

## 研究課題別評価書

### 1. 研究課題名

ナノスケール分解能スピン共鳴原子間力顕微鏡の開発

### 2. 氏名

安 東秀

### 3. 研究のねらい

近年、大きな関心を集めているスピンエレクトロニクス創成の研究動向のなかで、今後、物質中のスピンダイナミクスをマイクロメートル、さらには、ナノスケールの空間分解能で解明することが必須となっている。そのなかで、走査プローブ顕微鏡(SPM)を用いた磁気共鳴(スピン共鳴)現象の検出は、ナノスケールでのスピンダイナミクスの情報を得る有用な手法であると期待される。

本研究では、探針を用いて探針直下の局所領域に高周波磁場を印加し、磁気共鳴を局所に励起及び検出する走査磁気共鳴顕微鏡の開発を目的とする。磁気共鳴の検出手法として、(1)探針から試料へ電氣的にマイクロ波を入力する方法(電氣的手法)、(2)高周波で機械振動する探針を用いて試料近傍にマイクロ波帯域の変調磁場を発生する方法(機械的手法)の二種類を採用し、磁気共鳴信号検出の空間分解能をナノスケールまでに飛躍的に高めることを狙って研究を行った。

### 4. 研究成果

図1に走査磁気共鳴顕微鏡の概念図を示す。探針を用いて探針直下に磁気共鳴周波数に相当する高周波磁場を印加することにより、磁気共鳴を局所に励起及び検出する。さらに、探針を二次元に走査し、磁気共鳴信号を空間分解検出する。

具体的には、(1)探針から試料へ電氣的にマイクロ波を入力する方法(電氣的手法)、(2)高周波で機械振動する探針を用いて試料近傍にマイクロ波帯域の変調磁場を発生する方法(機械的手法)の二種類を採用した。以下に、それぞれの研究成果について詳述する。

#### 4-1.1. 高周波(RF)プローブを用いた電氣的手法による、磁気共鳴検出

電氣的手法では、図2に示すように、同軸型のセミリジッドケーブルを高周波(RF)プローブとして使い、探針先端からマイクロ波(0-10 GHz)を試料表面に照射して磁気共鳴を励起



図1. 走査磁気共鳴(スピン共鳴)顕微鏡の概念図

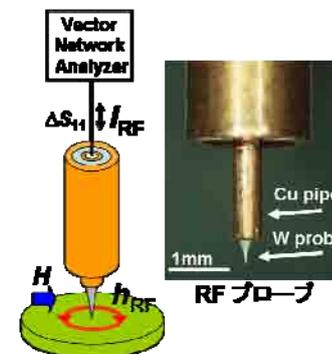


図2. 電氣的手法を用いた磁気共鳴検出

する。磁気共鳴検出は、入力マイクロ波の反射シグナルである $S_{11}$ 信号をネットワークアナライザを用いて測定し、磁気共鳴による吸収を検出する。RFプローブ先端にはタングステン探針が装着され、走査トンネル顕微鏡 (STM)探針として用いることができる。

まず、RFプローブによる空間分解磁気共鳴検出を示す適当な試料として、フェリ磁性体であるガーネット(YIG)の多結晶円板(直径10mm, 厚さ1mm)を選んで研究を行った。図3に示すように、高周波プローブを試料中心直上(center)に配置すると、強磁性共鳴(FMR)信号が $f_1 = 2.79$  GHz(水平磁場44 kA/m (550 Oe))の周波数に観測された。続いて、静磁場と水平方向(図3(a))及び垂直方向(図3(b))へ探針を試料中心(center)から試料端(edge)へ移動すると、それぞれ、 $f_2 = 3.07$  GHz,  $f_3 = 3.13$  GHzの周波数に新たな強磁性共鳴(FMR)信号が計測された。

さらに、試料全体をRFプローブを用いて走査した結果、 $f_1, f_2, f_3$ 、それぞれのFMR信号の二次元マッピング像が得られた(図4)。解析の結果、これらは試料端で反射されたスピン波(静磁波)が定在波を形成する際の異なる固有モードであると理解される。観測された固有モードの空間分布及び周波数から、それぞれが静磁場と平行( $f_1, f_2$ )、垂直( $f_3$ )な方向に伝播するスピン波モードであることを明らかにした(IEEE, Mag. Lett. in press)。

以上、RFプローブを用いた電気的手法によりサブミリメートルのスケールでの磁気共鳴検出が可能であることを示したが、続いて、より微小な(薄膜)試料を用いてRFプローブの高空間分解能化と磁気共鳴信号の高感度化に取り組んだ。これまでに、RFプローブを用いて、Bi:YIG 薄膜(膜厚 $\sim 5\mu\text{m}$ 、セラミックス基盤工学研究センター、安達氏より提供)よりFMRシグナルを得ている(図5、3種類の異なる静磁場におけるFMRシグナルを

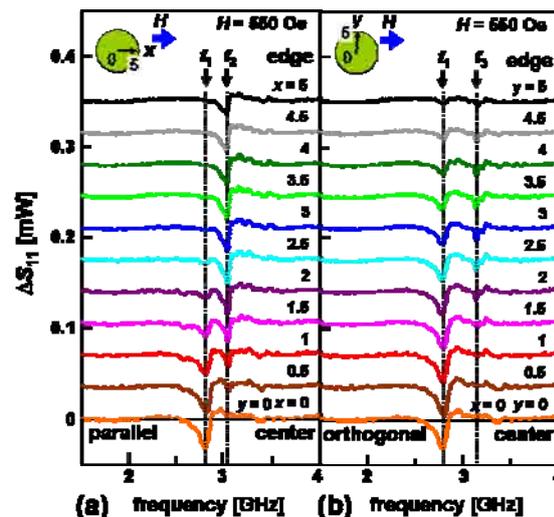


図3, RFプローブを用いたガーネット(YIG)試料からの強磁性共鳴(FMR)の空間分解検出, 静磁場に対して(a)平行, (b)垂直方向

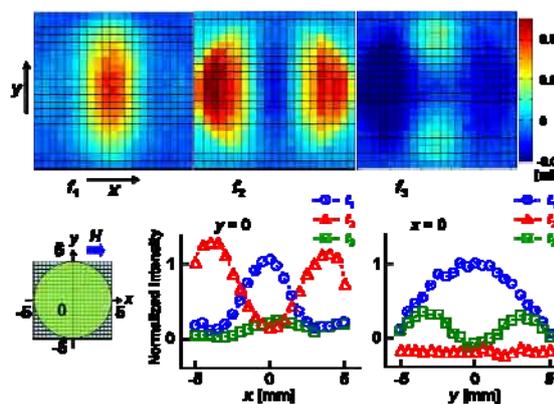


図4, RFプローブを用いたスピン波の空間マッピング像

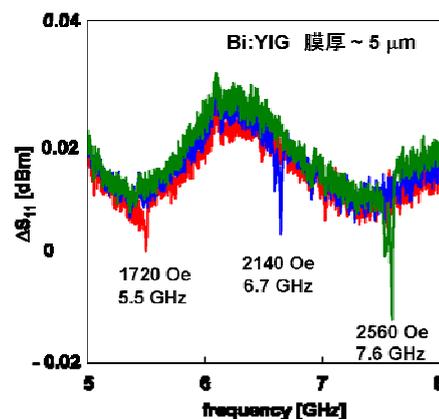


図5, RFプローブを用いてBi:YIG薄膜(膜厚 $5\mu\text{m}$ )より得られたFMRシグナル

重ねて表示。)

4-1.2. 高周波振動子-磁気共鳴プローブを用いた機械的手法による磁気共鳴検出

磁気共鳴信号を検出する機械的な手法として、高周波振動子磁気共鳴プローブの構築に取り組んだ。この手法では、100 MHz-1 GHz 程の帯域の共鳴周波数を有する機械振動子を用意し、振動子端に微小な磁性ワイヤを取り付け磁気プローブとして用いる(図 6)。磁気プローブを試料に近接させ励振することにより、探針直下の局所な試料位置に高周波磁場を生成して印加し、磁気共鳴の励起・検出を実現する。この際、共振周波数に相当する静磁場を掃印して印加する(例えば、1GHz の振動子では 29 [kA/m] (360 [Oe]))。

磁気共鳴信号の検出は、振動子のエネルギー散逸信号の変化により検出する。高周波振動子は、それ自身共振器を形成するため、共振器の Q 値に比例した磁気共鳴信号の高感度化が期待できる。

図 6 中には、共振周波数 155 MHz の厚みすべり振動モード水晶振動子(厚み 9 μm)に、直径 25 μm のニッケル磁性ワイヤを取り付けた高周波振動子磁気プローブ及びその振動シグナルを示す。

研究期間内に、機械的手法を用いた磁気共鳴信号検出には至らなかったが、厚みすべりモードの極薄水晶振動子用いて、100 MHz (厚み 15 μm) - 1 GHz (厚み 1.5 μm)の共振周波数を有する高周波振動子磁気プローブの作成法を確立した。

4-2. 広域走査-走査磁気共鳴顕微鏡の構築

磁気共鳴信号検出の高分解能化を進める上で、先ず、マイクロメートルスケールの試料からの磁気共鳴信号検出を目指した。そのために、RF プローブを用いた広域走査が可能な走査磁気共鳴顕微鏡の構築に取り組んだ(図 7)。

試料には、マイクロメートルサイズのパーマロイ円板を用いた(直径 2 μm, 東京大学物性研究所、大谷研究室提供)。走査プローブ顕微鏡(SPM)を用いて、マイクロメートルスケールサイズの試料表面を走査するためには、試料位置探索のための粗動機構、広域走査に対応した走査機構が必要であり、ピエゾモーター(粗動

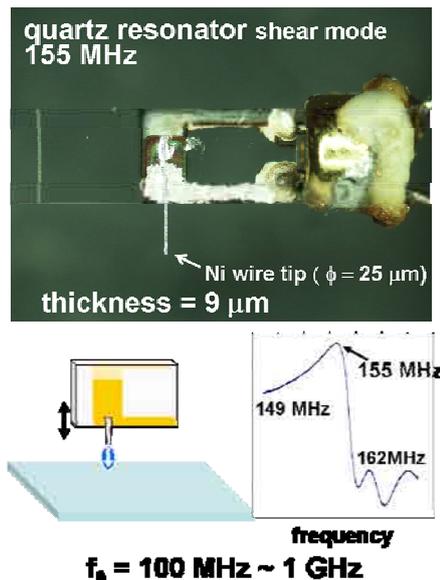


図 6. 高周波振動子磁気共鳴プローブを用いた磁気共鳴検出手法の取り組み、高周波振動子(155MHz)に取り付けられたニッケルワイヤ探針及び機械励振信号

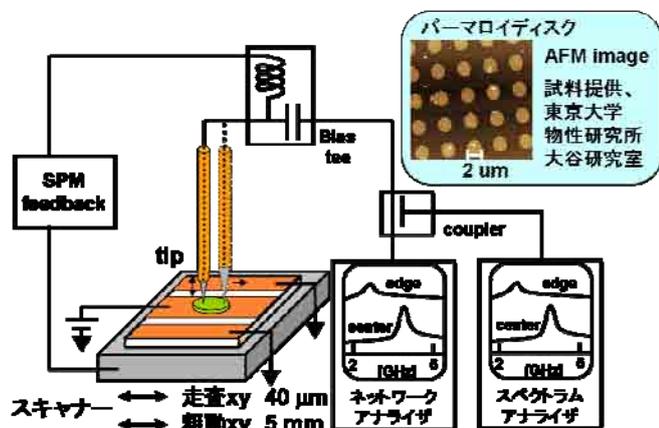


図 7. 走査磁気共鳴顕微鏡システム図及びパーマロイディスクの AFM 像

範囲 5 mm)、及び、広域走査が可能なピエゾスキャナー(走査範囲 40  $\mu\text{m}$ )を用いた。RFプローブの電気線路は Bias Tee により、DC 電流検出線路と高周波電流検出線路に分けられ、DC 電流側では、トンネル電流等を検出して探針-試料表面間の距離制御(SPM feedback)を、高周波電流側ではベクトルネットワークアナライザ、スペクトラムアナライザを用いて磁気共鳴信号を観測することができる。

直径 2  $\mu\text{m}$  のパーマロイ円板の試料からは、ミリメートルサイズの試料と比較して磁気共鳴に寄与するスピン数が桁違いに少なくなることから磁気共鳴信号強度が検出感度以下になり、本研究期間中には FMR 検出は達成できなかった。しかしながら、今後、高感度化を達成した際に高精細に試料表面を走査する機構を構築した。

## 5. 自己評価

本研究では、ナノスケールの分解能を有する磁気共鳴検出プローブの開発を目指した。研究期間内に、RF プローブが磁気共鳴検出の空間分解能を有することをサブミリメートルの分解能で実証したが、目標のナノメートルスケールの分解能を示すには至らなかった。一方で、高周波機械振動子の作成法の確立、広域走査可能なプローブ顕微鏡システムの構築を実現し、今後の、磁気共鳴検出の高感度化・高分解能化に向けた要素技術を確立することができた。

## 6. 研究総括の見解

電子スピン共鳴吸収法に原子分解能を有する原子間力顕微鏡の手法を応用し、探針直下の試料表面近傍の局所領域のみに高周波磁場を印加し、探針から直接スピン信号を検出することでスピン検出の空間分解能をナノスケールにまで飛躍的に高めることを狙った。局所領域でのスピン共鳴検出には電気的手法と機械的手法の 2 法の開発を並行して進めている。それぞれの主たる成果は次の2点である。

1.高周波プローブを用いた電気的手法の開発において、ガーネット円板の磁気共鳴の検出に成功すると共に、その2次元分布の計測にも成功し本法が試料内のスピン波モード解析に応用可能なことを実証した。

2.高周波振動子-磁気共鳴プローブを用いた機械的手法の開発において、100Mz~1GHz の磁気共鳴信号検出に対応可能な高周波振動子プローブの作成法を確立した。

電気的手法による方法では、試料の境界条件によるスピン波のモードは検出したがナノスケールのスピン共鳴検出には至っていない。また、機械的手法では共鳴信号の検出には至っていない。しかし、双方のプローブの高感度化研究や広域走査磁気共鳴顕微鏡の製作など目標実現に必須となる要素技術を着実に構築していることは高く評価できる。

これらの研究成果は 3 篇の原著論文にまとめられており、学会招待講演でも発表されている。

ナノスケール分解能を有するスピン共鳴原子間力顕微鏡は、磁性体や有機分子の構造分析や、スピンエレクトロニクス素子への適用などの科学技術に対する波及効果は極めて大きい。更に着実に研究を進めて本法の完成度を高め、インパクトのある測定例が提示されることを期待したい。

## 7. 研究成果リスト

## A. さきがけ個人研究者主導で得られた成果で主なもの

## (1) 論文(原著論文)発表

**論文(国際)**

- T. An, N. Ohnishi, T. Eguchi, Y. Hasegawa, P. Kabos, "Local excitation of ferromagnetic resonance and its spatially-resolved detection by using an open-ended radio frequency probe", *IEEE Mag. Lett.* **2010**, in press.
- T. An, T. Nishio, T. Eguchi, M. Ono, A. Nomura, K. Akiyama, Y. Hasegawa, "Atomically resolved imaging by low-temperature frequency-modulation atomic force microscopy using a quartz length-extension resonator", *Rev. of Sci. Inst.* **2008**, 79, 033703.

## (2) 学会発表

**口頭発表(国際)**

- T. An, T. Eguchi, Y. Hasegawa, "Scanning magnetic resonance microscopy: Spatially resolved imaging of ferromagnetic resonance on a yttrium iron garnet disk", 2009 American Physical Society March Meeting. (2009)

**口頭発表(国内)**

- 安東秀、江口豊明、長谷川幸雄、"高周波プローブによる強磁性共鳴の空間分布測定"、2009 年春季応用物理学関係連合講演会 (2009)
- 安東秀、江口豊明、長谷川幸雄、"走査プローブ顕微鏡による強磁性共鳴の空間分布測定"、第 69 回応用物理学学会学術講演会 (2008)

**ポスター発表(国際)**

- T. An, T. Eguchi, Y. Hasegawa, "Spatially resolved measurements of ferromagnetic resonance by scanning probe microscopy", 5th International Symposium on Surface Science and Nanotechnology (ISSS-5) (2008).

## (3) 招待講演

**招待講演(国内)**

- 安東秀、"高周波プローブを用いた空間分解磁気共鳴検出"、財団法人新世代研究所、プレ研究会「単一スピンを捉える SPM」(2008)

## B. 本研究課題に関連した成果で主なもの

## (1) 著書

- 安東秀、江口豊明、長谷川幸雄、"長辺振動水晶振動子を用いた周波数変調原子間力顕微鏡による原子分解能観察"、精密工学会誌, Vol.74, No.7, 687-690, 2008
- 安東秀、野村淳士、西尾隆宏、江口豊明、秋山琴音、長谷川幸雄、"長辺振動水晶振動子の周波数変調原子間力顕微鏡への応用=原子分解能 カセンサ="、超音波テクノ, Vol.21,

No.4, 60-64, 2009

(2)学会発表

口頭発表(国際)

- T. An, A. Nomura, T. Nishio, T. Eguchi, K. Akiyama, Y. Hasegawa, "Direct detection of force gradient using atomic force microscopy with very small oscillation amplitude", 2008 American Physical Society March Meeting (2008)