

令和 3 年度 防衛装備庁  
安全保障技術研究推進制度

# 研究成果報告書

## スピントロニクス素子を用いた 小型プロトン磁力計の創成

令和 4 年 5 月

スピンセンシングファクトリー株式会社

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、スピンセンシングファクトリー株式会社が実施した令和３年度「スピントロニクス素子を用いた小型プロトン磁力計の創成」の成果を取りまとめたものです。

## 0. 研究背景

電子の有する電荷とスピンの2つの性質を積極的に利用して、画期的な電子デバイスを創出しようとする、スピントロニクス分野に大きな期待が集まっている。すでに、磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM) や高密度磁気記録デバイス (HDD) 用の情報読み取りヘッドにスピントロニクス技術が用いられている。次世代の革新的なスピントロニクス応用として注目されているデバイスの一つが、超高感度磁気センサである。磁気センサ応用のためには、外部磁場に対する素子の出力変化(磁気抵抗効果)を大きくする必要がある。その代表的な現象が、本研究で利用するトンネル磁気抵抗 (TMR) 効果である。1994年に東北大学宮崎等のグループによって、室温で約20%のTMR比が観測されて以降、飛躍的にTMR比が向上し、現在では600%にも至っている(図. 1)。このような磁気抵抗効果の劇的な向上を背景として、スピントロニクス素子を磁気記録分野のみならず、集積回路や社会インフラの検査、高精度電流計測によるエネルギーマネジメント、がんやウイルスの検出、ヒトの脳や心臓などの生体磁場計測等、幅広く応用するための研究開発が精力的に進められている。スピンセンシングファクトリー株式会社(SSF)は、超高感度TMR磁気センサを、生体・医療分野、社会インフラ分野、ICT・IoT分野、自動車・ロボット分野など、様々な領域で応用することを目指して設立された、ベンチャー企業である(<https://www.spintronics.co.jp/about>)。

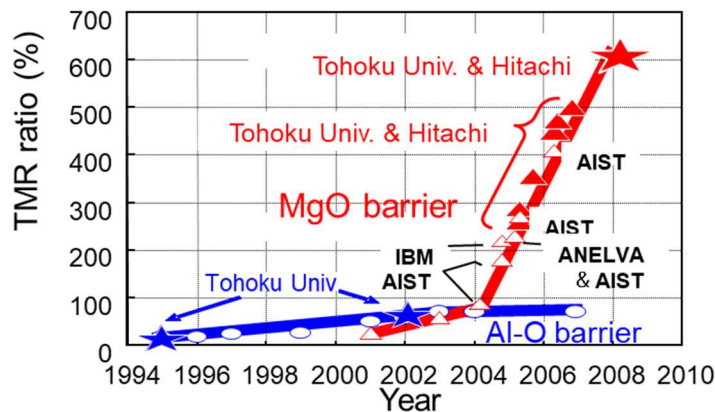
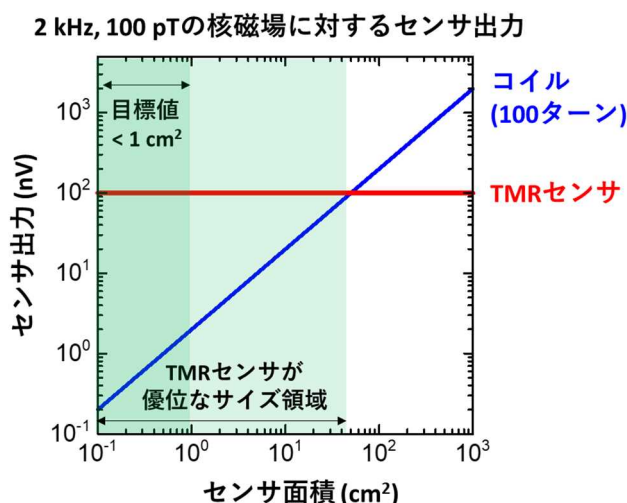


図. 1 トンネル磁気抵抗比 (TMR ratio) の年次推移  
(近年、飛躍的なトンネル磁気抵抗比の向上が進んでいる)

SSFは、上述のTMR素子を、核磁気共鳴(NMR)型磁気センサの一つである、プロトン磁力計に応用することを考案した。プロトン磁力計は、NMRの共鳴周波数が外部磁場に比例することを利用した磁気センサである。従来のプロトン磁力計のセンサ部は、プロトン(水素イオン)を多く含有した液体(水や灯油など)を入れた非磁性の容器と、その外部に巻かれた励磁用のコイル、検出用のコイルから構成される。励磁用コイルに電流を流して強い磁場を生成すると、プロトンのスピンの方向が同じ向きに整列する。続いて、励磁用の電流を遮断して印加する磁場を消失させると、プロトンのスピンの方向は時間をかけてランダムになる(緩和される)。この緩和過程において、検出コイルに微弱な高周波電圧が誘起される。この信号周波数がNMR周波数であり、外部磁場の強度に比例する。外部磁場が地磁気の場合、共鳴周波数は約2 kHzである。プロトン磁力計は量子磁力計のため、原理的に、方向や温度等の影響を受けず、装置の個体差による違いを考慮する必要が無く、高い計測精度が得られる。計測精度がppmオーダーであることから、潜水艦の位置特定、海底・地下の探査、機雷・地雷の探知、地球・宇宙物理学など、広く応用されてきた。一方で、検出可能な磁場はナノテスラオーダーであり、感度を高めるためには、原理的にセンサのサイズを大きくする必要がある。本研究では、プロトン磁力計の検出部にTMRセンサを応用することで、高感度を維持しつつ、デバイスサイズを劇的に小さくできると考えた。1cm<sup>3</sup>程度の水中のプロトンを、10mT程度のパルス磁場で励磁した場合、地磁気程度の外部磁場下で生じるNMR磁場は約2kHz、100pTに相当する。図. 2に、その

NMR磁場に対する検出コイル、および、TMRセンサの出力電圧の見積もりを示す。従来の検出コイルでは、出力が素子面積に比例するのにに対し、TMRセンサの出力は、素子面積に依存しない。古典的な電磁誘導の法則に対し、TMRが量子力学的な効果によるためである。従って、TMRセンサを信号検出部に利用することで、非常に微小なプロトン磁力計が実現できる可能性がある。本研究の目的は、TMRセンサを用いたプロトン磁力計が実現可能であること、センサ感度および測定精度が素子サイズによらず、小型化可能であることを実証することである。



図． 2 検出コイルとTMR素子における、プロトンNMR磁場による出力電圧見積もりの比較  
(当社のTMRセンサの感度レベルでは、40cm<sup>2</sup>以下の素子サイズ領域で検出コイルよりも有利である)

## 1. 委託業務の目的

### (1) 研究課題の最終目標

研究期間内（2年間）での具体的な目標として、素子面積が0.1～1cm<sup>2</sup>のTMRセンサを用いてプロトン核磁気共鳴（NMR）信号を測定し、信号出力が素子サイズに依存しないことを確認する。また、外部磁場の検出感度および測定精度を明確化する。磁力計モジュールの目標性能として、1～10 kHzの周波数帯域で、100 pT/√Hz以下の磁場分解能の達成を目指す。これにより、TMR素子が小型プロトン磁力計に応用可能となり、将来的には、様々な分野に応用展開が可能なポテンシャルを示すことができる。

### (2) 最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題

最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題は以下の通りである。

#### ①NMR用低ノイズTMR磁気センサの開発

超高感度な生体磁場用のTMRセンサ素子に関して高い実績を有している。しかし、生体磁場は100 Hz以下の低周波の信号であり、生体磁場用に最適化された素子を、そのまま核磁気共鳴用のセンサに適用することは難しい。本研究では、地磁気程度の外部磁場下におけるNMR周波数にターゲットを絞っていることから、数 kHz帯で低ノイズを実現するセンサが必要である。そのため、TMR多層膜の膜構造及びセンサに磁束を効率的に収束させるための集磁構造・材料の最適化を進める必要がある。

#### ②TMR型プロトン磁力計モジュールの製作

生体磁場信号検出用の低周波領域における、低ノイズ電圧検出回路はすでに当社で開発済みである。本提案研究では、数kHz帯で動作する周波数検出タイプの回路を新規に設計し、製作する必要がある。また、①で開発したTMR磁気センサと組み合わせたTMR型プロトン磁力計モジュールを制作する必要がある。

### ③NMR信号の測定・磁力計性能の評価

②で製作したTMR型プロトン磁力計モジュールを用いて、プロトンのNMR信号を測定し、目論見通り、信号出力が素子サイズに依存しないことを確認する必要がある。また、磁力計モジュールとしての性能・ポテンシャルを見極めるために、外部磁場の検出限界、出力のリニアリティ測定等を行う必要がある。

#### (3) 要素課題に対する実施項目及び体制

これらの要素課題に取り組む為に、各実施項目の具体的な内容を以下のように設定した。体制については、SSF社内にて基本的に毎週月曜の週次会議で全体的な状況を把握し、各要素課題について担当者を明確にして取り組んだ。

##### ① NMR用低ノイズTMR磁気センサの開発

###### ① -a 低ノイズTMR多層膜構造の開発

TMRセンサの主要なノイズは、低周波領域において周波数に逆比例する $1/f$ ノイズ、高周波領域における周波数に依存しないホワイトノイズである。地磁気下のプロトン核磁気共鳴周波数である数kHz帯域では、ホワイトノイズがより支配的である。ホワイトノイズの起源は、素子の電気抵抗に比例する熱ノイズ、および、トンネル電流の揺らぎに起因するショットノイズ、スピンの熱揺らぎに起因する磁気ノイズ、と考えられている。特に室温下では、熱ノイズ、磁気ノイズが支配的であるため、これらのノイズ低減により、NMR用の高感度磁気センサが実現可能と考えられる。本研究開発では、熱ノイズ低減のための素子の低抵抗化（面積抵抗  $RA < 10^5 \Omega \mu m^2$ ）、磁気ノイズ低減のための磁性材料の磁気摩擦の低減（磁気摩擦係数  $< 0.01$ ）を行うことで、高周波領域で低ノイズ（ $< 100 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ ）を示すTMR磁気センサを実現する。ここで面積抵抗RAは、薄膜に対して面直方向に電流が流れる場合に面積で規格化した電気抵抗で、面積によらず膜面直方向の電気抵抗を比較する場合の指標である。又、磁気摩擦係数 $\alpha$ は、磁性体中でスピンの歳差運動する場合の摩擦係数であり、磁気緩和係数とも言われる。デバイスのノイズのうち、磁気的なノイズの大きさの指標となる。

###### ① -b 低ノイズ集磁構造・材料の最適化

TMRセンサの高感度化のために、センサ素子に外部磁束を収束して印加する構造（集磁構造）が用いられている。低ノイズ化のためには、素子のみならず、集磁構造についても低ノイズ化を図る必要がある。そのため、高周波領域で磁気ノイズが小さい材料を選定し、構造内部に存在する磁区が安定化する構造に最適化する必要がある。本研究では、研究期間内にNMR用の集磁材料を探索し、また、得られた材料を種々の形状に加工してノイズ評価することで、低ノイズ集磁構造を実現する。最終的に、集磁による信号増幅率が10倍以上の性能を示す集磁構造を素子に装着した状態で、 $100 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下のノイズを実現する。

##### ② TMR型プロトン磁力計モジュールの製作

従来のNMR用の周波数検出回路、これまでに当社で開発したTMR磁気センサ用電圧増幅回路の知見をもとに、新たにTMR型プロトン磁力計に適した回路の設計および製作を行う。製作した回路と（1）で開発した素子を組み合わせたTMRプロトン磁力計モジュールを製作する。磁力計モジュールの性能として、 $1 \sim 10 \text{ kHz}$ の周波数帯域で、 $100 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下の磁場分解能の達成を目指す。また、NMR信号を励起するための回路も合わせて制作する。 $1 \text{ cm}^3$ 程度の水に約10 mT以上のパルス磁場を印加可能で（約100 pTのNMR信号強度に対応）、かつパルス磁場が1~2 ms（プロトンの緩和時間よりも十分に短い時間）で消磁可能なコイルおよび、スイッチング回路の設計、製作を行う。

### ③NMR信号の測定・磁力計性能の評価

②で製作した磁力計モジュールを用いて、 $1 \text{ cm}^3$ 程度の水から発生するプロトンのNMR信号を測定する。 $0.1 \sim 1 \text{ cm}^2$ の面積で作製したセンサ素子に対して評価を行い、信号出力が素子サイズに依存しないことを確認する。同時に、従来のピックアップコイルによる検出方法との比較を行い、TMRセンサの優位性を確認する。また、外部磁場の検出限界を見極めつつ、出力のリニアリ

ティ測定等を行うことで、磁力計としての性能評価を行う。これらの評価により、TMR型プロトン磁力計の有用性と、将来的に実現可能なポテンシャルを明確化できると考えられる。

#### ④プロジェクトの総合的推進

研究代表者は、定期的に全体の進捗を管理し、計画に影響を及ぼさないように必要に応じてリソースや進め方の修正を指示しながらプロジェクトを進捗させる。個々の実施項目毎に発生する課題に対しても、担当者と密接に連携し、大局的な見地から適宜技術的なアドバイスを与え、課題解決に向けて指導を行う。以上により、最終目標を計画通りに達成する。

## 2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

### (1) 面積の異なる小型TMRセンサによるNMR信号の測定

#### (研究開始時の設定目標)

素子面積が $0.1\sim 1\text{cm}^2$ のTMRセンサを用いてNMR信号を測定し、信号出力が素子サイズに依存しないことを確認する。

#### (研究開発の達成度)

TMR型プロトン磁力計モジュールと従来のプロトン磁力計に用いられているピックアップコイルからの出力を同時計測した結果、TMR型プロトン磁力計モジュールに用いたTMRセンサの面積は $0.60\text{cm}^2$ で $2.25\text{nV}$ の信号出力を得た。これに対してピックアップコイルの面積をMRセンサと同等の面積にした場合に予測される出力は $0.12\text{nV}$ と検出が難しいレベルである。以上から、素子面積が $1\text{cm}^2$ 以下と非常に小さい面積領域において、原理的に出力の面積依存性が少ないTMR素子を用いる事で、従来のプロトン磁力計では難しい小型プロトン磁力計を実現できる可能性を、磁場強度に対するリニアリティや $1\text{ppm}$ 以下の繰り返し精度について、実測値を以て示すことができた。当初 $1\text{cm}^2$ に近い面積のTMRセンサでの達成を目論んでいたが、FCの形状による効果により $1\text{cm}^2$ の約半分の $0.60\text{cm}^2$ の面積のTMRセンサで測定できたことから、達成度は $140\%$ と判断する。

### (2) 小型TMRセンサによるプロトン磁力計による磁場の検出感度と精度

#### (研究開始時の設定目標)

外部磁場の検出感度および測定精度を明確化する。

#### (研究開発の達成度)

面積 $0.60\text{cm}^2$ のTMR素子を用い、 $1\text{cm}^3$ の水量のNMR信号を測定できる事を確認した。測定精度は磁力計モジュールの性能として、約 $2100\text{Hz}$ に対して $200\mu\text{Hz}$ 以下の精度を確認した。これは磁力計として十分な精度である $1\text{ppm}$ を上回っていると考ええる。達成度は $120\%$ と判断する。

### (3) 小型TMRセンサをプロトン磁力計に用いた場合の高磁場分解能の実現

#### (研究開始時の設定目標)

$1\sim 10\text{kHz}$ の周波数帯域で、 $100\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下の磁場分解能の達成を目指す。

#### (研究開発の達成度)

$1\text{cm}^2$ 以下の面積のTMR素子に集磁を行う為の集磁板(以下、フラックスコンセントレータ=FC)を付加した、面積が $0.096$ 、 $0.60$ 、 $0.68\text{cm}^2$ のそれぞれのTMRセンサで $100\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下の磁場分解能を実現した。特に $0.60\text{cm}^2$ のTMRセンサは低域を含めて $10\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下を実現しており、達成度は $120\%$ と判断する。

## 3. 委託業務における研究の方法及び成果

以下、業務計画書の「3.3 要素課題に対する実施項目及び体制」に記載の実施項目毎に説明する。

### (1) NMR用低ノイズTMR磁気センサの開発

#### (1a) 低ノイズTMR多層膜構造の開発

TMRセンサの主要なノイズは、低周波領域において周波数に逆比例する $1/f$ ノイズ、高周波領

域における周波数に依存しないホワイトノイズである。地磁気下のプロトンNMRの周波数である数kHz帯域では、ホワイトノイズがより支配的である。ホワイトノイズの起源は、素子の電気抵抗に比例する熱ノイズ、および、トンネル電流の揺らぎに起因するショットノイズ、スピンの熱揺らぎに起因する磁気ノイズ、と考えられている。特に室温下では、熱ノイズ、磁気ノイズが支配的であるため、これらのノイズ低減により、NMR用の高感度磁気センサが実現可能と考えられる。本研究開発では、熱ノイズ低減のための素子の低抵抗化、磁気ノイズ低減のための磁性材料の磁気摩擦 $\alpha$ の低減を行う。熱ノイズ低減のための低抵抗化には面積抵抗(RA)の低減が有効である。その為にMgOトンネル絶縁層を形成するための酸化条件の最適化による低面積抵抗(RA)化を検討した。尚、RAは素子抵抗 $\times$ 素子面積で定義され、障壁層の膜厚、障壁高さで決まる、トンネル電流に対する単位面積当たりの抵抗値である。図. 3にTMR多層膜の構造を示す。低RA化のための具体的な方法は、MgOトンネル絶縁層形成工程において、Mgを酸化する際の圧力を微調整し、時間を短くし、繰り返し回数を多くする方向で最適化を行った。最適化後のTMR比とRAの関係を図. 4に示す。最適化後は、低RA領域においても従来の条件と比較しTMR比を改善できた。具体的にはMgO障壁層の製作条件を最適化することで $10^5 \Omega \mu\text{m}^2$ 以下の低RA領域での高いTMR比（最大250%）を実現した。

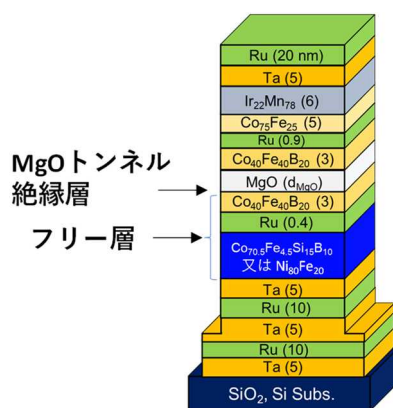


図. 3 TMR 多層膜の構造。

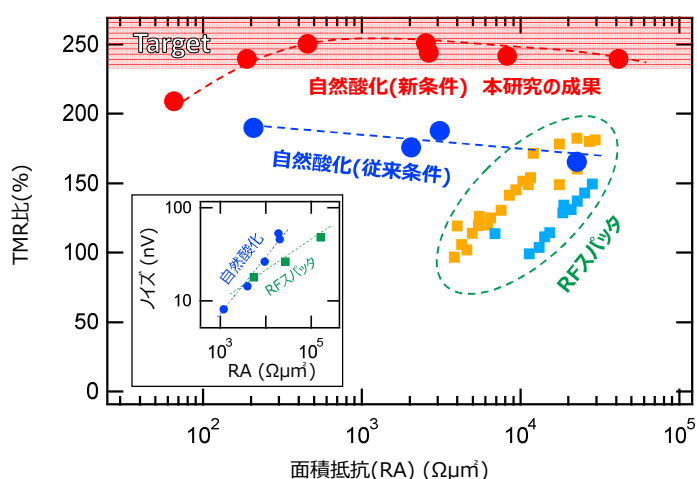
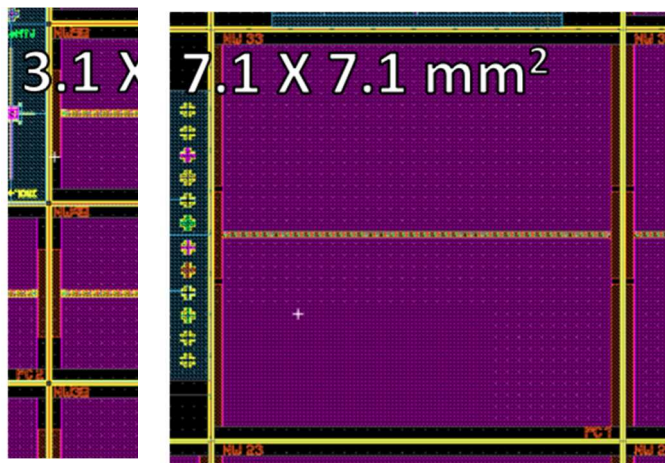


図. 4 面積抵抗 RA に対する TMR 比の依存性。MgO 障壁層の製作条件を最適化により  $10^5 \Omega \mu\text{m}^2$  以下の低 RA 領域で TMR 比が 200%未満から最大 250%(全域で 200%以上)に改善。

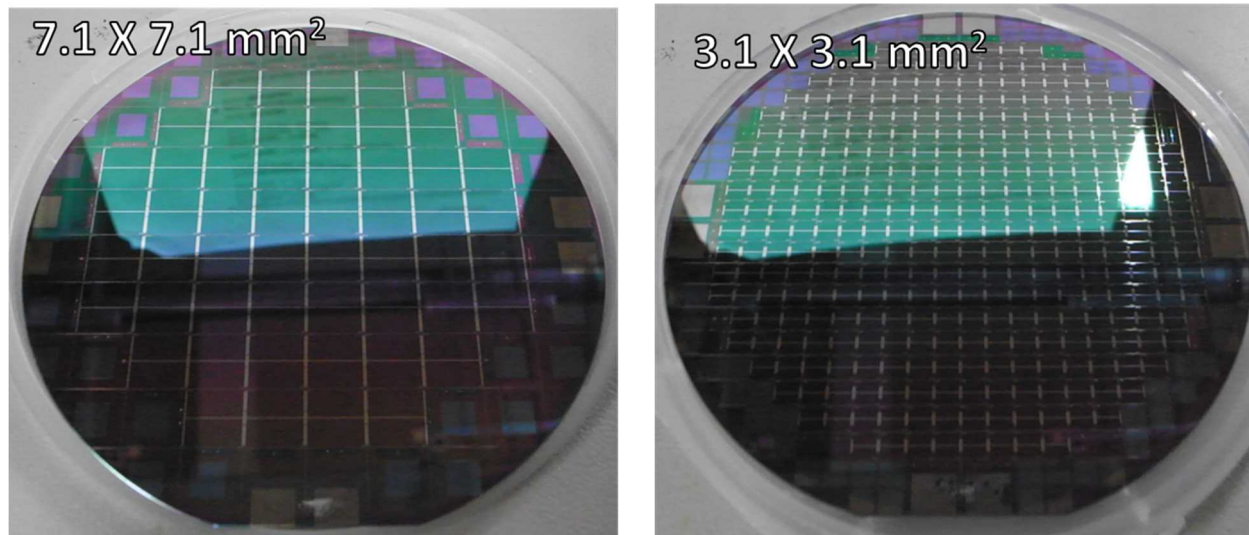
前述の高感度、低ノイズが期待できる低RAなTMR多層膜を用い、NMR測定に用いるための素子の製作を行った。図. 5に設計を行ったフォトマスクパターンの概略図を示す。1 cm<sup>2</sup>以下の目標値に合致する0.71x0.71=0.50 cm<sup>2</sup> (7.1x7.1 mm<sup>2</sup>) の素子と、0.1 cm<sup>2</sup>以下の目標値に合わせた0.31x0.31=0.096cm<sup>2</sup> (3.1x3.1 mm<sup>2</sup>) の2種類のフォトマスクを設計・製作した。製作したフ



フォトマスクを用い、微細加工を行った。製作した3インチφウェハの外観写真を図．6に示す。微細加工ではフォトリソグラフィ、Arイオンミリング等を用いてTMRアレイ素子を形成しているが、膜剥がれ等のトラブルなくTMRアレイを形成することに成功した。また、光学顕微鏡による外観確認を行った結果設計通りの形状でTMR多層膜を加工できていることが確認できた。製作したTMRアレイ素子の抵抗値マップ、トンネル磁気抵抗（TMR）比の測定結果を図．7に示す。0.096cm<sup>2</sup>センサに関してウェハの左右方向に抵抗値の若干の分布が見られているものの、ほぼ設計値通りの比較的均一な抵抗値が得られた。また、抵抗変化率であるTMR比に関しても100%以上の比較的高い値を得ることに成功した。



図．5 設計を行ったフォトマスクパターンの概略図。チップ中央の黄色の一行が TMR アレイを形成している部分であり、紫色の部分には後述するフラックスコンセントレータが配置される。



図．6 製作した素子ウェハの外観写真。



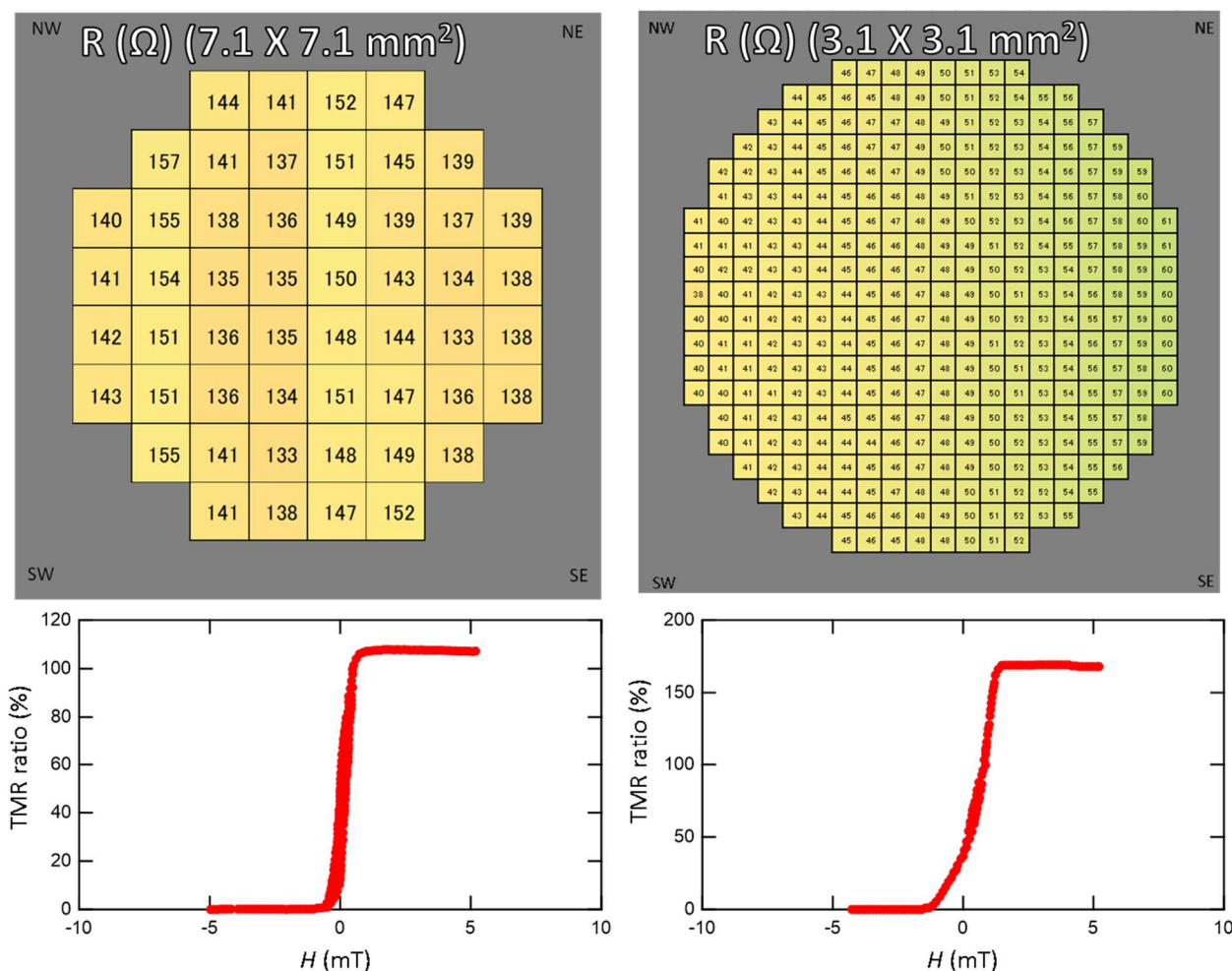


図. 7 製作した素子基板の抵抗値の分布と典型的な磁気抵抗曲線。  
抵抗値の若干の分布が 3.1x3.1 mm<sup>2</sup> センサで見られるものの、比較的  
均一な抵抗分布が得られ、100%を超える高い TMR 比が観測された。

図. 3 におけるフリー層中のソフト材料として NiFe 70 nm と CoFeSiB 70 nm を用いた素子を製作し、ノイズスペクトルを測定することで  $\alpha$  とノイズ密度の対応の確認を行った。図. 8 に製作した素子のノイズスペクトルを示す。NiFe を用いた素子は CoFeSiB の素子と比較して全周波数でノイズが小さいことが確認され、 $\alpha$  の測定結果と対応していることがわかる。表. 1 に NiFe と CoFeSiB を用いた素子の信号出力、ノイズ密度、磁場分解能を示す。NiFe を用いた素子はスペクトルからも分かるようにノイズ密度が小さいが、一方で信号出力も小さい。これは NiFe と CoFeSiB のソフト性及び TMR アレイの抵抗変化率の差によるものと考えられる。結果として、信号電圧がノイズ電圧と一致する最小の磁場の大きさとして定義される磁場分解能は、CoFeSiB を用いた素子の方が高くなっている。図 8 (b) に強磁性共鳴法で測定した NiFe および CoFeSiB の共鳴磁場および共鳴線幅の角度依存性を示す。プロット点が実験結果であり、実線が LLG 方程式によるフィッティング結果である。いずれの試料についても、実験結果は非常によくフィッティングできていることが分かる。解析により得られた NiFe および CoFeSiB の  $\alpha$  の値は 0.006 および 0.009 であり、いずれの試料も目標とした 0.01 を下回り、NMR の測定周波数領域でのノイズは十分小さく考えられる。CoFeSiB の  $\alpha$  の値は 0.009 であり、NMR の測定周波数領域でノイズは十分小さいと考えられることから、これ以降は信号出力が大きく磁場分解能の小さい CoFeSiB を用いたセンサを中心に性能向上を目指した。尚、LLG 方程式は Landau Lifshitz Gilbert 方程式で、磁場中での磁化ベクトルの歳差運動を記述する微分方程式である。

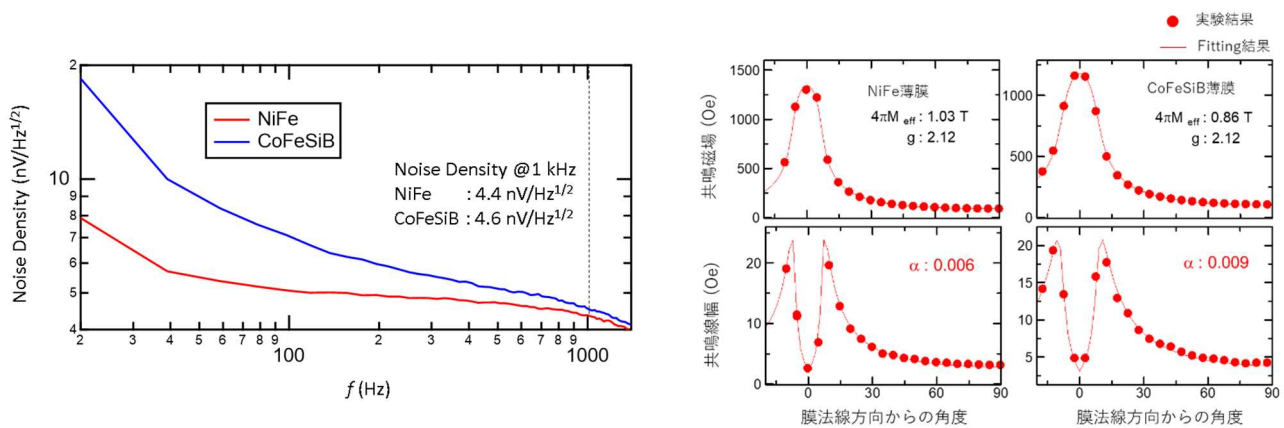


図. 8 (a)ソフト層に NiFe と CoFeSiB を用いた素子のノイズスペクトル。 (b)磁気摩擦係数 $\alpha$ の測定結果。

表. 1 NiFe、CoFeSiB を用いた素子の信号出力、ノイズ密度、磁場分解能。

ソフト層材料	信号 ( $\mu\text{V}/\mu\text{T}$ )	ノイズ密度 ( $\text{nV}/\text{Hz}^{1/2}$ )@1 Hz	磁場分解能 ( $\text{pT}/\text{Hz}^{1/2}$ )@1 Hz
NiFe	140	18.1	129
CoFeSiB	776	56.6	73

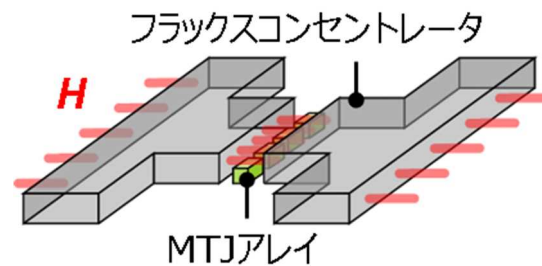
### (1b) 低ノイズ集磁構造・材料の最適化

集磁を行う為の集磁板(以下、フラックスコンセンレータ=FC)の材料選定と形状の最適化を行った。センサ素子の性能を向上させる手段の一つとして、FCがある。FCは軟磁性体からなる板状の構造物であり(図. 9)、空間に存在する磁束を収束する効果がある。FCをTMRアレイの近傍に配置した場合、TMRアレイには収束された磁束が印加されることとなるため、センサ素子の実効的な信号出力が増加し、結果としてS/Nが改善される。本研究では過去の生体磁場計測において実績のあるNiFeをFCの材料として選択し、 $1\text{ cm}^2$ 以下、及び $0.1\text{ cm}^2$ 以下という条件の元、FCの製作と評価を行った。

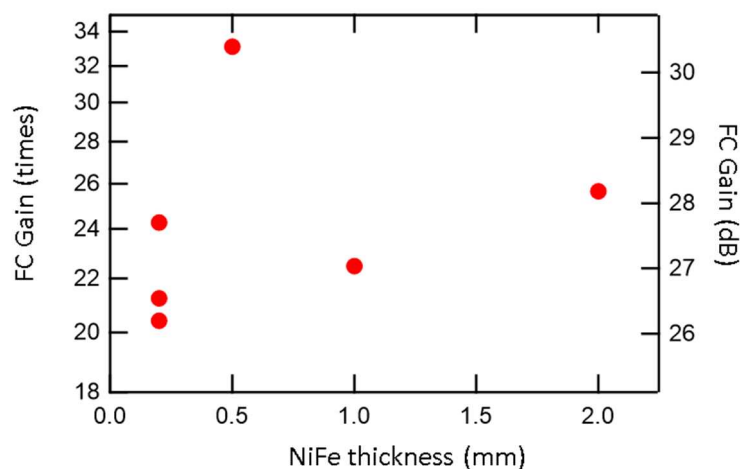
FCを製作するにあたり、NiFe板の膜厚に対する収束率(ゲイン)の評価を行った。 $0.71 \times 0.71 = 0.50\text{ cm}^2$  ( $7.1 \times 7.1\text{ mm}^2$ )の素子に対して、 $0.2 \sim 2.0\text{ mm}$ の種々の板厚のFCを製作しTMRアレイ近傍に配置して、均一な外部磁場に対するシグナルのゲインを測定した。図. 10にゲインのNiFe板厚依存性を示す。NiFeの板厚が $0.5\text{ mm}$ の際にシグナルゲインがピークを取っていることがわかる。FCの特性上、板厚が厚いほどより多くの外部の磁束を収束するはずである。しかし、TMRアレイにおいて磁束を検知する部分は一定の膜厚のソフト磁性層(この実験の場合 $70\text{ nm}$ のCoFeSiB層)であるため、TMRアレイ近傍ではNiFe厚は薄いほど効率的に磁束がソフト層に入っていくこととなり、ゲインが大きくなると考えられる。この外部の磁束を収束する際の板厚の効果と、TMRアレイへの磁束の印加の関係の兼ね合いから、今回の実験では $0.5\text{ mm}$ の板厚で最もゲインが大きくなったと考えられる。又、板厚を一定ではなく、例えばTMRアレイ遠方では板厚を厚く、近傍に近づくにつれて薄くする等、3次元的な構造をFCに持たせることで、より高いゲインを実現できる可能性がある。

$0.5\text{ mm}$ の板厚を用い、 $1\text{ cm}^2$ 用及び $0.1\text{ cm}^2$ 用のFCの製作を行った。製作したFCの模式図を図. 11に示す。又、それぞれのFCをTMR素子に実装した写真を図. 12に示す。今回、 $1\text{ cm}^2$ 用のFCを2種、 $0.1\text{ cm}^2$ 用のFCを1種製作し、ゲインの向上効果を測定した。なお、 $1\text{ cm}^2$ 用の(2)のFCは、素子は $0.1\text{ cm}^2$ 用の $0.31 \times 0.31 = 0.096\text{ cm}^2$  ( $3.1 \times 3.1\text{ mm}^2$ )を用い、FCを付加

することで最終的なセンササイズが約  $0.60 \text{ cm}^2$  となる設計とした。表． 2 にそれぞれの FC を付加する前後の信号出力と、FC を付加したことによる信号のゲインを示す。製作したすべての FC において 5 倍 (14dB) 以上のゲインが得られていることがわかる。今回、 $0.096 \text{ cm}^2$  素子を用いてセンササイズが  $1 \text{ cm}^2$  以下の約  $0.60 \text{ cm}^2$  となる (2) の FC との組み合わせにおいて、目標である 10 倍に対して、それ以上の約 14 倍の高いゲインが得られた。これは (1)、(3) の FC が長方形をしているのに対し、(2) の FC は凸型をしており、TMR アレイ近傍で磁束が絞られるという NiFe 板面内での磁束の収束効果が得られているためと考えられる。又、TMR 素子と FC を組み立てる際に FC の位置のずれによって TMR センサの性能は大きく劣化する事から、この工程の装置化は必須である。今回、フラックスコンセンレータ実装装置を導入する事で、作業時間は 15 分/組から 4 分/組と約  $1/4$  と短縮され、手作業で  $\pm 500 \mu\text{m}$  であった組立精度が  $\pm 50 \mu\text{m}$  まで向上し、研究実施にあたり、効率化に大きく貢献した (図． 1 3)。

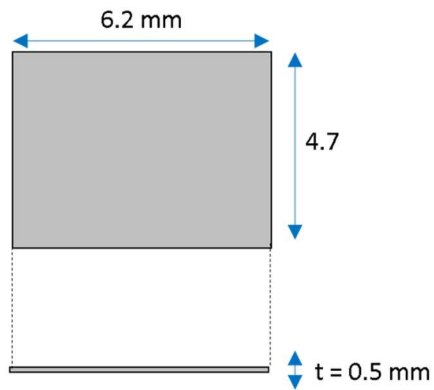


図． 9 フラックスコンセンレータ (FC) の概略図。

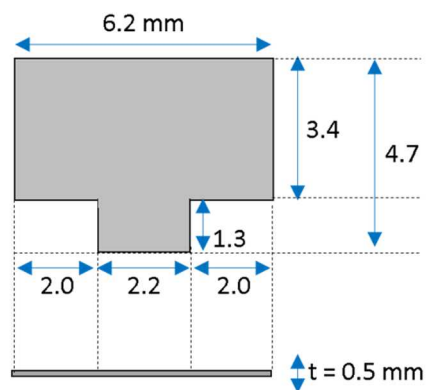


図． 1 0 FC に用いた NiFe 板厚に対する、シグナルの収束率 (ゲイン)。

(1) 1 cm<sup>2</sup>用FC



(2) 1 cm<sup>2</sup>用FC(センサ0.1 cm<sup>2</sup>)



(3) 0.1 cm<sup>2</sup>用FC

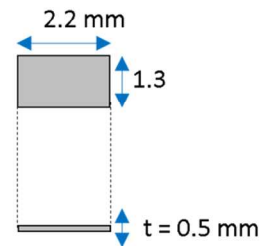
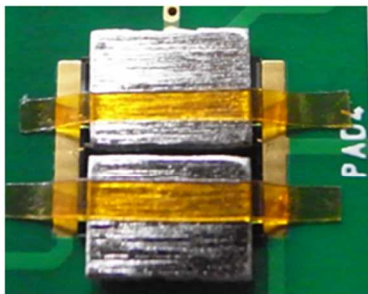
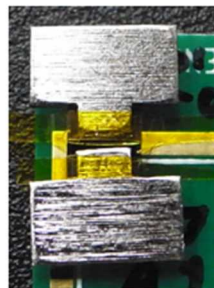


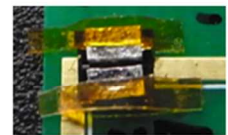
図. 1 1 製作したフラックスコンセンレータ (FC) の模式図。



0.71 × 0.71 cm<sup>2</sup>素子 + FC(1)



0.31 × 0.31 cm<sup>2</sup>素子 + FC(2)



0.31 × 0.31 cm<sup>2</sup>素子 + FC(3)

図. 1 2 製作した FC を TMR 素子に実装した写真。

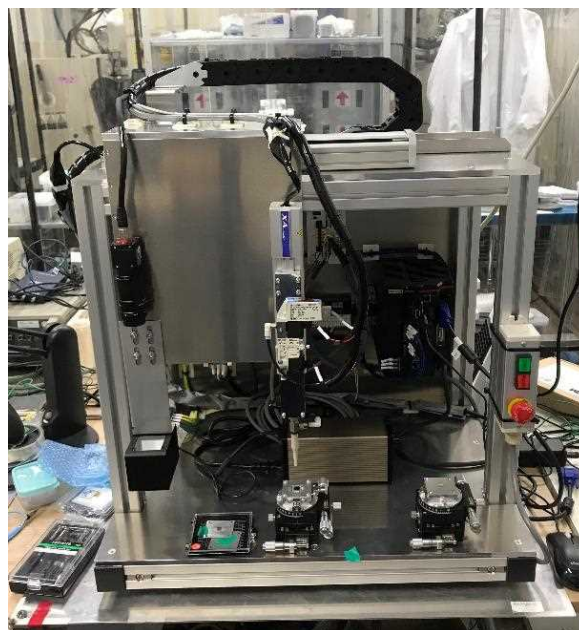


図. 1 3 フラックスコンセンレータ実装装置



表. 2 各種の FC を付加した場合の信号の値と収束率（ゲイン）。

FC	センサ素子	信号(FC無し) ( $\mu\text{V}/\mu\text{T}$ )	信号(FC有り) ( $\mu\text{V}/\mu\text{T}$ )	ゲイン(倍)
(1) 1 cm <sup>2</sup> 用FC	0.71x0.71 cm <sup>2</sup>	992	5680	5.7
(2) 1 cm <sup>2</sup> 用FC (センサ0.1 cm <sup>2</sup> )	0.31x0.31 cm <sup>2</sup>	696	9920	14.3
(3) 0.1 cm <sup>2</sup> 用FC	0.31x0.31 cm <sup>2</sup>	696	3200	5.0

## (2) TMR 型プロトン磁力計モジュールの製作

ppm レベルで周波数変動を測定する周波数カウンタの導入を行い、開発したセンサに組み合わせる周辺回路と NMR 信号を励起するための回路を製作した。又、磁場印加・検出兼用コイルによる従来の小型磁力計モジュールの測定にも対応できるように、必要となるコイルや周辺回路（切換機、増幅回路(オペアンプ、LPF を含む)）の製作を行った。

ppm レベルでの地磁気の変動を検知するためには、NMR の自由誘導減衰 (FID) 信号の周波数変動を ppm レベルで測定する必要がある。周波数計測のため「Keysight 製ユニバーサル周波数カウンタ 53230A」を用いた(図. 1 4 (a))。53230A が、ppm オーダーの周波数分解能を得るための条件を明らかにするため、理想的な信号が入力された場合の周波数分解能の測定を行った。53230A とシグナルジェネレータを直結し、サイン波信号を入力し周波数を読み取った。サイン波の周波数は地磁気の FID 信号に近い 2 kHz とし、振幅は 100mV<sub>p-p</sub> とした。測定条件としてゲート時間（測定時間）を変化させ 100 回の計測を行い、測定された周波数の値の peak-to-peak 値を周波数ノイズとして定義した。図. 1 4 (b) に周波数ノイズのゲート時間（周波数測定の際の 1 回の測定時間）依存性を示す。ゲート時間を長くすることで、周波数ノイズが急峻に低減することがわかる。信号として 2 kHz のサイン波を用いているため、1 ppm は  $2 \times 10^{-3}$  Hz に対応するが、おおよそ 600 ms 以上の計測時間を取ることで周波数ノイズがこれを下回っていることがわかる。実際の FID 信号の長さは 100 ms 程度と考えられるため積算が必要であるが、入力信号の S/N が高ければ数回～数十回の積算で ppm オーダーの計測が可能であることが示された。

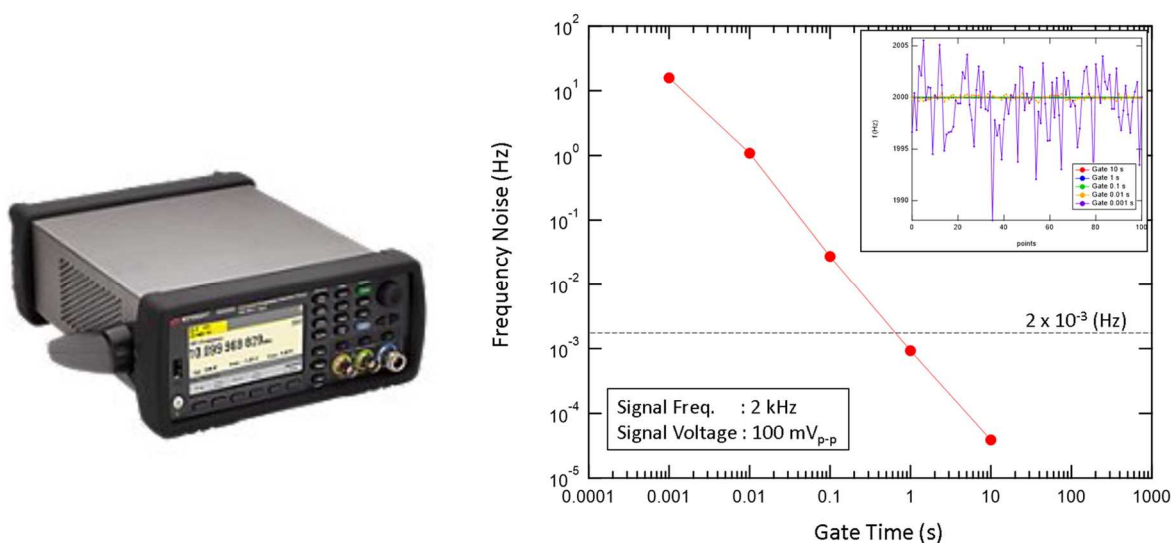


図. 1 4 (a)ユニバーサル周波数カウンタ

(b)周波数ノイズのゲート時間（測定時間）依存性。

TMR 型プロトン磁力計モジュールに必要なセンサからの信号を増幅、フィルター処理等を行う回路を製作した。図. 1 5 に TMR 型プロトン磁力計モジュールに用いた回路のブロック図を示す。TMR センサと 60dB のプリアンプは近接して配置され、プリアンプ以後の信号は差動信号となる。その後計装アンプとローパスフィルタ (LPF) を経て 40dB のメインアンプから出力される。図. 1 6 に製作した TMR 型プロトン磁力計モジュールを示す。

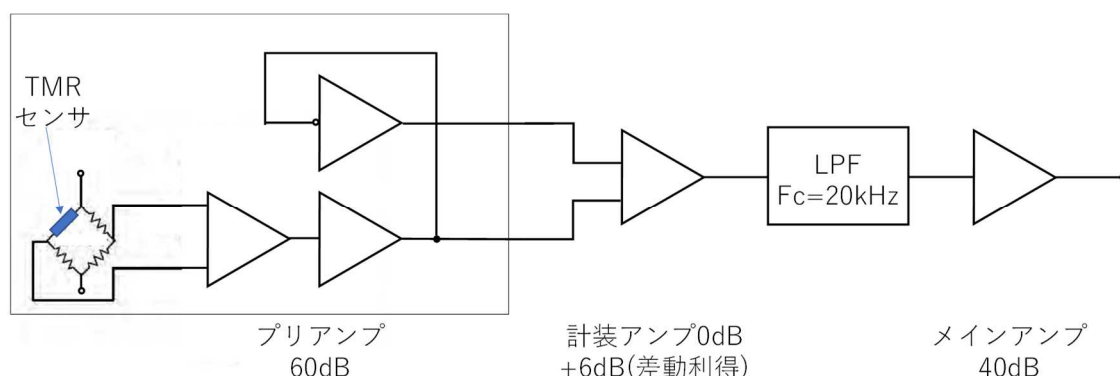


図. 1 5 TMR 型プロトン磁力計モジュールの回路ブロック図。

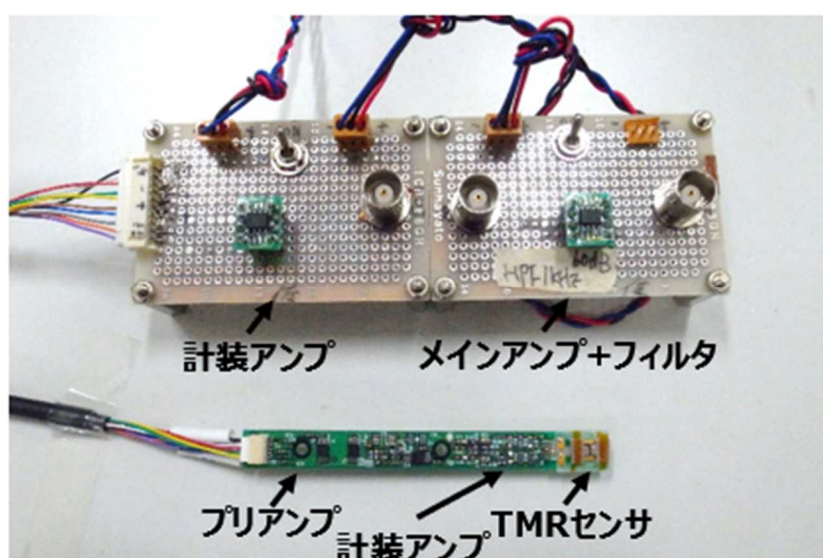
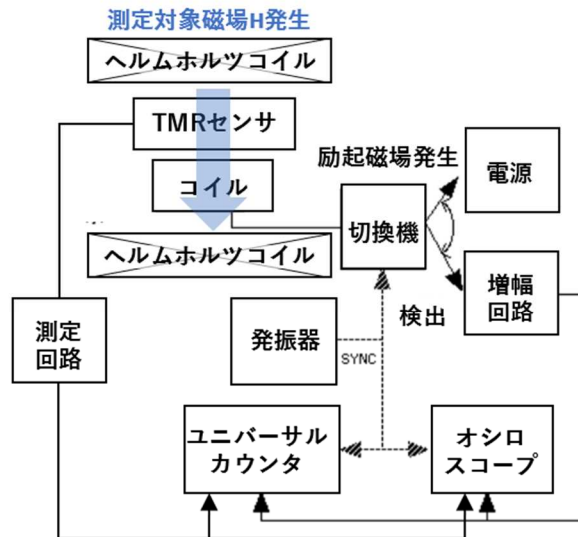


図. 1 6 製作した TMR 型プロトン磁力計モジュール。

本研究では、磁場印加・検出兼用コイルによる従来の小型磁力計モジュールの測定にも、TMR 型プロトン磁力計の測定にも対応できるように、図. 1 7 内に示すコイル、切換機、増幅回路(オペアンプ、LPF を含む)の製作を行った。従来型に用いる場合には、磁場印加にも検出にも使用し、TMR 型プロトン磁力計モジュールの場合には、磁場印加にのみ使用する事になる。図. 1 8 に今回製作した測定対象磁場印可用ヘルムホルツコイルと検出用ピックアップコイル（励起磁場印可兼用）と計測機器の写真を示す。





本研究の磁力計モジュールシステム

図. 1 7 従来(磁場印加・検出兼用コイル)の磁力計モジュールの測定系と製作したコイルと回路。

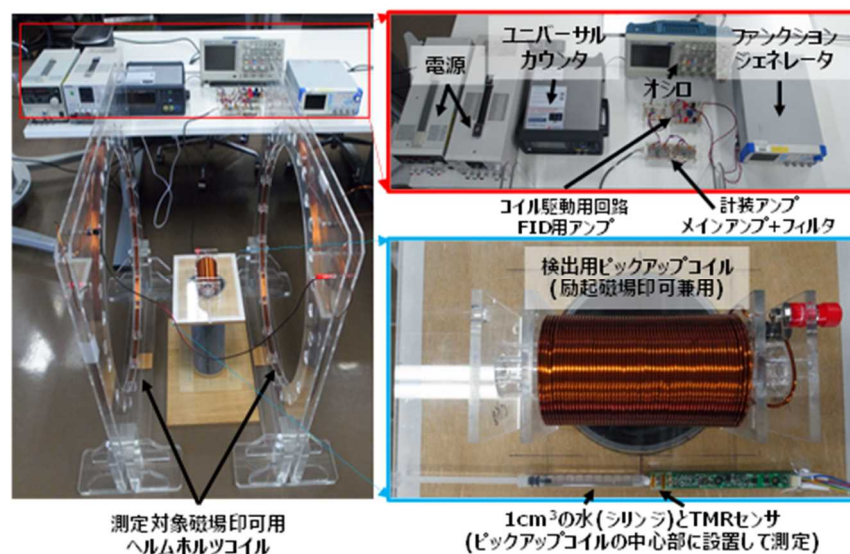


図. 1 8 測定対象磁場印可用ヘルムホルツコイルと検出用ピックアップコイル（励起磁場印可兼用）と計測機器。

図. 1 6 に示した信号検出に用いる回路の動作確認とシステムノイズが目標値の 100pT 以下を達成しているかを確認する為に、図. 1 8 に示したコイルと従来の TMR センサ (10mm×36mm) を用いて測定を行った。使用した水の容量は 400cc である。ヘルムホルツコイルで  $50\mu\text{T}$ （地磁気を想定）の磁場を発生させた場合と、磁場  $0\mu\text{T}$  の場合のそれぞれの出力を確認した。尚、この測定は地磁気の影響を 1/100 まで低減できるシールドルーム内部で行った。 $50\mu\text{T}$  の磁場を発生させた場合に得られた信号を図. 1 9 (a) に示す。励磁磁場遮断によって、時間と共に NMR が時間と共に減衰する FID 信号が観測された。又、その共鳴周波数の周波数成分を解析したところ、2.1kHz となり、ヘルムホルツコイルに印加した磁場の強度である  $50\mu\text{T}$  に良く一致している事が確認できた (図. 1 9 (b))。

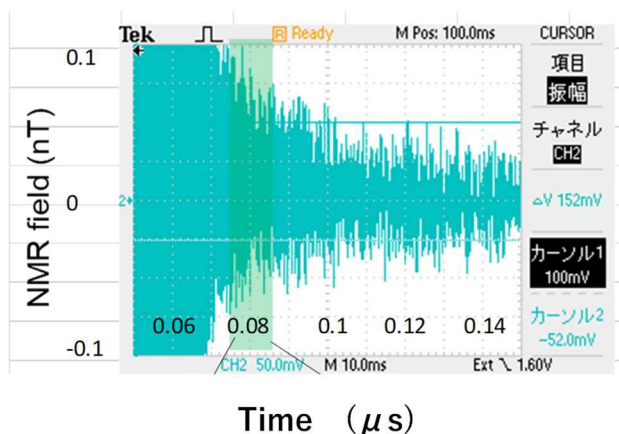
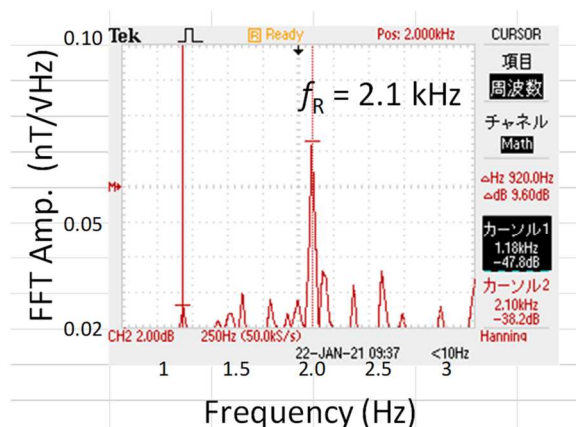


図. 19 (a) ヘルムホルツコイルで  $50 \mu\text{T}$  の磁場に得られた FID 信号。



(b) NMR の周波数成分の解析結果。

ヘルムホルツコイルからの磁場を  $0 \mu\text{T}$  にした場合のシステムノイズについては  $\pm 23\text{pT}$  であった(図. 20)。これは磁気分解能の目標値である  $100\text{pT}$  より低い事から目標をクリアしていた。

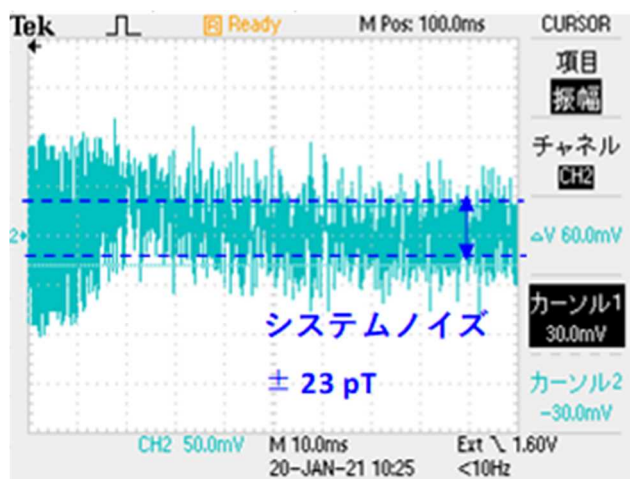


図. 20 測定対象磁場が  $0 \mu\text{T}$  の場合の測定計のシステムノイズ。

又、励磁コイルによる  $10 \text{ mT}$  以上のパルス磁場を印加した場合(約  $100 \text{ pT}$  の NMR 信号強度に対応)に、パルス磁場が  $1 \sim 2 \text{ ms}$  (プロトンの緩和時間よりも十分に短い時間)で消磁する必要があるが、現時点で  $\phi 70\text{mm}$  のコイル(巻数 600、直流抵抗値  $1.53 \Omega$ )を用いて測定すると、 $10\text{mT}$  のパルス磁場を印加した場合の消磁時間の結果は  $8\text{ms}$  であり、目標の  $2\text{ms}$  以下に対して未達であった(図. 21)。但し、後述するように、消磁時間  $8\text{ms}$  のままで最終的な目標である  $1\text{cm}^3$  の水から発生するプロトンの NMR 信号を  $1\text{cm}^2$  以下の TMR センサの計測する事ができた。これは、ピックアップコイルを NMR 測定に使用した経験から  $2\text{ms}$  を目標として設定したが、TMR センサの感度が高い事で、パルス磁場の消磁時間に余裕ができた為と考えている。

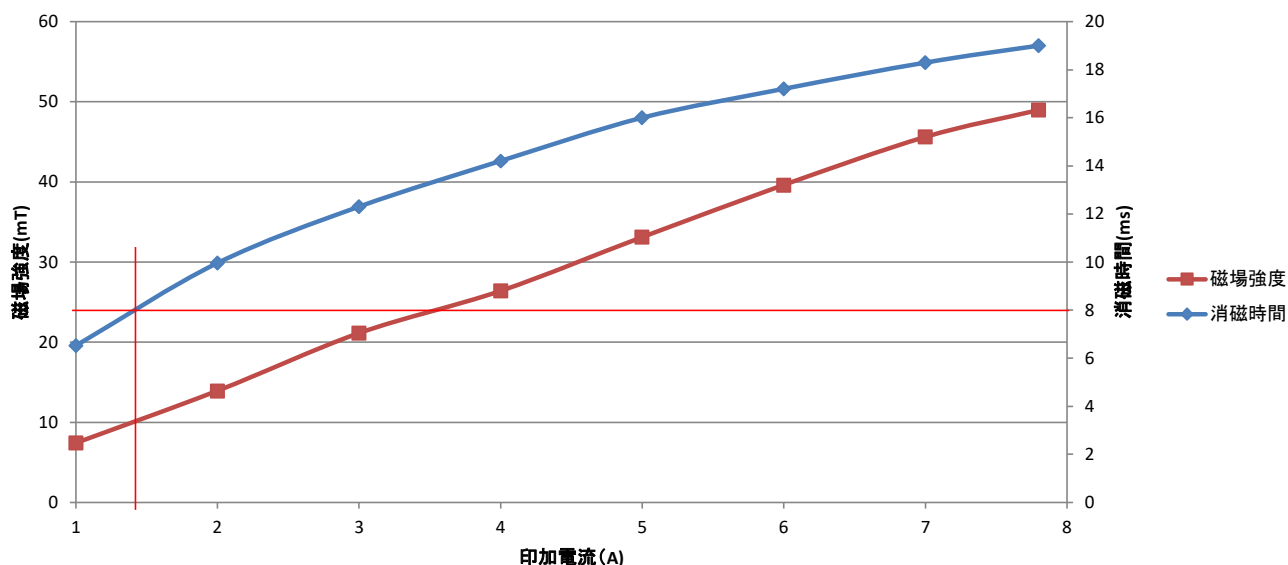


図. 2 1 NMR 信号を励起するための磁場発生装置の印加電流と磁場強度と消磁時間の関係

### (3) NMR 信号の測定・磁力計の性能評価

#### (3) - 1 センサの個別評価

最初に、我々が生体磁場計測に使用していた装置を使用し、 $1\text{cm}^2$  以下の TMR センサ単独で  $1\text{kHz}\sim 10\text{kHz}$  の周波数帯域で  $100\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  以下の磁場分解能を実現できることを確認した。表. 3 にそれぞれの FC を付加したセンサの信号出力、ノイズ密度を示す。表. 4 に各種センサの FC の有無による磁場分解能の違いを示す。FC を付与する効果について、FC (2) と  $0.31\times 0.31\text{cm}^2$  の素子を組み合わせる事によって一番顕著に性能が向上し、磁気センサの性能表記で一般的な  $1\text{Hz}$  における磁気分解能は  $1/10$  以下の  $8.2\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$  を達成した。図. 2 2 にはプロトン磁力計の動作周波数範囲である  $1\sim 10\text{kHz}$  における磁場分解能のスペクトルを示す。すべてのセンサにおいて目標値である  $100\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  以下を満たしていることを確認することができた。

表. 3 各種 FC を付加したセンサの信号、ノイズ密度。

FC	センサ素子	信号(FC有り) ( $\mu\text{V}/\mu\text{T}$ )	ノイズ密度 ( $\text{nV}/\text{Hz}^{1/2}$ )@1 Hz
(1)	$0.71\times 0.71\text{cm}^2$	5680	123
(2)	$0.31\times 0.31\text{cm}^2$	9920	81
(3)	$0.31\times 0.31\text{cm}^2$	3200	193

表. 4 各種センサの FC の有無による磁場分解能の違い。

FC	センサ素子	磁場分解能(FC無) ( $\text{pT}/\text{Hz}^{1/2}$ )@1 Hz	磁場分解能(FC有) ( $\text{pT}/\text{Hz}^{1/2}$ )@1 Hz
(1)	$0.71\times 0.71\text{cm}^2$	136.2	21.7
(2)	$0.31\times 0.31\text{cm}^2$	345.3	8.2
(3)	$0.31\times 0.31\text{cm}^2$	279.3	60.3

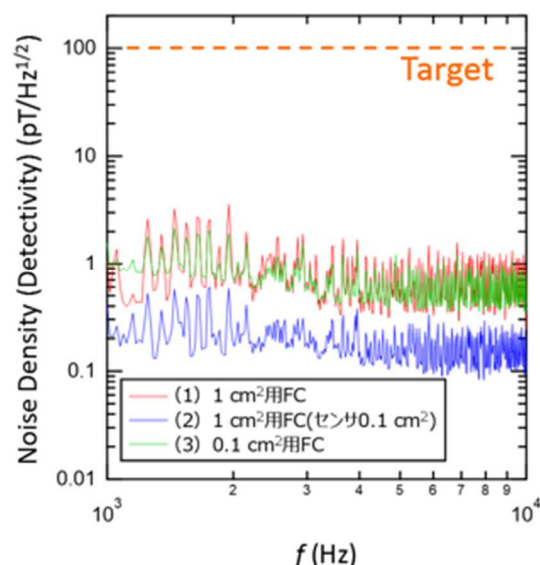
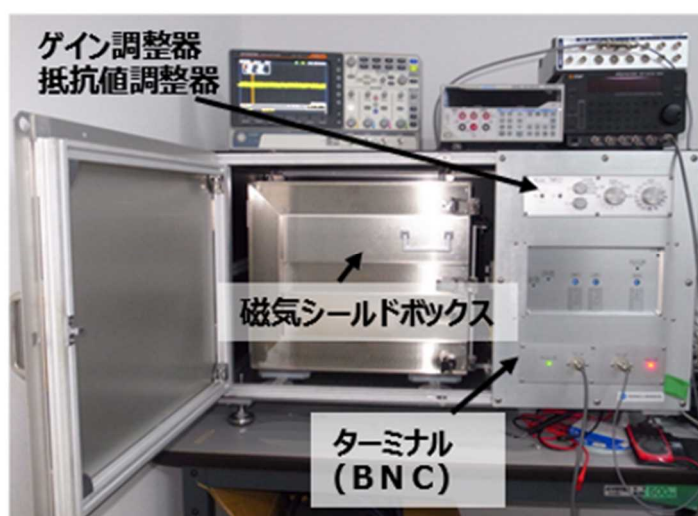


図. 2 2 (a) 生体磁場計測用測定装置。

(b) FC 付 TMR センサの磁場分解能。

又、TMR素子の信号出力が、コイル検出と比較して、素子サイズ（面積）に依存しない事を  $1\text{cm}^2$  以下の実センサで確認した。素子面積が  $0.50\text{cm}^2$  と  $0.096\text{cm}^2$  の TMR センサを用いて  $1\mu\text{T}$  の磁場を印可した場合の出力を測定したところ、それぞれ  $992\mu\text{V}$  と  $696\mu\text{V}$  の信号出力を得、 $0.096\text{cm}^2$  に対する  $0.50\text{cm}^2$  の出力の割合は  $70.2\%$  であった。図. 2 3 に青丸で示す。ピックアップコイルについて、同様に  $0.50\text{cm}^2$  から  $0.096\text{cm}^2$  へ面積が変化した場合の信号の変化を計算により求めたところ、 $19.1\%$  であり、信号の素子面積依存性は、ピックアップコイルを用いた場合に対して、TMR センサを用いる事で大きく改善する事を確認した。更に  $0.50\text{cm}^2$  のセンサに FC を付与し面積が  $0.68\text{cm}^2$  となった FC (1) 付き TMR センサ、 $0.096\text{cm}^2$  のセンサに FC (2)、FC (3) をそれぞれ付与し面積が  $0.60\text{cm}^2$  と  $0.096\text{cm}^2$  となった FC 付き TMR センサのデータを図. 2 3 に赤丸で示す。FC を付与する事で出力は向上するが、面積依存性は大きくなる事が判明した。但し、何れのセンサも面積は  $1\text{cm}^2$  以下である。

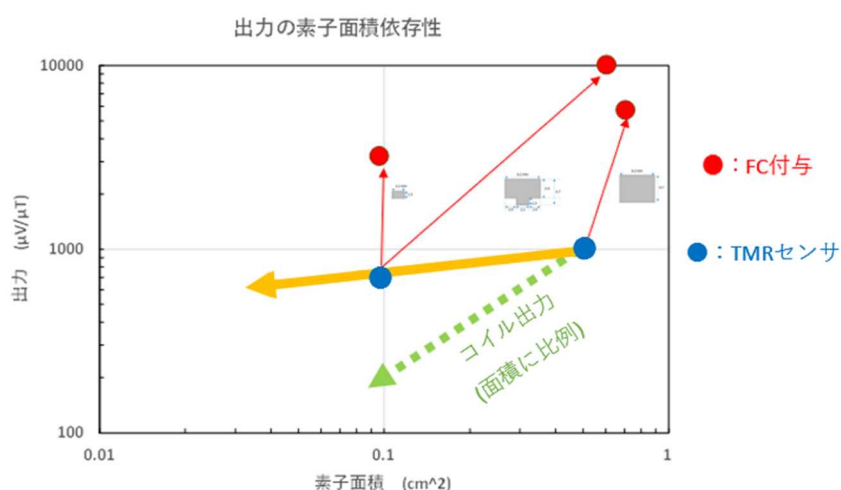
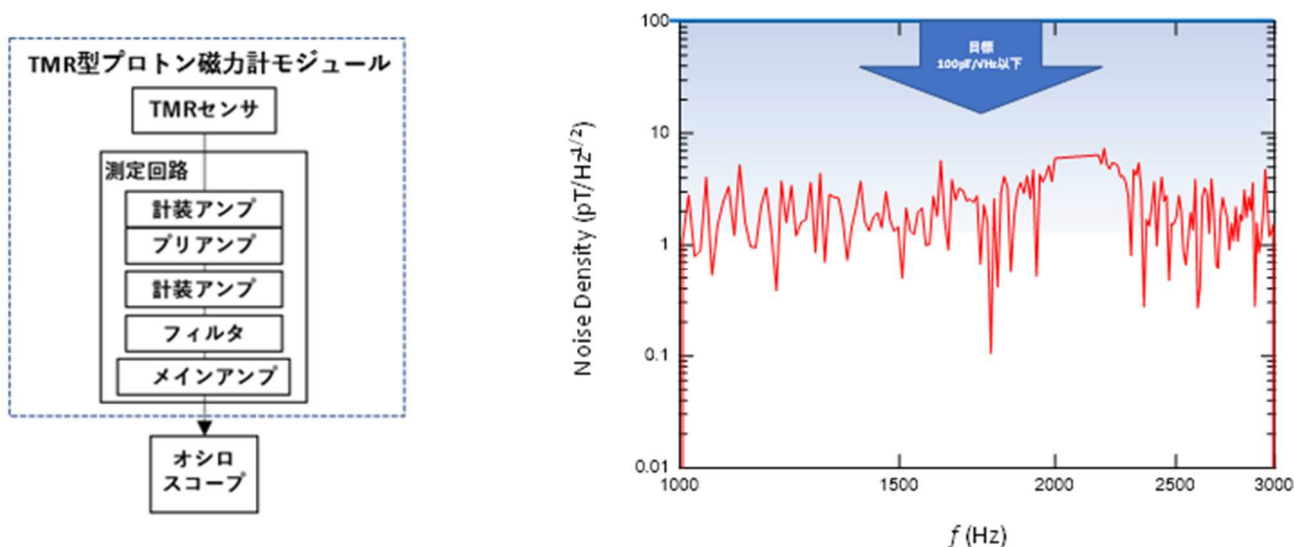


図. 2 3 信号出力の素子サイズ（面積）に依存性。

次に、本研究の測定における最終目的である素子面積が  $1\text{cm}^2$  以下の TMR センサを用いて  $1\text{cm}^3$  の水から発生するプロトンの NMR 信号を測定する為に、FC (2) と  $0.31 \times 0.31 = 0.096\text{cm}^2$  の TMR 素子を組み合わせた面積  $0.60\text{cm}^2$  の TMR センサを用いた TMR 型プロトン磁力計モジュールと図. 1 8 の NMR 評価システムを用いて測定を行った。まず、 $1\text{kHz} \sim 10\text{kHz}$  の周波数帯域で  $100\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  以下



の磁場分解能を実現できることを確認した。図． 2 4 （a）にTMR型プロトン磁力計モジュールの構成図、図． 2 4 （b）にTMR型プロトン磁力計モジュールの磁気分解能を示す。センサ単独の場合より分解能は低めではあるが、測定帯域全てで $10\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下であり、目標値の $100\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下を達成した。



図． 2 4 （a）モジュールの構成図。（b）TMR 型プロトン磁力計モジュールの磁場分解能。

### （3）－ 2 NMR 評価

次に $1\text{cm}^3$ の水から発生するプロトンのNMR信号の測定を行った。測定周期は50秒とし、内8秒を核磁気化時間とした。核磁気化に使う励磁コイルの駆動電流は10Aで75.4mTに相当する。外部磁界は地磁気 $50\mu\text{T}$ を想定し0.848Aをヘルムホルツコイルに印加した。アベレーシング回数は512回である。TMR型プロトン磁力計モジュールとピックアップコイルからの出力を同時計測している。得られたNMR信号を図． 2 5に示す。黄色がピックアップコイル、紫がTMR型プロトン磁力計モジュールそれぞれのNMR信号である。励磁が終了し、タイムラグの後に減衰が始まる様子が観測されている。右上の拡大図を見ると、一定の周期を持った信号である事が見て取れるが、このままでは判りづらいので、外部磁界を42、46、 $50\mu\text{T}$ と変化させた場合のユニバーサル周波数カウンタで周波数変換した結果を図． 2 6に示す。縦軸はTMR型プロトン磁力計モジュールで測定したNMR周波数を、横軸はピックアップコイルで測定したNMR周波数を示している。両者は良い相関を示しており、TMRセンサをプロトン磁力計として応用する上で、十分な可能性を持つ事を示すことができた。最終的には磁場強度へ変換する必要がある。磁場の大きさを $B\text{ (T)}$ 、NMR周波数を $f$ 、とした場合、磁場と周波数の関係は $B = (23.486595\text{nT/Hz}) f$ の形で表現される。これを用いてNMR周波数を磁場に変換した結果を図． 2 7に示す。TMR型プロトン磁力計は従来のプロトン磁力計（ピックアップコイルの値）に対して、十分なリニアリティを持つ事を示している。

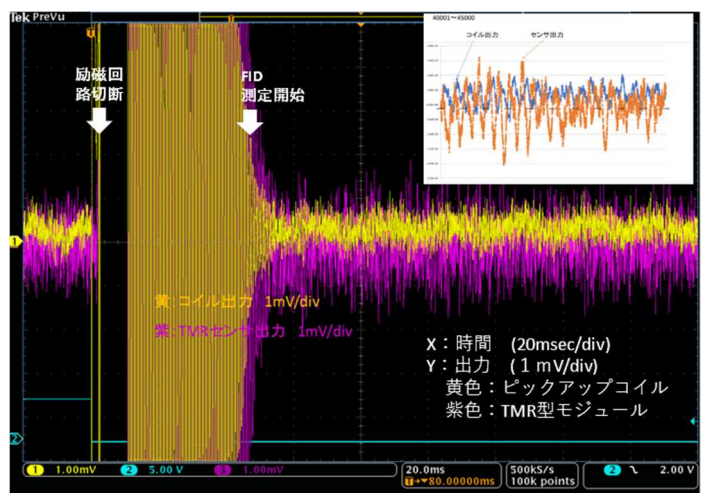


図. 2 5  $1\text{cm}^3$ の水から発生するプロトンのNMR信号。

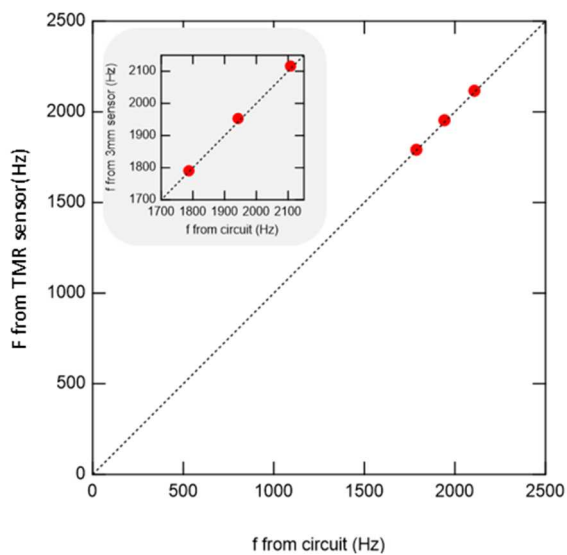
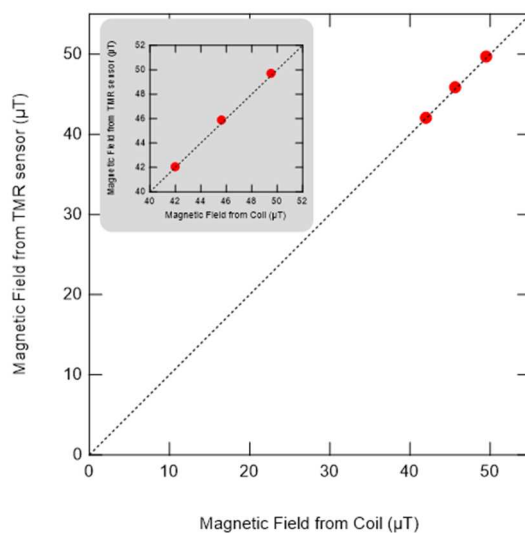


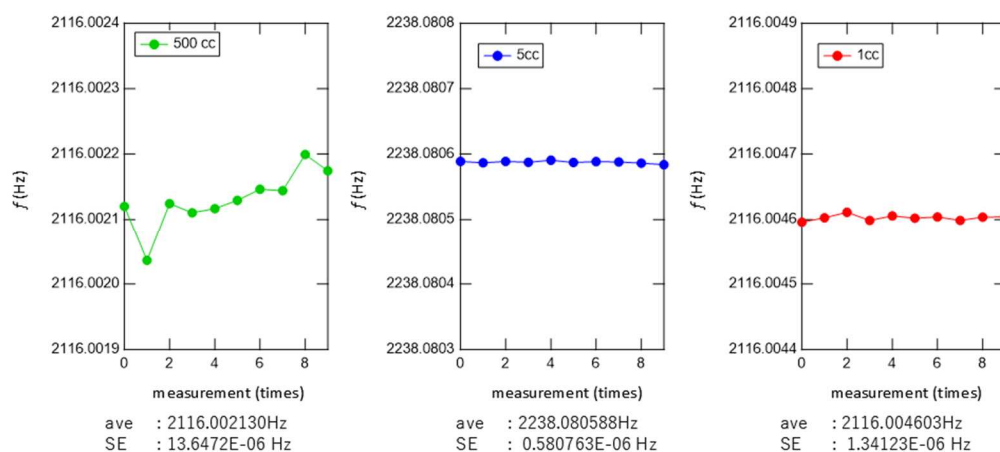
図. 2 6 外部磁界を変化させた場合のTMR型プロトン磁力計と従来のプロトン磁力計のNMR周波数。





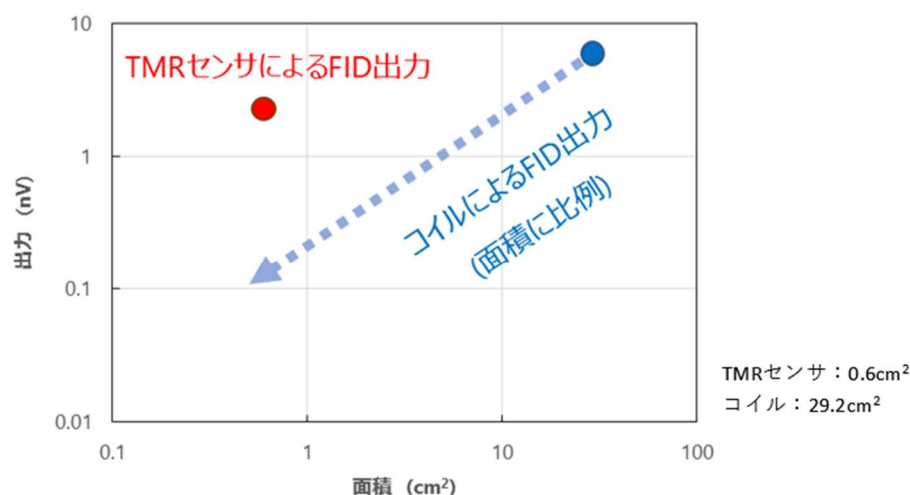
図． 2 7 外部磁界を変化させた場合のTMR型プロトン磁力計の  
従来のプロトン磁力計に対するリニアリティ。

測定の繰り返し精度を確認する為に、水量を $1\text{cm}^3$  (1cc)、 $5\text{cm}^3$  (5cc)、 $500\text{cm}^3$  (500cc) と変化させて10回の測定を行った。全ての水量で標準誤差は $20\text{ }\mu\text{Hz}$ 以下であり、1ppm以下の繰り返し精度を確認した (図． 2 8)。



図． 2 8 TMR型プロトン磁力計によるNMR測定の繰り返し精度。

今回、TMR型プロトン磁力計モジュールとピックアップコイルからの出力を同時計測しており、改めて両者のセンサ面積を比較した結果を図． 2 9に示す。TMR型プロトン磁力計モジュールに用いたTMRセンサの面積は $0.60\text{cm}^2$ で、 $2.25\text{nV}$ の信号を得た。これに対してピックアップコイルの面積は $29.20\text{cm}^2$ で $5.96\text{nV}$ であった。もし、ピックアップコイルをTMRセンサと同等の面積にした場合に予測される出力は $0.12\text{nV}$ と検出が難しいレベルである。以上から、本研究の目的であった素子面積が $1\text{cm}^2$ 以下と非常に小さい面積領域において、原理的に出力の面積依存性が小さいTMR素子を用いる事で、ピックアップコイルでは難しい小型プロトン磁力計を実現できる可能性を、磁場強度に対するリニアリティ、1ppm以下の繰り返し精度の実測値を示すことができた。



図． 2 9 TMRセンサとピックアップコイルそれぞれの面積とFID出力の比較

上記のように、素子面積が $1\text{cm}^2$ 以下のTMRセンサを用いて $1\text{cm}^3$ の水から発生するプロトンのNMR信号を測定した結果、リニアリティや繰り返し精度についてはプロトン磁力計としての可能性を示す事ができた。但し、一回の計測に7時間7分(測定周期：50秒、アベレーシング回数：512回)要している。測定周期50秒の内訳として8秒を核磁気化時間、FID測定時間は約0.1秒以下、約42

秒は励磁コイル冷却の為の保持時間である。つまり実測時間は1時間9分ほどである。一回の計測に要する時間は用途に応じて変化すると考えられるが、7時間余り掛かるのは現実的では無いと思える。今後、コイルを励磁専用として最適化を行う事や、冷却効率を高める事で冷却の為の保持時間は短縮できると考えるが、実測時間の1時間余りは現時点で最低限必要な時間である。以上を考えると、測定対象を地磁気程度の $50\mu\text{T}$ の場合、必要となる水量 $1\text{cm}^3$ と、それを検出するTMRセンサの面積として $0.60\text{cm}^2$ 程度が現時点での実用的な限界と考える。

今回の結果から見込めるTMR型プロトン磁力計モジュールのセンサ部の大きさは、直径38mm、長さ60mmで体積約 $79,400\text{mm}^3$ である。現在市販されているプロトン磁力計モジュールの中で、センサ部の小さいものは直径78mm、長さ188mmで体積約 $900,000\text{mm}^3$ であった\*。これと比較すると、体積で1/10以下を実現できる事を示している。センサ部の大きさは、信号を得るのに必要な水の量に依存しており、体積約 $900,000\text{mm}^3$ のセンサ部の内、水の量は約半分程度( $450,000\text{mm}^3$ )である。本研究では、この水の量を1/450の $1\text{cc}$ ( $1000\text{mm}^3$ )まで減らしても、TMRセンサを用いる事でNMR信号の検出を成功させた。よって、励磁機構を水の量 $1\text{cc}$ に対して最適化する事で、更なる小型化を実現できると考える。原理的には水や油ではなく、固体で核磁気共鳴を発現する材料を基板とし、その上にTMR素子や励磁用薄膜コイルをフォトリソグラフィによって形成する事で、ICチップの様なTMR型プロトン磁力計モジュールの開発が期待される。

(\* <http://www.tierra.co.jp/products/PM218SD.pdf>)

## 4. 委託業務全体の成果

### 4. 1 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）や、目標を超える成果

#### 4. 1 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）や、目標を超える成果

当初、一番磁場分解能が高いTMRセンサは面積 $0.68\text{cm}^2$ と予想していた。しかし、FCの形状効果により、これより小さい $0.60\text{cm}^2$ の方が高い磁場分解能を示し、このセンサで $1\text{cm}^3$ の水量でのNMRの計測ができた。今後、FCを含めたTMRセンサの設計を最適にする事で、更なる小型化が期待される事から、想定を上回る結果であると同時にTMR型プロトン磁力計の将来性が高まったと考える。

### 4. 2 研究課題の発展性（間接的成果を含む）

本研究では、超小型のプロトン磁力計の可能性を示したが、この技術は小型の核磁気共鳴像(MRI)実現にも直接結びつく重要な技術と考えている。TMRセンサは生体用磁気センサとして、心磁計や脳磁計への応用も進められている。例えば脳磁計へ応用した場合、脳波などの電氣的に測定した信号に比べて約10倍の空間分解能で測定が可能である。現在、脳磁計として使用されている超伝導量子干渉素子(SQUID)と比較した場合、磁気シールドルームなどの特殊設備を必要としないので、将来は日常環境において、同一デバイスで脳磁測定とMRIを取得可能になる。このことで、脳の構造情報と磁場信号が同一装置で計測でき、どのような信号がどこで発生しているかを精度良く測定できる。よって、従来の脳波などのデバイスでみられる分析ミスや、ヒトによる有効性のバラツキを劇的に低減できる。そのため、波及効果は、医療・福祉・教育・エンターテインメント・マーケティングなど、極めて広範な分野で応用され、超巨大な市場へと成長する可能性がある。

よって、今後一つTMRセンサで、MRIと生体磁場信号の両方を同時に計測できる医療機器を実現する基礎となる成果と考える。

### 4. 3 研究成果の発表・発信に関する活動

第46回 日本磁気学会学術講演会の招待講演にて本研究の成果の一部を報告する予定。

会期：2022年9月6日～8日

題名：Development of compact proton magnetometer using TMR sensor

## 5. プロジェクトの総合的推進

### 5. 1 研究実施体制とマネジメント

組織内の意思決定については研究代表者と実施者は毎週月曜日の午前中に定例会議を行い、進捗状況の把握と必要な意思決定を行い、必要に応じてフェイスツーフェイスのコミュニケーションを行った。現場レベルでは、テーマ毎のメンバーは、ほぼ毎日必要な情報の確認を行った。全体会議としては、原則毎月一回、研究代表者の会議を行い、全体的な進捗の確認を行った。以上により研究開発体制を有効に機能させる取り組みを行った。

### 5. 2 経費の効率的執行

無駄な経費を発生させないように、常に研究実施者レベルで毎週の定例会議で確認しながら実行した。

## 6. まとめ、今後の予定

今後、TMR型プロトン磁力計の実現に向けて、TMRセンサの更なる感度向上や励磁機構の小型化と熱対策等、今回課題として明確になった項目について取り組み、超小型プロトン磁力計の商品化を具体的なものにする活動を計画、実施する予定である。又、その発展形である小型NMRについては、周辺技術も含めて、研究課題も広範囲であると考えている。本件については、既存のNMRメーカー等を含めて、社外の協力会社や研究所等との連携も含めて計画していく。

## 7. 研究発表、知的財産権等の状況

### (1) 研究発表等の状況

種別	件数
学術論文	該当なし
学会発表	該当なし
展示・講演	該当なし
雑誌・図書	該当なし
プレス	該当なし
その他	該当なし

### (2) 知的財産権等の状況

該当無し

### (3) その他特記事項

該当無し

以上