 研究協力者

〔主たる渡航先の主たる海外共同研究者〕

研究協力者氏名：Klaus Szielasko

ローマ字氏名：Klaus Szielasko

所属研究機関名：Fraunhofer Institute for Nondestructive Testing (IZFP)

部局名：Department Materials Characterization

職名：Head of department

研究協力者氏名：Ralf Tschuncky

ローマ字氏名：Ralf Tschuncky

所属研究機関名：Fraunhofer Institute for Nondestructive Testing (IZFP)

部局名：Department Materials Characterization

職名：Group Manager

〔その他の研究協力者〕

研究協力者氏名：Uwe Hartmann

ローマ字氏名：Uwe Hartmann

研究協力者氏名：Gregor Buttler

ローマ字氏名：Gregor Buttler

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。