

研究成果展開事業
ー戦略的イノベーション創出推進プログラムー
(S-イノベ)

研究開発テーマ
「スピン流を用いた新機能デバイス実現に向けた
技術開発」

研究開発テーマ中間評価（Ⅱ）用資料

平成 30 年 11 月 15 日

1. 研究開発テーマ

「スピン流を用いた新機能デバイス実現に向けた技術開発」（平成 23 年度発足）

電子は電荷とスピン（磁化）の 2 つの自由度を有しているが、従来これらの自由度は別々に産業に利用されてきた。2 つの自由度を結びつける手段としては、効率の低い電磁コイルしかなかったからである。しかし 80 年代後半の巨大磁気抵抗（GMR）効果の発見はこの事情を大きく変えた。電荷とスピンの間で直接働く量子力学的相互作用を利用することで、2 つの自由度を効率よく結合することが可能となった。このパラダイムシフトが生み出した GMR 素子は磁化の情報を直接電気情報に変換する高効率な情報読み取りヘッドとして、ハードディスクの容量の飛躍的向上をもたらした。スピントロニクスと呼ばれるこの技術分野からは、その後も、トンネル磁気抵抗（TMR）素子や不揮発性メモリである磁気ランダムアクセスメモリ（MRAM）が市場に出て行き、現在、ストレージ・メモリ産業を大きく変えつつある。これらのスピントロニクス素子の成功は、いずれも、固体中におけるスピン偏極、スピン注入、スピントルクなどのスピン流と呼ばれる特異な物理現象を利用することにより実現されたものである。スピン流の学理は最近さらに急速な発展を見せつつあり、スピンプンピング、スピン蓄積、スピンホール効果、逆スピンホール効果、スピンゼーベック効果などの新しい概念が続々と出現してきている。そのため、スピン流からはさらに新しい応用デバイスが生み出されるものと大きな期待がかけられている。

日本はスピントロニクス・スピン流の基礎研究とその実用化の両面において、世界的にずば抜けた実績を誇っている。このような背景をもとに、本研究開発は、スピン流の新たな革新的応用可能性を探ることを目的として実施されるものである。

（公募要領から）

2. プログラムオフィサー（PO）

氏名 安藤 功児 （国立研究開発法人産業技術総合研究所 名誉リサーチャー）

3. 採択課題

採択年度	プロジェクトマネージャー	中間評価（H29年度実施）時 所属・役職	研究開発課題
平成 23年度	佐藤 利江	株式会社東芝 研究開発センター フロンティアリサーチラボラトリー 技監	3次元磁気記録新ストレージアーキ テクチャのための技術開発
	安藤 康夫	東北大学 大学院工学研究科 教授	トンネル磁気抵抗素子を用いた心磁 図および脳磁図と核磁気共鳴像の室 温同時測定装置の開発

4. 研究開発テーマのねらい（目標）

4.1 PO のねらい（目標）

1980年代後半の巨大磁気抵抗（GMR）効果の発見を契機として、電子の持つ電荷とスピンとの間の直接的な相互作用を利用するスピントロニクス技術分野が創りだされた。その後、この技術分野から生み出された室温トンネル磁気抵抗（TMR）効果は、大容量磁気ハードディスク（HDD）の情報読み取り用磁気ヘッドや高性能不揮発性メモリである磁気ランダムアクセスメモリ（MRAM）などの新デバイスの開発へと発展し、これらデバイスは既に実用化されるに至っている。同時に、デバイスの開発と並行して行われた基礎研究からは、固体中におけるスピンの多様で多彩な挙動に関する新しい知見（スピン流）が、現在に至るも続々と報告されている。そのため、スピントロニクス・スピン流には、HDD用磁気ヘッドやMRAMを超える新たなデバイスの創出が期待されている。本研究開発テーマは、スピン流にかかわる学理における日本の優れた実績を背景に、スピントロニクス技術・スピン流現象を利用した革新的応用デバイスの実現を狙っている。

本研究開発テーマが属する戦略的イノベーション創出推進プログラム（S-イノベ）は、大学等の基礎研究の成果を基に、大学等と企業との連携を通じて大規模かつ長期一貫したシームレスな研究開発を推進することで、産業創出の礎となる技術確立し、もって新産業の創出に資する技術の実用化を促進することを目的としている。よって研究開発課題の採択にあたっては、学理面において最先端かつ極めて挑戦的であることが求められるばかりでなく、目的とするデバイスが実現した際の産業的・社会的インパクトが大きなものであることを重視している。

スピントロニクス・スピン流に対する社会からの期待は現在も非常に高い状態にあるが、その理由は何よりも、HDD 読取磁気ヘッドおよび MRAM の実用化成功というこれまでの実績によっている。高い期待に応えスピントロニクス・スピン流をさらに発展させていくためには、HDD ヘッド・MRAM に続く社会的有用性を具体的に提示していくことが必要である。その成功によって、スピントロニクス・スピン流の学理もますます深度をまし、学理・応用の両輪の発展が可能になると考えている。

4.2 研究開発テーマ（採択した課題）で実現をねらったことや研究成果として目指したこと 以上のような本研究開発テーマの性格を考慮して、下記 2 件の研究開発課題を採択した。

研究開発課題：「3次元磁気記録新ストレージアーキテクチャのための技術開発」

（略称：「3次元磁気記録」）

プログラママネージャー（開発リーダー兼務）： 佐藤 利江 （(株) 東芝）

研究リーダー： 久保田 均 （(独) 産業技術総合研究所）

研究開発課題：「トンネル磁気抵抗素子を用いた心磁図および脳磁図と核磁気共鳴像の

室温同時測定装置の開発」 （略称：「心・脳磁計」）

プログラママネージャー（研究リーダー兼務）： 安藤 康夫 （東北大学）

開発リーダー： 西川 卓男 （コニカミノルタオプト（株）→コニカミノルタ（株））

研究開発課題「3次元磁気記録」は、新原理に基づく3次元磁気記録技術の開発を行うものである。

インターネットは私たちの生活や社会構造を大きく変えているが、それを最も基盤的な部分で支えている技術が情報ストレージ技術、具体的には磁気ハードディスク（HDD）技術である。10兆円程度の巨大な市場規模も期待される産業的にも極めて重要な技術である。この情報ストレージ技術が進歩を止めるような事態が起こった場合には、情報爆発といわれるほど日々生み出される膨大な情報を受け止めることができなくなり、インターネット活用による社会の進化もやがて止まらざるを得ない。情報ストレージ技術に対しては、ビット当たりのコストが安価であることが何よりも求められる。そのため、これまではHDDの2次元記録媒体の記録ビットあたりの面積を微細化することでビットコストを下げることを目的とした技術が連綿として開発・実用化されてきた。その結果、現在では1ビットのサイズが20~30nm程度に到達しつつある。しかしながら、ここまでビットサイズが小さくなると、更に微細化することが極めて困難な状況になっている。今後の発展を加味しても2Tbit/inch²以上の記録密度の達成の見通しが全く立たないのが現状である。

このような現状認識のもと、本研究開発課題は磁気ストレージ技術の3次元化という全く新しいアプローチで問題の解決を図ろうとするものである。これまでの磁気記録技術はすべて2次元平面への記録で行われてきた。最近フラッシュメモリが3次元化され、その記録容量を伸ばしたことからわかるように、3次元化は原理的には記録容量の向上に大変効果のある手法である。しかしながら、磁気記録技術の3次元化という発想は、これまでに全く想定もされていなかった斬新なものであり、実際、現在においても、その実現に取り組んでいるのは世界的にみても本研究開発課題のみである。

本研究開発課題は、スピン流を用いた新機能素子であるスピントルク発振（STO）素子が記録媒体中に誘起する強磁性共鳴現象を利用して、多層磁気媒体への選択的記録・再生を行うことを目指している（図1）。これは磁性体が持つ固有の磁気共鳴周波数が磁性体の組成によって異なることを利用すれば、積層された複数の磁性薄膜媒体を構成する個々の磁性層を共鳴周波数の違いによって識別できるはずであるという発想に基づくものである。この発想が実現可能性を帯びてきた理由は、スピン流を用いることで初めて可能になったナノスケールサイズの超小型マイクロ波発振器であるSTO素子の出現である。これにより10Tbit/inch²の記録密度を持つ新しい磁気ストレージ技術の可能性を示すことを目的としている。

新原理に基づく3次元磁気記録システムの実現

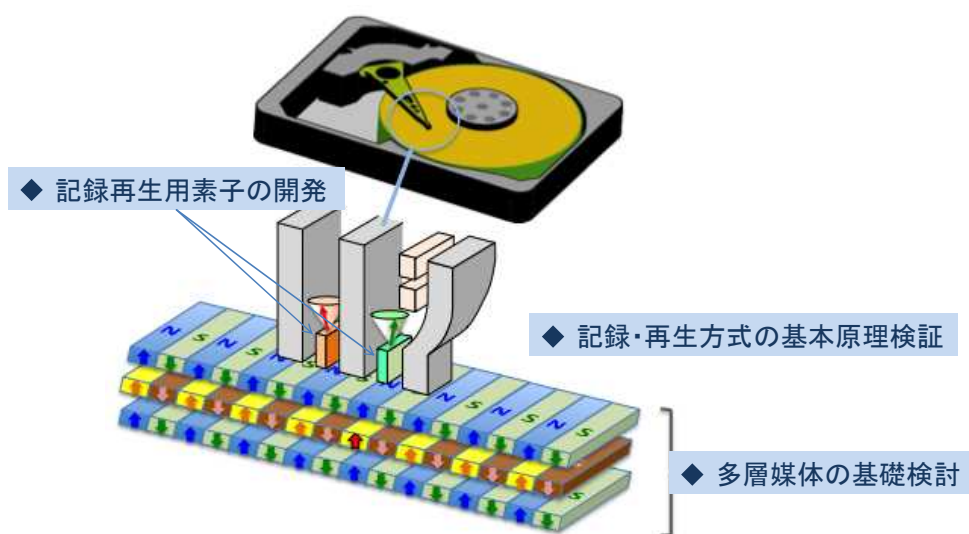


図1：スピントルク発振素子と多層記録媒体から構成される3次元磁気記録システム

研究開発課題「心・脳磁計」は、トンネル磁気抵抗（TMR）素子の磁場検出感度を極限まで高めて、生体が発生する生体磁気を検出できるようにすることで、診断・治療のための画期的な新装置を開発しようとするものである。

病気の診断・治療には、生体内の器官の活動状態に関する情報を得ることが重要である。患者の負担軽減や、作業の煩雑さ・危険性を避けるためには、外部から非侵襲的に機能検査が行えることがもとめられる。この観点から、現在、心電図や脳波などの生体電圧計測が広く用いられている。これは生体内にある器官の活動に伴って起こるイオンによる電氣的動きが、種々の器官を介して皮膚表面に到達し電位を発生させる現象を用いている。しかしながら胸部や頭部を構成する組織の導電率は不均一であり、電流は複雑な経路を通過して皮膚表面に到達するため、体表面の電位分布から生体内部の信号源の位置を推定する精度が十分に確保できないという問題を抱えている。一方、生体磁気計測では、イオンの動きにより生じる磁場を計測するもので、心磁図と脳磁図として知られている。導電率の不均一性による磁場分布の歪みは電圧測定に比べると無視できる程に小さいため、心磁図や脳磁図における生体電気活動の原理的な位置推定精度は、心電図・脳波に比べてきわめて高いとされている。しかしながら、現時点では心磁図や脳磁図の利用は極めて限定されている。電圧計測が手軽に行えるのに比して、磁場計測が大変困難なためである。心臓活動や脳活動が体表面で発生する磁場の強さは、それぞれ10～100pT、0.1～1 pTと非常に微弱であるため、現在の心磁図計測や脳磁図計測には、もっぱら超伝導量子干渉素子（SQUID）を用いたものが使われている。しかし、SQUID 脳磁計は極めて大型の装置であり、その稼働には大きな電力とともに入手がますます困難となりつつある液体ヘリウムの供給が必要となり、その利用は大病院においてのみ可能である。また、SQUID 磁場センサを冷却するための固定形状の液体ヘリウムデュワーを、SQUID 磁場センサと頭皮の間に設けざるを得ないという構造上の問題のため、SQUID 磁場センサを個々の患者の頭の形に応じて頭皮に密着して配置することができず、その結果空間分解能が低下してしまう。さらに、測定中一切頭を動かすことができない

状況に置かれる患者への負担が大きいなどの臨床上の大きな問題も抱えている。

室温で使用できる小型の磁場センサとしてはホール素子、フラックスゲート、磁気インピーダンス (MI) センサなどが知られているが、その磁場検出感度は $1 \mu\text{T} \sim 100\text{pT}$ 程度と低く、産業用途や一般電子機器用途には適しているものの、生体磁気検出には使用できない。しかし最近報告されている、磁気トンネル接合 (MTJ) が示す室温トンネル磁気抵抗 (TMR) 効果の大きさの飛躍的な上昇がこの状況を変えつつある。

このような現状認識のもと、本研究開発課題は、室温で動作する多数のトンネル磁気抵抗素子を鰐帷子状や目出し帽子状に配置することで胸・頭部の皮膚に密着させ心磁図・脳磁図を得ることができる装置を開発する。TMR 効果の増大、磁気応答性の向上、多数の TMR 素子のアレイ化と低ノイズ化回路の開発などを組み合わせて、 $10 \sim 100\text{pT}$ オーダーの検出が可能な心磁計および $0.1 \sim 1\text{pT}$ オーダーの検出が可能な脳磁計の試作を目指す (図 2)。

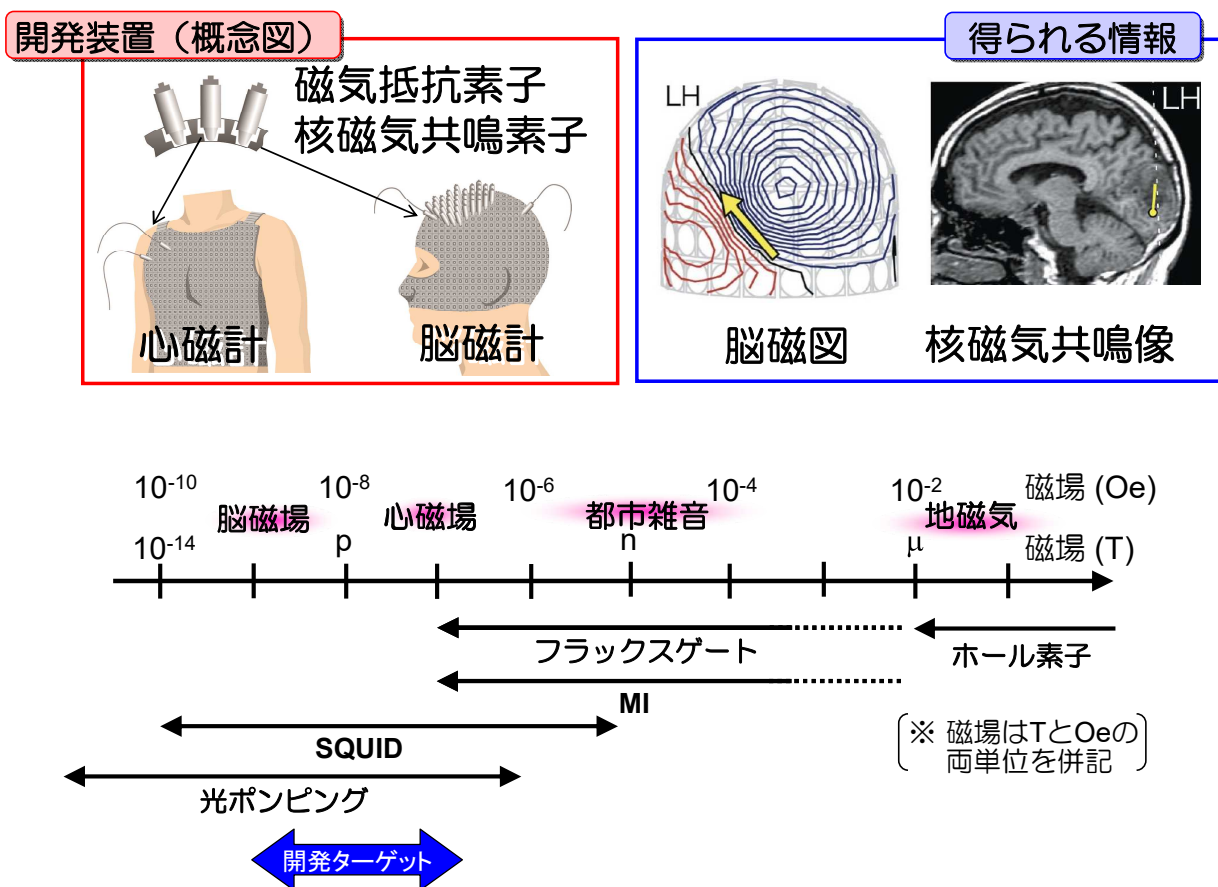


図 2：目標とする開発装置の概念図と磁場センサの検出感度比較

4.3 産業創出の核となる技術の確立、イノベーションに資する成果、社会・経済等に対するインパクトとして目指したこと

研究開発課題「3次元磁気記録」

本研究開発課題が成功した場合の、インターネット社会およびストレージ産業におよぼすインパクトは明確である。

インターネットの普及や高度 IT 化、デジタル機器の普及などにより、情報量の急激な増

加は、この先十年を予測しても計り知れないものがある。膨大な情報量を記録するには、相応の情報機器が必要となる。しかし、現状のストレージ群では、今後の技術進展を加味しても、この膨大なニーズに応えることは不可能であると考えられる。そのため、供給ビット量を劇的に増加できる革新的なストレージ技術が切望されている。ストレージシステムの階層化が進んでいる現状を考えれば、今後も磁気記録のビットコストを、フラッシュメモリを用いた固体ストレージデバイス（SSD）に比べて1桁低い状態に抑え続けるための技術を開発し続けることで、初めて情報ストレージシステム全体として情報爆発に対応することができる。またこのことは同時に、ストレージシステムの大幅な省エネルギー化を可能にするものでもある。10 T/inch²を超えることができれば、現行のハードディスクの10～20台分を1台で置き換えることができるからである。現状、サーバ・ストレージの消費電力を抜本的に低減する方法としては、他に解がない。

巨大な10兆円規模の市場ニーズが待ち受けているストレージ産業では、参加企業の生き残りをかけた熾烈な戦いが行われている。このなかで革新的なストレージ技術を開発していくことは、我が国のストレージ産業の競争力強化にとって重要な意味を持っている。

研究開発課題「心・脳磁計」

本研究開発課題が成功した場合の直接的なインパクトは、診断・治療にかかわるものである。これまでのSQUID磁気センサを使った大掛かりな生体磁気検出装置に代わり、コンパクトで、安価かつ常温で動作する画期的な新しい生体磁気検出装置が出現すれば、これまで限られた医療施設でのみ行われていた心磁場、脳磁場を用いる高度な診断・治療が、いつでもどの病院でも、極端には家庭においてもおこなえるようになる。

本研究課題が秘めるインパクトは、医療関係者以外にとっては馴染みが少ない可能性があるため、以下にその意義をもう少し詳しく述べる。

心磁図の計測によって不整脈の原因部位の診断精度が向上するため、カテーテルを用いた不整脈部位の凝固治療に際しては、治療前に安全に術前評価が可能となる。従来心磁図計測よりも拘束度が低いために長時間の記録が可能となり、突発的に出現する不整脈の検出にも威力を発揮できる。また狭心症や心筋梗塞の診断においては、心筋虚血部位の診断精度が向上する。TMR素子の場合にはSQUIDを用いた従来型よりも安価な検査が可能であり、心筋梗塞のリスクを有する年代の健康診断等への応用が期待される。

脳磁図の臨床応用においては、検出感度の限界についての考慮が必要であるが、自発活動においては振幅の大きな信号を発生する薬剤抵抗性てんかんの術前治療で威力を発揮すると期待される。てんかん異常波は常に出現するとは限らないので、一般的に長時間の測定が必要とされていた。従来型のSQUID磁気センサを用いる脳磁計では頭部の固定が必須であり、30分程度の測定が限界とされていたが、本法では拘束度が低いために長時間の連続計測が可能となる。すなわち、脳波でしか行えなかった発作モニタリングでさえも、脳磁図で可能となるため、てんかん診断の精度が飛躍的に向上すると期待される。

この他、脳梗塞の初期診断、アルツハイマー病などの認知症の診断、精神疾患の診断などにも脳磁図診断は応用が可能であり、安価な計測が可能となるため、脳ドックのような健康診断装置として広い普及が期待できる。現在、運動機能再建学分野、リハビリ分野で脳波を用いたリハビリの研究がなされているが、安価に室温で脳磁計測が可能になれば、より空間

分解能の有利なシステムに移行されていく事が予想される。

今後、日本のみならず世界中で社会の高齢化が進むことは明らかであり、心臓、脳の病気が原因で亡くなる例も決して少なくない。しかしながら現状では心臓、脳の精密検査には高額な医療費が必要であり、検査ができる施設も限られている。本研究課題の技術が礎となり、誰でもが気軽に自分の心臓、脳を日頃からチェックできる環境が整うことにより、「安心、安全な社会」の確立の一助になることが期待される。

また本研究開発課題による超高感度磁気センサの開発は、生体磁気計測に限らず磁場センサ産業全体にも大きなインパクトを持つはずである。現在、磁気センサの市場は数百億円の規模であり、決して小さくはない。対象となるアプリケーションとしても、観測する対象が磁場、磁束、方位にとどまることなく、トルク、電流、位置、速度、加速度など、非常に多い。今後も電気自動車の普及、各種産業用、家庭用ロボットの創出により、磁気センサの市場は発展の一途である。ところが、現在良く用いられている磁気センサの性能は、安価であるか高感度であるかの二者択一に近い状況である。スピン流による、安価でかつ高感度な磁場センサが出現した場合には、磁気センサの市場に大きな変革をもたらす可能性がある。

5. 研究開発課題の選考について

本研究開発テーマの発足に先立って、平成 23 年 8 月 11 日に「スピン流を用いた新機能デバイスの開発」と題する公開ワークショップが開催され、スピン流に関するテーマ設定の可能性について議論がなされた。最近のスピン트로ニクス・スピン流にかかわる学理の急速な進展を反映して、スピントルク高周波素子、スピン熱デバイス、スピントランジスタ、スピン光デバイスなどの多様なデバイスの可能性について議論が行われた。

上記公開ワークショップを受けた JST 内部の検討を経て、本研究開発テーマ「スピン流を用いた新機能デバイス実現に向けた技術開発」を平成 23 年度から開始することが決まり、平成 23 年 9 月 29 日～11 月 7 日の期間で公募が行われた。公募説明会が 10 月 6 日に東京で、10 月 11 日に大阪で行われ、PO が公募趣旨の説明を行った。

応募件数は 8 件であった。これに対し、産業界および学術界における専門家であるアドバイザー 7 名の協力を得て、書類選考ならびに面接選考を行った。アドバイザーに対し、あらかじめ PO から以下(a)～(d)の選考にあたっての 4 つの方針が示された。

- (a) 公募要項では採択件数は 4 件が標準とされているが、無理に 4 件の枠を埋めるつもりはない。納得のいく提案のみ採択したい。
- (b) 公募要領には 4 つ程度の応用カテゴリーを例示しているが、この例示にこだわる必要はなく、カテゴリー間のバランスをとる必要もない。
- (c) S-イノベは実用化を目指した基盤技術開発の制度であるため、実用化の可能性、インパクトを重視したい。ただし、実用化といってもオモチャを作って実証してもらっても困る。
- (d) 10 年後に実用化するためには、現時点で既にかんりの実績を積み、今後の開発能力を大いに期待できるチームである必要がある。実績の判断基準は、あくまで技術的内容である。

応募のあった研究開発課題の内容は、バラエティ豊かであり、若い学理であるスピン流が高いポテンシャルを有し、その応用範囲が多岐にわたっていることが実感された。書類選考を通った 5 課題について面接選考を実施した。面接対象課題には、あらかじめ特に説明すべき項目を複数指定しておくことで、有意義な議論と審査を行った。

選考は以下の 4 つの基準に沿って行われた。

- 基準 1. 提案された応用デバイスや技術は今回の研究開発テーマの設定趣旨に沿ったものか。
- 基準 2. 当該テーマにおけるトップクラスの研究メンバーから構成された強力な研究開発体制となっているか。
- 基準 3. マイルストーンと各ステージにおいて実現すべきベンチマークが具体的かつ定量的であるか。
- 基準 4. 開発の実現性があり、実現されたときの社会的・産業的インパクトが見込まれるか。

基準1と2に関しては、面接対象となった5件の提案課題のいずれもが素晴らしい内容であった。しかし、基準3の設定に苦しむ課題も見られた。スピン流は急速に発展しつつある若い学理であるということを考えれば、無理もない面もあった。公募要領には4件程度の採択を見込んでいたと記述していたが、今回は、POの方針として、特に基準3と4を重視した選考を行うこととした結果、これらを満たした2件の提案を採択することとなった。採択件数を大きく絞ることに 대해서는 選考委員会においてかなりの議論が行われ、POとしてはいささか厳しすぎたかとの反省もある。しかし、その分、採択された2課題はすべての基準において申し分のない開発提案であった。

以下は、採択課題2件の採択理由の概略である。

5.1 研究開発課題：「3次元磁気記録新ストレージアーキテクチャのための技術開発」

(略称：「3次元磁気記録」)

プログラムマネージャー（開発リーダー兼務）： 佐藤 利江 ((株) 東芝)

研究リーダー： 久保田 均 ((独) 産業技術総合研究所)

参画組織：(株) 東芝、(独) 産業技術総合研究所、キャノンアネルバ (株)

基準1. 提案された応用デバイスや技術は今回の研究開発テーマの設定趣旨に沿ったものか。

本研究開発テーマは、スピン流の新たな革新的応用可能性を探ることを目的としており、単なる従来技術の延長線上にはない提案を期待している。本課題が提案する3次元磁気記録技術は、従来に全く例のない斬新なものであり、まさに本開発テーマの設置趣旨に沿ったものと評価された。マイクロ波アシストによる2次元磁気記録技術に関してはすでにNEDO等で開発が行われてきたが、本研究課題が目指す磁気記録の3次元化は、2次元磁気記録技術からの飛躍の度合いが極めて高い意欲的なものである。非常にチャレンジングな開発内容でありながらも、単なる夢物語でない技術的根拠と実績が示されていた。

基準2. 当該テーマにおけるトップクラスの研究メンバーから構成された強力な研究開発体制となっているか。

現在、磁気ハードディスク業界は、3社が世界市場におけるシェアを激しく争っている状況にある。本研究開発課題に参画する(株) 東芝はそのうちの1社であり、磁気記録技術に関する世界トップクラスの技術的蓄積を有している。磁気記録技術は東芝にとってのコア技術の一つと位置付けられている。今回は、磁気記録技術のさらなる飛躍を求めて、外部研究機関・外部企業のもつ先進的技術的知見を活用しようとするものである。

3次元磁気記録技術を実現させるための重要要素技術の一つは、スピン流によるスピントルク発振(STO)素子の高性能化と、それをういた磁性スピンのダイナミクスの理解と制御である。(独) 産業技術総合研究所はMTJ素子を利用したSTO素子のパイオニアであり、現在もSTO素子の世界最高高性能記録を塗り替えている。また、その開発の過程で磁性スピンドイナミクスの理解と制御に関しても

世界トップクラスの知見を有している。今回は、企業と組んで、その高度な技術的知見を用いた革新的磁気記録デバイスの開発に挑む。

磁気ハードディスク用の磁気ヘッドおよび記録媒体の製造装置大手として知られているキャノンアネルバ（株）は、これまでにその高度な磁性薄膜技術を活かして（独）産業技術総合研究所と共同で高性能な STO 素子の開発を行ってきた。今回は、STO 素子のさらなる高度化を図るとともに、3次元磁気記録の実証実験のための磁性多層膜媒体の作製を担当する。

いずれも世界的に知られる高度な技術的実績を持つこれら 3 者の密接な協力体制は、本研究開発課題の実施にとって非常に強力なものであると評価された。ただし、3次元磁気記録システムは磁気記録媒体に対しても大きな変革を迫るものであることを考えるならば、磁気記録媒体およびその書き込み機構に関する学術的専門家の追加が望ましいと思われた。

基準 3. マイルストーンと各ステージにおいて実現すべきベンチマークが具体的かつ定量的であるか。

提案書（非公開）には、社会的・産業的ニーズの将来予想と現状のスピントリニクス技術に関する理解をもとに、よく考慮された 10 年間にわたる研究計画が明確なベンチマークとともに示されていた。

基準 4. 開発の実現性があり、実現されたときの社会的・産業的インパクトが見込まれるか。

磁気記録の 3次元化は、いままで誰も挑戦をしたことのないほど斬新で飛躍的な挑戦である。そのため、現時点では、その実現性は決して高いとは言えないというのが大方の見方であると思われる。しかしながら、非連続的な革新的デバイスの創出に挑むという S-イノベの精神にまさに合致した挑戦であり、その意味で実現可能性があるといえる。そして、3次元磁気記録デバイスが実現された時に、大きな社会的・産業的インパクトが期待できることは、すでに 4.3 に記述したとおりである。

5.2 研究開発課題：「トンネル磁気抵抗素子を用いた心磁図および脳磁図と核磁気共鳴像の室温同時測定装置の開発」（略称：「心・脳磁計」）

プログラムマネージャー（研究リーダー兼務）： 安藤 康夫（東北大学）

開発リーダー： 西川 卓男（コニカミノルタオプト（株）→コニカミノルタ（株））

参画組織：東北大学大学院工学研究科、

コニカミノルタオプト（株）→コニカミノルタ（株）（組織変更）

東北大学原子分子材料科学高等研究機構、東北大学大学院医学系研究科

基準 1. 提案された応用デバイスや技術は今回の研究開発テーマの設定趣旨に沿ったものか。

本研究開発テーマは、スピントリニクスの新たな革新的応用可能性を探ることを目的と

しており、単なる従来技術の延長線上にはない提案を期待している。本課題が提案する TMR 素子を用いて室温で心磁図および脳磁図を測定する生体磁気測定技術に要求される磁場検出感度は、前人未到の領域であり、まさに本開発テーマの設置趣旨に沿ったものと評価された。非常にチャレンジングな開発内容でありながらも、単なる夢物語でない技術的根拠と実績が示されていた。

基準2. 当該テーマにおけるトップクラスの研究メンバーから構成された強力な研究開発体制となっているか。

TMR 素子を用いた生体磁気測定技術を実現するための重要な要素技術は、TMR 素子の高性能化である。東北大学大学院工学研究科は室温 TMR 効果の発祥の組織であり、その後も TMR の向上において世界をリードし続けてきた高い実績を誇っている。また TMR 素子の磁場センサ応用に不可欠な TMR 素子の磁気特性の向上にも大きな実績を有している。

コニカミノルタ（株）（提案時のコニカミノルタオプト（株）が組織変更に伴い名称が変わっている）のコア技術の一つが医療機器・医療用画像診断技術である。そのため、微弱な生体電気信号の処理と解析に高度な技術を有している。同社は将来の脳・神経関連疾患にかかわる大きな診断医療市場と、脳科学が開く新しい可能性に高い関心を持っている。またその前段階としての磁場センサを用いた非破壊検査市場にも関心を持っている。今回は東北大学と協力して革新的な医療機器の開発をめざす。

東北大学原子分子材料科学高等研究機構は、TMR 素子を用いた脳磁計測と同一環境下で生体内の構造、部位に関する情報の得るために必要な低磁場 NMR 装置の開発を担当する。低磁場 NMR 技術自体は、最近ようやく SQUID を用いた開発が行われるようになった萌芽的な技術であり、これを TMR 素子で行った例は皆無である。そのため極めて挑戦性が高い開発課題であるが、臨床サイドからは脳磁図計測の有用なオプション装置として強い期待がある。東北大学原子分子材料科学高等研究機構は TMR 素子に関して高度な知見を有するとともに、スピンの高周波応答特性に関して世界的に知られる高い実績を有しているため、世界的に見ても、この挑戦的な開発を担当するには最適な組織である。

東北大学大学院医学系研究科は、主にてんかん症を対象とする研究と治療に SQUID を用いた脳磁図を活用しパイオニア的な成果を上げてきた。単に脳磁計のユーザーとしてではなく、脳磁計の設計やそれを用いた測定法の開発にも深く関わってきており、脳磁場測定装置のノウハウを有している。今回も、主体的に研究開発の議論に加わり、臨床評価、信号・ノイズ評価を担当する。

提案に当たっては、研究リーダーと開発リーダーの密接な連携のもと、複数の大学医学部および病院の医療従事者にヒアリングを行い、ニーズの的確な把握の努力を行ってきたことも評価された。その結果に基づいて構築された、医工連携の産学共同の開発体制は、本研究開発課題の実施にとって非常に強力なものであると評価された。

基準3. マイルストーンと各ステージにおいて実現すべきベンチマークが具体的かつ定量的であるか。

提案書（非公開）には、医療従事者へのヒアリングに基づく診断・治療上のニーズならびに現状のスピントロニクス・スピン流に関する理解をもとに、よく考慮された10年間にわたる研究計画が明確なベンチマークとともに示されていた。

基準4. 開発の実現性があり、実現されたときの社会的・産業的インパクトが見込まれるか。

TMR素子の高性能化により、TMR磁気センサは今後広い応用に使われていくと思われるが、本課題で挑戦する超高磁場感度のTMRセンサならびに低磁場NMR装置は、それとはまったく異なるレベルの困難な挑戦である。そのため、現時点では、その実現性は決して高いとは言えないというのが大方の見方であると思われる。しかしながら、非連続的な革新的デバイスの創出に挑むというS-イノベの精神にまさに合致した挑戦であり、その意味で実現可能性があるといえる。そして、TMR素子による心磁計・脳磁計が実現された時に、大きなインパクトが期待できることは、すでに4.3に記述したとおりである。

6. アドバイザーの構成について

表 1：アドバイザーの構成

氏名	現在の所属	役職	任期
小野 輝男	京都大学 化学研究所	教授	平成 23 年 11 月～現在
川端 清司	ルネサスエレクトロニクス株式会社	主任技師	平成 23 年 11 月～現在
小柳 剛	山口大学 大学院創成科学研究科	教授	平成 23 年 11 月～現在
城石 芳博	株式会社日立製作所 研究開発グループ	チーフアーキテクト・技術顧問	平成 23 年 11 月～現在
高梨 弘毅	東北大学 金属材料研究所	所長／教授	平成 23 年 11 月～現在
田口 隆志	株式会社デンソー 技術企画部	担当次長	平成 23 年 11 月～現在
田中 雅明	東京大学 大学院工学系研究科	教授	平成 23 年 11 月～現在

本研究開発テーマは、スピントロニクス・スピン流にかかわる高度な学理を利用して、大きな社会的・産業的なインパクトを持つ革新的なデバイスを生み出すことを狙っている。この観点から、産業界と学术界からバランスよく人選しアドバイザーに登用した。特にアドバイザーの最初の大きな任務は、提案課題の採択審査にかかわる PO の補佐役であり、スピン流の多様性を反映して多様な内容の提案が出てくることが想定されたため、専門分野の多様性にも配慮して人選を行った。

学术界からの小野アドバイザー、高梨アドバイザー、田中アドバイザーは、いずれもスピントロニクス・スピン流の研究分野において世界的に高名な研究者であり、スピントロニクス・スピン流全般にかかわる学理に関わるアドバイスをいただいている。

同じく学术界の小柳アドバイザーは、熱電変換に関する研究で知られるとともに、以前は半導体スピントロニクスに関する高度な研究でも知られていた研究者であるため、スピン流にかかわる多様な課題に対するアドバイスをいただいている。

産業界からの川端アドバイザーは MRAM 開発に従事した経歴を有しており、情報記憶デバイス関連の知見と経験からのアドバイスをいただいている。

同じく産業界からの城石アドバイザーは、磁気ハードディスク基盤技術にかかわる NEDO プロジェクトのプロジェクトリーダーも務めた磁気記録技術の専門家であり、技術からビジネスまでの広い視野によるアドバイスをいただいている。特に、ステージ II の最終年度においては、「3次元磁気記録」課題の進捗状況の把握と対策に関して、PO とともに多くの議論に参加していただき、大変に有益なアドバイスをいただいた。

同じく産業界からの田口アドバイザーは、熱電変換技術を中心とした広い範囲の材料の応用・実用化に従事してきた。ビジネスならびにスピン流の専門家とは異なる観点からのアドバイスをいただいている。

毎回のテーマ推進会議やサイトビジットでは、このような多様なバックグラウンドを持つアドバイザーから、異なる観点からの大変有益なアドバイスを得られている。PO のテーマ運営にとって、力強い拠り所となっている。

7. 研究開発テーマのマネジメントについて

7.1 PO の運営方針について

各研究開発課題が目指すべきものは、最終的に社会的・産業的にインパクトのあるデバイスの実現につなげることであり、この観点から目標やマイルストーンを常に見直すことが必要であるとの方針のもとに運営を行っている。特にステージⅡにおいて実現可能性を明確に示す技術的エビデンスを得ることが重要であると考えていたため、ステージⅡにおいて最適の開発課題設定と開発体制が取れるための準備期間としてステージⅠを位置づけ、ステージⅠ実施期間中にステージⅡの目標設定や体制の修正を行い、ステージⅡに移行した。ステージⅡにおいては、上記の目的のために、各課題の進捗状況を常に把握する努力を継続し、臨機応変に体制・目標の変更と課題間協力の推進を図った。

7.2 研究開発テーマの進捗状況の把握と計画の見直し

平成 23 年度の本研究開発テーマ発足から、平成 30 年 9 月までに、以下の活動を通して、研究開発課題の進捗状況の把握と、研究開発テーマ内の情報共有を行った。

アドバイザーを含む研究開発テーマ参画メンバー全員の参加による議論の場として、キックオフミーティング 1 回、テーマ推進会議 5 回、ブレインストーミング合宿 2 回、研究開発課題中間評価会 2 回を行った。

研究開発課題ごとの進捗状況把握のために、アドバイザーとともに研究現場を訪問するサイトビジットを、各 4 回実施した。

これに加えて、PO のみが必要に応じて各研究開発課題の進捗状況を把握し、研究開発方針を議論する機会を設けた。研究開発課題「3次元磁気記録」に対しては、ステージⅠ前期とステージⅡ後期を中心に 17 回、研究開発課題「心・脳磁計」に対してステージⅠ初期を中心に 5 回行った。

研究開発課題「3次元磁気記録」の研究体制に対しては、公募採択の折に、磁気記録媒体およびその書き込み機構に関する学術的専門家の追加が望ましいとの指摘事項を伝え対応を要請した。その結果、平成 24 年度から、東北大学多元物質科学研究所の専門家の参加を得ることになった。磁気記録媒体の評価ならびに、マイクロ波アシスト磁気記録技術に関して世界的に注目をあつめている研究者の参画により、研究体制が強化された。またステージⅡにおいては、3次元磁気記録技術のシステムとしての可能性を明確にする必要性を指摘し、対応を求めた。その結果、平成 27 年度にグラニュー媒体の磁気記録シミュレーションに関する東北大学の専門家を、平成 29 年度には信号処理技術に関する愛媛大学の専門家を加えることとなり、研究体制を万全のものとした。なお、キャノンアネルバ(株)は、分担項目である STO 素子の性能向上においてステージⅡの数値目標を産業技術総合研究所と共同してステージⅠにおいて達成したため、より研究の効率化を図るために、ステージⅡからは分担メンバーとしては外れ、STO 素子の開発は産業技術総合研究所に集中するとともに、3次元磁気記録の実証実験のための磁性多層膜媒体は東芝からのキャノンアネルバへの外注で対応することとした。

研究開発課題「3次元磁気記録」の研究開発方針に関しては、その研究進捗状況ならびに

平成 26 年度に行われたテーマ中間評価における指摘事項を勘案し、まずは 2 層記録での 3 次元磁気記録の実現可能性を実証することに重点を置くように指導を行い、平成 26 年 11 月にステージ II 目標を改訂させた。さらに、ステージ II の最終年度である平成 29 年には、ステージ II 目標の達成度を踏まえて、ステージ III 終了までに 3 次元磁気記録技術の実現可能性を明確に示すための方策を集中的に議論した。この議論には PO に加えて、磁気記録の専門家のアドバイザーも加わった。その結果、限られたリソースの条件下においても、3 次元磁気記録技術の実現可能性を明確に示すことを可能とするようにステージ III 目標の再改訂を行った。

研究開発課題「心・脳磁計」は、ステージ I 開始に設定した各ステージ目標にそって開発がおこなわれてきた。本開発で開発する磁気センサー用の高性能 TMR 素子を安定に供給することは、本開発成果の実用化のために必須であるとともに、車載センサーなどの実用化へも大きな波及効果を持つものである。そのための体制構築に関して、PM と議論を行いアドバイスを与えた。

両課題間の協力に関しては、PO の出身組織である産業技術総合研究所が持つ TMR 素子微細加工技術を、東北大学の TMR 素子アレーの高度化に資するための援助を行った。

7.3 次のステージへの移行のための評価基準（数値目標）、および、移行した根拠

(1) 研究開発課題：「3次元磁気記録新ストレージアーキテクチャのための技術開発」

ステージ I からステージ II への移行

平成 25 年 11 月 25 日にステージ II への移行の可否を判断するための課題中間評価を行った。

後に「8. 研究開発テーマとしての産業創出の核となる技術の確立に向けた状況」で記述するように、第 I ステージで得られた、多層（2 層）媒体の選択読み出し実証、スピントルク素子の出力向上・線幅低減、磁化反転におけるマイクロ波アシスト効果の確認などの個別要素技術に関する研究成果は、本課題目標の実現可能性を示す非常に高度なものであり、大きな進歩がなされたと高く評価された。また、これにより 3 次元磁気記録技術に対する関心を広く喚起しつつあることも評価された。さらに、アドバイザーなどとの議論を通じ、提案時には含まれていなかった媒体開発の必要性を感じるや、敏速に強力な新メンバーを加えた開発体制に変更したプロジェクトマネージャーのリーダーシップを高く評価した。

ステージ I の開発はステージ目標通りに進捗しており、ステージ II に移行するための必要十分な成果が得られていることから、ステージ II への移行が適当であると判断された。ステージ I の総合評価を A とした。

ステージ II からステージ III への移行の準備と中断

平成 29 年 10 月 31 日にステージ III への移行の可否を判断するための課題中間評価を行った。

ステージ I で実証された層選択情報読み出し技術に引き続き、ステージ II では層選択情報書き込み技術に進歩がみられた。反強磁性結合（AFC; Anti-Ferromagnetically Coupled）した垂直磁化グラニューラ膜におけるマイクロ波アシスト効果の確認、2 層 AFC 磁性ドットの選択的書き込み実証、磁界偏光制御による磁化反転制御と無磁界磁化反転の実証、磁界周波数変調による磁化反転アシスト効果増大の実証などが実現された。再生・記録用高性能スピントルク発振（STO; Spin Torque Oscillator）素子に関しては、駆動ベース周波数 10 GHz, 変調幅 10GHz, 再生出力 0.8mV などの特性が実現された。

これらの実験的実証を支えるために、3次元磁気記録に適用可能な大規模シミュレーション技術も開発された。シミュレーションからは、STO 素子の発振周波数を変化させることで各 AFC 記録層からの共鳴再生信号を良好な信号品質を持って選択的に読み出せること、2層積層 AFC グラニューラ媒体を用いて 1 平方インチ当たり 2 テラビット (2 Tbps) の磁気記録密度が可能で、3 層 AFC 媒体の層選択記録が可能で、3 次元磁気記録の可能性が、磁化反転メカニズムの解明を含めて、明らかになってきた事は評価される。

また 3 次元磁気記録システムの構築に不可欠な読み出し信号処理技術の専門家を招き入れ開発体制を強化した点においてプロジェクトマネージャーのリーダーシップも評価された。

一方で、当初目標としていたビットサイズ 35nm 程度の 2 層磁気記録の実証ができていないこと、並びに当初予定していた STO 用ヘッドテスターの入手が困難になり、スタティックテスターによる評価に変更せざるを得なかったことは、特に 3 次元磁気記録の可能性をシステムレベルで実証するという観点からは残念であった。そのため、いまだ磁気記録システムとしての可能性を明示するには至っていないと判断された。

以上のことから、ステージ II の開発は要素技術を中心として概ねステージ目標通りに進捗してはいるが、ステージ III 終了までに 3 次元磁気記録システムの可能性を強い説得力を持って提示するためには、研究開発計画を再検討・再定義した後に、ステージ III へ移行するのが適当であると結論された。ステージ II の総合評価は B とした。

課題中間評価の議論を受けて、実施者、PO、アドバイザーの参加による目標設定の議論が集中的に行われた結果、ステージ III 目標を改訂した。その結果、最終年度までに「3 次元磁気記録への展開指針を明確化する」という本研究課題の目的が達成される可能性は依然として高いと判断され、ステージ III への移行が許可された。

しかしながら、その後、実施企業の経営状況の大きな変化を理由に、実施者はステージ III への移行の辞退を申し出た。結果として 3 次元磁気記録の実用技術としての可能性が十分に示されないままに、本課題が終了するに至ったことは誠に残念である。

なお、実施企業は、当面は本研究課題の成果を活用して 2 次元マイクロ波アシスト磁気記録 (MAMR) の早期実用化に注力し、その製品化の実現後に 3 次元磁気記録技術の開発の要否を再度検討するとしている。

本課題の終了を受け、平成 30 年 3 月 28 日に事後評価を行った。

本課題の研究開発活動が、世界に先駆けて磁気記録の 3 次元化の可能性を示す高度な技術的シーズを蒔いた点は高く評価されたが、そのシステムサイドからの詰めを完了する予定であったステージ III の研究開発が行われなかったことから、課題の総合評価を C とした。

(2) 研究開発課題:「トンネル磁気抵抗素子を用いた心磁図および脳磁図と核磁気共鳴像の室温同時測定装置の開発」

ステージ I からステージ II への移行

平成 25 年 11 月 25 日にステージ II への移行の可否を判断するための課題中間評価を行った。

実用化を強く意識した非常にアグレッシブな開発が進められており、後に「8. 研究開発テーマとしての産業創出の核となる技術の確立に向けた状況」で記述するように、全体として計画以上の世界トップレベルの成果が得られていた。特に、川上 (材料・デバイス) から川下 (医学系) までの理想的な垂直連携体制が構築されており、これを、プロジェクトリーダーと開発リーダーの 2 名が密接に連携しながら指導していることは高く評価さ

れた。さらに、国内外の外部研究者との情報交換・収集も円滑に行われていた。

本課題に対する社会ニーズは、医学の専門家の視点から、その必要性の高まりが証明されているが、本課題で開発する超高感度磁場センサは、脳磁計ほどの感度を必要としない多くの応用分野にも有益なはずである。そのような新しい応用分野を探し出して、本課題の開発成果を適宜積極的に応用していくことも期待された。

ステージ II においては、開発状況に応じて各年度のベンチマークも設定しながら、実用化に向けた強力な開発が期待された。核磁気共鳴像の室温での測定技術に関しては、ステージ I で示された開発指針に基づき、明確な実験的実証を得ることが必要であるとされた。

ステージ I の開発はステージ目標を上回る成果を得ており、ステージ II で更なる進展が期待されることから、ステージ II への移行が適当であると判断された。ステージ I の総合評価を S とした。

ステージ II からステージ III への移行

平成 29 年 10 月 31 日にステージ III への移行の可否を判断するための課題中間評価を行った。

ステージ II 目標を成するとともに、室温におけるリアルタイム心磁信号検出の成功、 α 波起因の脳磁信号検出の成功など、世界初となる顕著な成果を複数得ていることは高く評価された。

PM が、PM の研究室に常駐する参加企業の研究者を含むデバイス系の開発メンバーに対して強いリーダーシップを発揮するとともに、医学部メンバーとの医工連携にも積極的なリーダーシップを発揮していることも高く評価された。また産業技術総合研究所（同研究開発テーマの別課題「3次元磁気記録新ストレージアーキテクチャのための技術開発」実施メンバー）の実験装置を用いた共同研究により、高感度なアレイ素子の実現のための鍵となる TMR 素子の微細加工技術を大きく進歩させたことも課題間協力の観点から評価された。

実施企業が TMR 磁気センサーが適用可能な心臓・脳疾患診断用途とその市場規模の推定を行い、事業展開へのビジョンを明確にしたことも評価された。

ステージ II までに得た成果をベースに、ステージ III では脳磁信号の検出に重点を置くとの方針が出され、それに沿って脳疾患種類ごとに必要となる検出可能磁場とそれを実現すべき時期が定量的に設定されていることも評価された。

以上のことから、ステージ目標を上回る成果を得ており、次ステージで更なる進展が期待されることから、ステージ III への移行が適当であると判断された。ステージ II の総合評価を S とした。

脳磁信号の検出に重点を置くこととしたステージ III であるが、多くの挑戦的課題が残っている。その解決のためには、物理学的な機構説明も含めた TMR 磁場センサー感度の究極化の追求、並びにアレイ素子の最適化によるシステム性能の向上加速が重要なポイントであるとともに、近年性能向上が著しい光ポンピングや NV センターを利用する競合技術とのベンチマーキングを十分考慮しながら開発を進める必要があることが指摘され

た。脳磁図との同時測定可能な核磁気共鳴図測定技術の開発は、特に難易度が高いため、その位置づけや開発体制の再検討も課題とされた。ステージ II において有効に機能した産業技術総合研究所との協力・情報交換関係の継続の必要性も指摘された。

7.4 課題内・課題間の連携の推進

各研究開発課題内の連携に関しては両課題とも十分に機能していると評価している。

研究開発課題間の連携については研究開発テーマ参画メンバー全員が集まる場での研究開発状況の報告や議論を通して、課題間連携を促進するように努力した。

研究開発課題「3次元磁気記録」の産業技術総合研究所と「心・脳磁計」の東北大学大学院工学研究科との間で、TMR素子の微細加工エッチングプロセスに関して有益な連携が行われた。東北大学大学院工学研究科は、磁場センサのノイズ低減のためにTMR素子のアレイを作製することを試みていたが、良好な結果を得ることができなかった。その原因として、エッチング装置のエッチングレートの分布の不良が疑われたため、試料を産業技術総合研究所に送り、類似のエッチング装置で問題が解決されるかどうかを調べた。その結果、良好な結果が得られたため問題の原因が判明した。これを受けて東北大学は平成25年度にアレイ素子形成用エッチング装置を導入した。さらにステージ II では情報共有のみならず、東北大学から産総研に研究員を派遣し、産総研の設備を用いてTMRセンサーの試作を行った。産総研の設備で作製したセンサーとの性能比較を行うことで、有益な情報が得られた。ステージ III においても引き続き連携をし、より微細なパターンを形成可能な産総研設備を利用することで、さらなるセンサーの高感度化が実現できると考えられる。

また、これとは別に研究開発課題「3次元磁気記録」の産業技術総合研究所と研究開発課題「心・脳磁計」の東北大学大学院工学研究科との間で、産業技術総合研究所で微細加工したTMR素子評価を、東北大学が有する高度な強磁性共鳴評価技術によって行い、産総研の微細加工プロセスの改善につなげた。

さらに、研究開発課題「心・脳磁計」で東北大学原子分子材料科学高等研究機構が分担している低磁場NMR装置の開発指針の設定に関しても、研究開発課題「3次元磁気記録」の産業技術総合研究所との連携が行われた。5. 研究開発課題の選考についてに記載したように、TMR素子を用いた低磁場NMR測定装置の開発は前例が全くない困難な開発課題である。そのため、スピントルクダイオードの発明などで世界的に名を知られ、スピンの高周波応答に高度な知見を持つ産業技術総合研究所の研究員が、研究開発の初期段階において、POとともに東北大学原子分子材料科学高等研究機構と3回の議論を行い、有益なアドバイスをを行った。

以上の例が示すように、課題内・課題間ともに連携は順調に行われている。

7.5 研究費の配分について

公募要領には「JSTは、1課題（1研究開発チーム）あたり年間最大7千万円程度（間接経費を含む）の研究開発費を支出します。」と記述されており、実際、ほぼ相当額の研究開発費が配分されてきた。しかしながら、7,000万円は、各課題の開発にとって決して十分な金額とは言えないのが実情である。そのため、一方の研究課題から他方の研究課題に傾斜配分

するなどの処置は現実的でなく、それぞれの課題にほぼ同額の予算配分を行ってきた。なお、平成 24 年度に 1,300 万円、平成 25 年度に 1 億 623 万円、平成 26 年度に 4,946 万円、平成 28 年度に 6,061 万円頂いた加速予算は、必要に応じた配分とした。

8. 研究開発テーマとしての産業創出の核となる技術の確立に向けた状況

8.1 研究開発課題：「3次元磁気記録新ストレージアーキテクチャのための技術開発」

(1) 前回テーマ中間評価（平成26年度実施）及び課題評価の結果を踏まえた研究開発テーマの設定目標に対する達成状況

本研究開発課題が実現を狙っている3次元磁気記録システムは、全く前例の無い斬新なものであるため、記録再生メカニズムの解明に基づく原理設計と、その実証に必要な記録再生用デバイスおよび多層磁気記録媒体の開発を、基礎的なレベルから統一的な観点で進める必要があった。

【ステージ I】

磁気共鳴現象を用いた再生原理の実証ならびに2層媒体を用いた共鳴再生の実証を主目的とし、以下の①から⑤をステージ I 目標として定め、その実現を目指した。

(ステージ I 目標)

- ① 周波数変調幅および発振出力が大きく、位相雑音の小さいスピントルク発振素子の開発
- ② 動作メカニズムの解明に基づいた新ストレージ開発指針の策定
- ③ 2層記録媒体とSTOを用いて選択的共鳴読出しの原理実証を行う
- ④ 高磁気異方性媒体材料の磁気共鳴の高精度な測定
- ⑤ マイクロ波アシスト磁化反転に関する基礎実験

ステージ I 終了時まで、ステージ I 目標は全て達成され、ステージ II への移行が可能となった。

【ステージ II】

3次元磁気記録技術の新ストレージシステムとしての可能性を明らかにするために、磁気共鳴現象を用いた層選択情報記録・再生技術の実証、ならびにそのための要素技術とシミュレーション技術の開発を行った。平成26年度に行われたテーマ中間評価における、「選択的磁化反転の確認」、「STO素子を用いた2層媒体の記録・再生の実証」、「システムアーキテクチャの構築」などの指摘事項を勘案し、以下の⑥から⑨をステージ II 目標として定め、その実現を目指した。

(ステージ II 目標)

- ⑥ 高空間分解能を有する再生・記録用高性能スピントルク発振素子の開発
駆動ベース周波数 10 GHz, 変調幅 5 GHz,
再生出力 0.1 mV, 記録用磁場出力 400 Oe
- ⑦ ステージ I で集積された実験結果に基づいた新ストレージ開発指針の精密化
- ⑧ ビットサイズ 35 nm 程度での2層記録媒体について外部磁場と

STOを用いて選択的共鳴読出し、および選択的共鳴書込みの原理実証を行う。

⑨ 3次元記録用媒体の選択記録原理実験を実現するためのモデリング

ステージII終了までに、要素技術に関しては、2層AFC媒体の選択的磁化反転の実証などの、極めて高度で先進的な成果が得られ、多くの特許出願、論文発表などにまとめられた。これらの成果は磁気記録の3次元化の可能性を示すものとして高く評価されるものであった。一方、ステージ目標⑧で狙っていたSTOを用いた微小ビットサイズでの多層磁気記録の実証が行われなかったことなど、システムレベルでの検討の遅れが見られた。

(2) 産業創出の核となる技術の確立に資する成果

以下に、各ステージ毎の主要な成果の概要を記す。

【ステージI】

磁気共鳴を用いた新再生原理を実証 (ステージ目標③)

現状の磁気記録システムでは、2次元磁気記録媒体の記録ビットを反映する磁化から空間に漏れ出す漏洩磁場を再生素子で検出することで情報の読み出しが行われている。しかし、この読み出し方法は、3次元磁気記録システムでは使用できない。漏洩磁場は積層された各磁気記録媒体からの磁場の重ねあわせとなるため、再生素子にかかる磁場は3次元記録された各ビット情報を反映しないからである。この問題を解決するため、各磁気記録層を反強磁性結合(AFC)した垂直磁化媒体で構成することで漏洩磁界を消すとともに、各記録層を識別しつつ各記録層における磁化の方向(情報)を共鳴周波数の違いから検出する原理実証を試みた。

反強磁性層を2層積層した磁性媒体を作製し、ネットワークアナライザーを用いた強磁性共鳴実験を行った結果、狙い通りに、周波数空間において、各層の強磁性共鳴に起因したディップが分離して観察された。これにより、強磁性共鳴を用いることにより層ごとの磁化方向を選択的に読み出すことが可能であることが実証された。

マイクロ波アシスト磁化反転の基礎検討により基本原理を解明 (ステージ目標⑤)

情報書き込み方式としては、書き込みのための磁化反転に必要な外部磁場をマイクロ波照射により変調することを想定している。そのためマイクロ波照射が記録ビットの磁化反転の挙動に及ぼす効果を解明することが必要となる。

50nmから230nmの直径を持つCo/Ptナノドットのアレイを用いてマイクロ波アシスト磁化反転の実証を行った。明瞭なアシスト効果が観測されるとともに、ドット径によってアシスト効果が大きく異なることを見出した。ランダウ=リフシッツ=ギルバート(LLG)シミュレーションにより実験結果を再現することにも成功し、これにより大きなアシスト効果の増大はスピン波の高次励起で説明できることが分かった。

さらに、現行磁気記録媒体である $\text{CoCrPt}\cdot\text{TiO}_2$ 垂直磁化グラニューラ膜を用いたマイクロ波アシスト磁化反転の実験も行った。その結果、グラニューラ膜においても明瞭なマイクロ波アシスト効果を確認できた。熱揺らぎを考慮した解析からは、ナノ秒スケールにおいては 50% に達する大きなアシスト効果が発現していることが明らかになった。これらの成果は、当初ステージ II で行うことを想定していた内容を含むものである。

垂直磁化を用いたスピントルク発振素子(STO)を開発し、STOの空間分解化が低い問題を解決する指針を確立 (ステージ目標①)

3次元磁気記録システムに用いられる STO 素子には、高発振出力、高 Q 値、高空間分解能など多くの条件を同時に満たすことが求められる。その実現に向けた検討を実験およびシミュレーションにより行った。

記録密度向上に求められる磁気ヘッドの空間分解能向上のために、STO 素子のサイズを小さくしていくと、Q 値が低く発振も不安定になることが知られていた。そこで、FeB 垂直磁化フリー層と FeCoB 面内磁化膜を組み合わせた新しいタイプのピラー型 STO 素子を開発した。微細加工により直径 120nm の STO 素子を作製し、その発振特性を評価した。その結果、発振周波数 6.7GHz において、発振出力 1.2 μW 、発振線幅 20 MHz、Q 値 330 が得られた。これらの値は、ピラー型 STO 素子としては、世界最高のものであり、ステージ I 実施当時に設定されていたステージ II の目標値（発振出力 1 μW 以上、発振線幅 20 MHz 以下）に相当する当初の想定を上回る成果である。

物理的アーキテクチャ構築のためのシミュレーション基盤を構築 (ステージ目標②)

3次元磁気記録システムに用いられる STO 素子の発振特性やそれが発生する磁場の強度分布、さらには STO 素子と磁気記録媒体の相互作用などについてはいまだ未解明な点が多い。これらを正確に予測・設計することのできるシミュレーション基盤の構築を行った。

STO 素子が発生する高周波磁場の評価のため、有限要素法・境界要素法を用いてマクスウェル方程式を解くことで反磁場を計算する手法を開発し、高速かつ高い時間空間分解能を有するシミュレーション技術の構築に成功した。素子中央部、表面から 20 nm はなれたところで、400 Oe 程度の磁界が発生することが分かった。

STO 素子と媒体間の相互作用特性の解明のために、3D マイクロマグネティックコードの開発を行った。ビット間干渉、共鳴励起の可否が考察可能な $\sim(0.5)^3 \mu\text{m}^3$ の空間サイズを対象に、50ns 間の磁化ダイナミクスを 20 fs 刻みで 1 週間以内に計算可能なシステムを構築した。

【ステージ II】

3次元磁気記録システムにおいては、各記録層からの漏れ磁場が他の記録層への書き込み・読み出しに影響を及ぼさないようにするために、各記録層を漏れ磁場を発生させない反強磁性結合 (AFC) 媒体で構成する必要がある。そのため最終的な技術目標は、積層

AFC 媒体の微小ビットを、STO を用いて読み書きする技術の実現である。

マイクロ波アシストによる磁気記録情報の書き込み・読み出しにおける層選択性の可能性を
実証 (ステージ目標⑦、⑧)

- (a) 2層 AFC 磁性ドットのマイクロ波アシストによる層選択磁化反転を実験で実証することに成功した。Co/Pt 系の磁気特性の異なる AFC 媒体を2層積層した試料をドット形状に加工したのち、コプレーナーウェーブ(CPW)伝送線路を用いてマイクロ波を照射し、異常ホール効果を用いて磁化反転をモニターした。ドット径 300 nm の試料において、マイクロ波周波数に依存して、2層の磁化を選択的に反転させることができることを実証した。ドット径 50nm の試料でも実験を試みたが、異常ホール効果信号が得られず中止した。(完了報告書 4-3-4)
- (b) 2層垂直磁化膜ナノドットのマイクロ波アシストによる層選択磁化反転を実験で実証することに成功した。Co/Pt 系の磁気特性の異なる 2層積層した試料を 200nm 径のドット形状に加工したのち、コプレーナーウェーブ(CPW)ガイドを用いてマイクロ波を照射し、TMR 効果を用いて磁化反転をモニターした。マイクロ波周波数を 10GHz と 20GHz の間で切り替えることにより、異なる記録層の磁化を選択的に反転させることができることを実証した。(完了報告書 4-3-3)
- (c) シミュレーションにより、STO 素子を用いた 3層 AFC 記録媒体の層選択記録が可能であることを示した。(完了報告書 4-4-2)
- (d) シミュレーションにより、2層 AFC グラニューラー記録媒体の層選択記録における記録ビットパターンの計算を行い、線記録密度 1693kfc_i (各層 1Tb_pi で 2層で 2Tb_ps)相当の 3次元磁気記録が可能であるとことを示した。(完了報告書 4-3-10)
- (e) シミュレーションにより、STO 素子を用いた 2層 AFC グラニューラー記録媒体の層選択読み出しの検討を行った。STO 素子の発振周波数を変えることにより層選択的に記録情報を読み出せること、および各層からの再生信号強度を同等にすることが可能であることを示せた。(完了報告書 4-2-4)

マイクロ波アシストによる磁気記録情報の書き込み・読み出し技術の進展 (ステージ目
標⑦、⑧、⑨)

- (a) STO 素子上に 55 nm x 45 nm サイズの Co/Pt 多層垂直磁化ドットを積層した素子構造を用いて、磁化反転に対する STO 素子からのマイクロ波磁界のアシスト効果を実験的に実証した。(完了報告書 4-3-5)
- (b) 現在の HDD で使用されているグラニューラー-CoCrPt を用いた垂直磁化 AFC グ

ラニューラ媒体においても、十分なマイクロ波アシスト磁化反転効果が期待できることを実験的に示した。さらに、シミュレーションにより垂直磁化 AFC グラニューラ媒体の磁気記録特性を調べ、1000kfc_i 以上の線記録密度領域では、単層媒体を上回る信号雑音比 (SNR) が期待できることを示した。これにより、マイクロ波アシスト磁気記録において、AFC 媒体を用いることは高記録密度領域において極めて効果的であることがわかった。(完了報告書 4-3-8、4-3-9)

- (c) STO 素子から発生するマイクロ波磁界の偏光状態が磁化反転に及ぼす影響をシミュレーションにより検討し、磁化反転がマイクロ波磁界の左右円偏光状態大きく依存すること、ならびに一般に必要とされるバイアス直流磁界を印加しなくても磁化反転を起こすことができることを見出した。これを受けて、直径 50nm の垂直磁化ドットを作製し、これに CPW 伝送線路を用いて偏光状態を制御したマイクロ波磁界を照射して、磁化反転の様子を調べた。その結果、左右円偏光マイクロ波磁界の照射により磁化方向を指定した磁化反転ができること、バイアス直流磁界なしでも磁化反転が可能であることを実験的に示すことに成功した。(完了報告書 4-4-1、4-4-4、4-4-5)
- (d) マイクロ波アシスト磁化反転において、照射するマイクロ波磁界の周波数を磁化反転過程に応じて変調することにより、磁化反転の効率を向上させることができることを、50nm 径の垂直磁化ドットと CPW 伝送線路を用いた実験により示した。(完了報告書 4-4-6)
- (e) STO 素子を用いた共鳴読み出し信号から、磁気記録情報を再生するための信号処理系を開発した。多数の磁気ドット上を通過する STO 素子からの共鳴信号振幅の変化を反映した再生波形モデルを信号処理シュミレータに実装し、STO 素子の振幅減衰包絡線におけるドット間干渉をパーシャルレスポンスチャンネルとみなして波形等分化するとともに、軟出力ビタビアルゴリズムによる最尤符号を適用することにより、良好なビット誤り率 (BER) が得られることがわかった。また、読み出しに STO 素子を 2 個用いることにより、ドット抜けの判定や、BER のさらなる改善が可能となることも分かった。(完了報告書 4-2-5)

マイクロ波アシスト用 STO 素子の高性能化 (ステージ目標⑥)

シミュレーションおよび実験を組み合わせた検討により、書き込み用 STO 素子と読み出し用 STO 素子の性能向上を図った。

書き込み用 STO 素子として、マイクロ波アシスト磁気記録に用いられている構造である面内磁化発振層と垂直磁化固定層の組み合わせからなる素子を検討した。直径 30nm の STO 素子において、バイアス電圧の変化とともに発振周波数が約 4 GHz から 14 GHz まで連続的に変化させることに成功した。またマイクロマグネティックスシミュレーションによってフリー層の発振ダイナミクスを調べることにより、フリー層の膜厚を 5 nm とした STO 素子を用いることにより、

距離 20 nm の地点において目標値の 400 Oe を超えるマイクロ波磁界が発生可能であることを示せた。

読み出し用 STO 素子としては、面内磁化固定層と垂直磁化発振層の組み合わせを検討した。直径 300 nm の STO 素子は 10 GHz 付近に鋭い発振ピークが観測され、発振出力は 1.5 マイクロワットが得られた。このことから 30 nm 径の再生素子では、発振電圧は 0.8 mV と大きな値が得られることがわかった。（完了報告書 4-1-3）

以上のようにステージ II 終了までに、マイクロ波アシストによる 2 層記録媒体の選択的情報書き込み・読み出しが可能であることが実験的に実証されるとともに、シミュレーションにより少なくとも 3 層までの拡張が可能であることが示された。これらの成果は、3 次元磁気記録という全く新しい磁気記録システムの可能性を示したものとして高く評価される。また磁気共鳴を利用する磁化反転の機構解明を推し進めるとともに、その知見を用いて無バイアス磁場下で磁化反転を可能とする新方式を提唱・実証したことや、非常に性能の高い STO 素子の開発に成功したことなどに代表される各種要素技術にかかわる成果は、3 次元磁気記録ばかりでなく、現在実用化に向けた開発が熱を帯びてきている 2 次元のマイクロ波アシスト磁気記録技術にとっても、高い価値を持つものとして高く評価することができる。

一方で、「ビットサイズ 35 nm 程度での 2 層記録媒体について外部磁場と STO を用いて選択的共鳴読出し、および選択的共鳴書き込みの原理実証を行う」というステージ目標⑧が十分に実現されなかったことは大変残念である。未達成となった原因としては、課題自体の挑戦性の高さという内部的な要因とともに、本 3 次元磁気記録技術の母体である 2 次元マイクロ波アシスト磁気記録（MAMR）技術の立ち上がり、当初の想定に比べて遅れているという外部要因もあったと考えられる。

(3) 最終目標達成の可能性

(3-1) 競合優位性

近年、各種ストレージ、メモリ技術が急速に 3 次元化による高密度化と低コスト化を実現していく中で、磁気記録技術だけが 3 次元化の手がかりを掴めていないことは、大変憂慮すべき状況である。この観点から、磁気記録の 3 次元化という本課題の狙いは非常に重要な意義を有しているが、同時に、磁気記録技術にとっては全く前例の無い挑戦である。

この挑戦を意味あるものに行っているのは、最近のスピン트로ニクス・スピン流から出現した STO 素子が可能としつつあるマイクロ波アシスト磁気記録技術である。しかしマイクロ波アシスト磁気記録技術であっても、2 次元磁気記録の枠内にとどまれば、到達可能な記録密度はせいぜい 2 Tb/inch²程度に限定される。マイクロ波アシスト磁気記録技術をベースとした 3 次元化技術が実現されれば、より高密度の磁気記録技術が可能となるはずである。すでに本課題において行われてきた検討により、現時点においてもグラニューラ媒体を用いた場合で 1 層あたり 1 Tbps 以上の磁気記録密度の達成可能性が示されており、将来これをビットバターン媒体に適用した場合はシステムとして 10Tbps の磁気記録密度も期待できる

はずである。このような高い記録密度の可能性につながる、競合技術は見当たらない。

フラッシュメモリを用いた SSD は、急速にその記憶容量を増しビットコストを低下させ、モバイル機器の代表的なストレージ装置となっているが、ビットごとに微細加工が必要という原理的制約のため、微細加工要件がゆるい大面積の磁気記録媒体を少数の磁気ヘッドで記録再生する磁気記録のビットコストには原理的に対抗できない。SSD は磁気記録の競合技術ではなく、お互いに補完することで、ストレージシステムを高度化するものである。フラッシュメモリのほかにも、多様な不揮発性半導体メモリが研究されているが、ビットコストの面でいずれもフラッシュと同じ問題を抱えている。

なお、本研究開発課題で開発する要素技術は、現在その立ち上がりが遅れているとされる 2 次元マイクロ波アシスト磁気記録技術の進展にも寄与しうるものであり、その面でも本研究開発課題の存在感を示していく必要がある。

(3-2) 市場性

インターネットの普及や高度 IT 化、デジタル機器の普及などにより、情報量の急激で大幅な増加は、この先十年を予測しても計り知れないものがある。膨大な情報量を記録するには、相応の情報機器が必要となり、そこには巨大な 10 兆円規模の市場ニーズが待ち受けている。しかし、現状のストレージ群では、今後の技術進展を加味しても、この膨大なニーズに応えることは不可能であると考えられる。そのため、供給ビット量を劇的に増加できる革新的なストレージ技術が切望されている。この要求に応えるための技術が本提案の「3 次元磁気記録システム」である。さらに、本アプリケーションは、サーバ・ストレージの消費するエネルギー問題を解決する可能性も秘めている。10 テラビット/平方インチを超えることができれば、現行のハードディスクの 10~20 台分を一台で置き代えることができる。現状、サーバ・ストレージの消費電力を抜本的に低減する方法としては、他に解がない。

このように、本提案である「3 次元磁気記録システム」を確立し、革新的ストレージの創出を目指すことは、ストレージにおける科学・経済分野での国際的な主導権確保に繋がる。

現在、ハードディスクメーカーは東芝、Western Digital、Seagate の 3 社に絞られてきており、製造に非常に高度なすり合わせ技術を要するため新規に参入しようとする企業は見当たらない。東芝以外の 2 社は要素部品を内製している垂直統合メーカーであるが、収益率の高い磁気ヘッド、媒体、小型モーターなどの部品や製造装置などは日本企業がシェアを大きく占めている。一方で信号処理や制御用の LSI は米国企業がほぼ独占しており、蓄積とノウハウを要するため参入障壁は高い。本提案の「3 次元磁気記録システム」によるストレージデバイスが主流になれば、システム及び部品、製造装置、評価装置などのシェア拡大に繋がり、日本メーカーへの波及効果は極めて大きい。

(3-3) 企業戦略適合性

東芝は 3 社で寡占化している世界のハードディスク事業の一角を占める企業であり、モバイル市場・クラウド市場の拡大に応じて、磁気記録関連事業は今後もその重要性を増していく。さらにストレージ製品群で特徴的な製品を持つことでデータセンターやクラウドソリューション事業への波及効果も期待されている。

ハードディスクドライブ事業に関しては、東芝は部品を内製していないドライブメーカー

であるため、ヘッド、媒体の実用化開発には部品メーカーとの共同開発が不可欠であると考えている。ドライブおよび部品の両面から本提案のシステムで他社製品との差異化を図りシェア拡大に寄与することが期待されている。

(4) 懸案事項・問題点

極めて挑戦的な開発課題であるため、乗り越えるべき技術課題が多くあることは、すでに課題採択の時点で認識されていた。実際に、開発を進める中でさまざまな困難に立ち向かい、それを乗り越えるとともに、臨機応変に研究開発目標と開発体制の再定義を行ってきた。

ステージ II の最終年度の時点において、到達状況を精査した結果、「3次元磁気記録への展開指針を明確化する」という本研究課題の目的が達成される可能性は依然として高いと判断され、それに応じたステージ III 目標が再定義されることでステージ III への移行が予定されていた。しかしその後、実施企業の経営状況の大きな変化を理由にステージ III への移行が行われなかったことは大変残念である。実施企業は、当面マイクロ波アシスト磁気記録

(MAMR) の早期実用化に集中するとのことであり、そのなかで本課題が生み出した多くの高度な要素技術が活用されていくことを期待したい。

また学会レベルでは、本課題が提唱した 3 次元磁気記録方式に対する期待は依然として高い。近い将来、本課題の成果をベースに、再び磁気記録の 3 次元化への挑戦が行われることを期待したい。

8.2 研究開発課題:「トンネル磁気抵抗素子を用いた心磁図および脳磁図と核磁気共鳴像の室温同時測定装置の開発」

(1) 前回テーマ中間評価(平成 26 年度実施)及び課題評価の結果を踏まえた研究開発テーマの設定目標に対する達成状況

本研究開発課題が実現を狙っている TMR 素子による磁場検出感度は、磁性体を利用した一般の磁場センサの感度をはるかに越えるものであるため、材料、デバイス構造、信号検出方式からその医学的有効性の確認まで、基礎的なレベルから統一的な観点で研究開発を進める必要がある。

【ステージ I】

TMR 素子の磁場感度の増大と、TMR 素子のアレイ化によるノイズ低減、核磁気共鳴装置の仕様の明確化を主目的として、以下の①から⑥をステージ I 目標として定め、その実現を目指した。

(ステージ I 目標)

- ① 高磁場感度を示す素子の開発
磁界感度の向上の指針
- ② アレイ状素子の作製とノイズ評価
数 100 個の TMR アレーを数 mm^2 の面積に集積

歩留まり > 9 割

- ③ 核磁気共鳴装置の開発
原理の構築と原理の実証
- ④ 微小磁気信号の増幅回路の試作
数 10nV オーダーの差動増幅
多チャンネル化の回路構成の構築
- ⑤ 微小磁気センサーのモジュール化
10mm φ 以下のモジュールの概念構築と設計・試作
- ⑥ 微小磁気センサーの臨床評価の準備
医療機器用センサーとしての問題点の整理

全ての項目において当初の目標を達成し、一部はステージ II で予定していた内容も実現したことから、ステージ II への移行が可能となった。

【ステージ II】

TMR 素子の特性向上とそのアレイ化によるノイズ低減を進めることで、実際に生体磁気情報が検出可能であることを示すこと、ならびに TMR 素子を用いた超低磁場 NMR 信号検出の可能性を実証することを主目的として、以下の⑦から⑪をステージ II 目標として定め、その実現を目指した。

(ステージ II 目標)

- ⑦ 高磁界感度を示す素子の開発
100%/Oe 以上の高磁界感度
- ⑧ アレイ状素子の作製とノイズ評価
数百個のアレイを数 mm² の面積内にほぼ 100% の歩留まりで作製
100Hz におけるノイズパワー < 10⁻¹⁸V²/Hz
信頼性の確認
- ⑨ 核磁気共鳴装置の開発
MRI 測定要素技術の確立
脳磁場測定と同時測定が可能となる測定方法の確立
- ⑩ 微小磁気センサーのモジュール化
10mm φ 以下のモジュール作製。
心・脳磁場測定用装着ユニットの作製と、モジュールの高密度実装
磁場分布の測定
- ⑪ 微小磁気センサーの臨床評価
実際の臨床における特殊な環境下における問題点の抽出

全ての項目において当初の目標を達成するとともに、室温におけるリアルタイム心磁信号検出の成功、α波起因の脳磁信号検出の成功など、世界初となる顕著な成果を複数得ていることは高く評価され、ステージ III への移行が可能となった。

(2) 産業創出の核となる技術の確立に資する成果

以下に、各ステージ毎の主要な成果の概要を記す。

【ステージ I】

アモルファス電極を用いた TMR 素子において、40 %/Oe の磁場感度を達成 (ステージ目標①)

誘発脳磁場を測定可能にするために、SQUID センサは、頭皮からの距離を考慮して、およそ 50 fT の磁場を検出している。一方で、開発する TMR 磁場センサは、頭皮密着型であることから、それよりも 5~6 倍程度大きい、0.3 pT 程度の磁場が検出できれば、SQUID 脳磁計と同等の計測が可能になると考えられる。磁場検出センサの性能指標は、磁場感度 = TMR 比 / $2H_k$ (H_k : 異方性磁場) が用いられる。0.1 pT の磁場検出感度を得るためには、測定電圧 1 V、検出電圧 1nV として、磁場感度で 100 %/Oe 以上の値が必要である。これに対して、現在、量産されている TMR 磁場センサの磁場感度は 1 %/Oe 以下である。したがって TMR 磁場センサで 100%/Oe の極めて高い磁場感度が原理的に得られるかどうかの見極めがまず必要となる。TMR 素子を構成する磁性薄膜などのスタック構造、形状、熱処理条件などの最適化を行い、アモルファス強磁性電極を用いた TMR 素子において、世界最高の感度である 40%/Oe を達成し、最終目標である 100%/Oe の達成見通しが得られた。また、100%/Oe を超える感度達成のために、ホイスラー合金系の検討を先行実施し、磁気異方性低減の指針が得られた。

アレイ状 TMR 素子を作成し、100pT 程度の微小磁場の検出に成功 (ステージ目標②)

脳磁場に対して十分な S/N 比を得るために、 100×100 個の TMR 素子アレイを、数 mm^2 の面積内に作製することを計画している。そのために、TMR 素子を基板内で歩留まり良く作製するためのプロセス確立が必須であり、ステージ I では、9 割以上の歩留まりを目標とした。アレイ素子形成用層間絶縁膜作製装置の導入により、目標であった 9 割以上の歩留まりを達成した。また、アレイ化によるノイズ低減効果を実証、さらに MgO 層の最適化により S/N 比が改善することが分かった。これらより、心臓磁場 (~ 100 pT) 検出が見えてきた。

約 10mm 角のスティック状磁気センサモジュールを実現 (ステージ目標④、⑤)

現行の SQUID 脳磁計では素子のサイズが十数 mm ϕ あり、信号源を推定するために約 300 の素子を必要としている本研究開発課題では 1 素子を 10mm ϕ 以下のモジュールにすることにより、高い空間分解能を目指す。ステージ I においては、モジュールの基本的概念構築と具体的なモジュールの設計試作を行った。Wheatstone ブリッジ回路を用いた差動増幅と計装アンプによって信号を十数万倍に増幅しつつ、20nV@10Hz という極めて低いフロアノイズを実現した。さらに「素子」-「ブリッ

ジ」－「ヘッドアンプ (60dB)」を一体化し、「セカンドアンプ (40dB) とバンドパスフィルタ」のブロックも含む、断面が 10mm 角のスティック状の TMR センサモジュールの試作を行った。ノイズによる回路特性への悪影響が生じないことが確認できた。

核磁気共鳴装置の仕様検討により、TMR 素子方式の可能性の明確化 (ステージ目標③)

核磁気共鳴 (NMR) 装置を用いることで行われる器官の位置情報である磁気共鳴図 (MRI) の測定は、臨床上の要請から、心磁場、脳磁場測定のユニットと同一のものを用いて行われることが望ましい。ステージ I では、TMR 素子磁場センサを用いて体表から 2~3 cm の深度を 10mm 未満の分解能で空間分解可能な NMR 装置の仕様の明確化を目標とした。

本研究開発テーマ内および外部識者との議論ならびにシミュレーションの実行により、NMR 検出方式としては 30 (地磁気) ~1000 μ T の磁場を用いる超低磁場方式とすることにした。さらに、TMR 素子を 100 x 100 のアレイ化した素子を用いて、NMR 信号の検出可能性を検討し、プロトン NMR 信号の検出に求められる感度があることを明らかにした。これにより、TMR 素子を用いた MRI 測定の可能性が明らかになった。

【ステージ II】

加算平均なしでの心臓磁場の検出、ならびに α 波起因の脳磁場の検出に成功した (ステージ目標⑩、⑪)

心磁図計測においては、専用の磁気シールド室内において計測を行い、同時計測の心電図波形 R 波の頂点潜時をトリガとして平均加算を行うことによって、心磁図波形を計測することができた。さらに被験者を磁気シールド室の外に出しての計測でも、平均加算によって心磁図波形を記録することができた。さらに、従来に比べて、1 桁以上感度が向上した TMR センサーモジュールでは、平均加算を行わない条件下でも心磁図波形が計測できた (ステージ II 成果報告書⑩-2、⑪-2-1、⑪-2-2)。

脳磁図計測においては、脳波を同時計測しつつ、10 秒ごとの開閉眼タスクを与えることによって、閉眼時に出現しやすい脳の基礎波 (アルファ波) を計測した。脳波上のアルファ波の頂点をトリガとして、数万個のアルファ波を平均加算できるアルゴリズムを開発した結果、TMR 素子による脳磁場信号の検出に世界で初めて成功した (ステージ II 成果報告書⑪-2-3)。

世界最高の磁場感度を持つトンネル磁気抵抗素子の作製に成功した (ステージ目標⑦)

- (a) アモルファス CoFeSiB 材料を用いた TMR 素子の最適化を行い、世界最高感度である 115%/Oe の性能を得ることに成功した。この単素子による磁界検出感度は 20 nT と非常に小さい (ステージ II 成果報告書⑦-2-1)。

- (b) さらなる高感度の TMR 素子の可能性を探るため、ハーフメタルホイスラー合金、量子井戸共鳴トンネル効果、磁気渦構造、超常磁性などの検討を並行して進めた（ステージ II 成果報告書⑦-2-2、⑦-2-3、⑦-2-4、⑦-2-5）。
- (c) 等価的な磁場感度を飛躍的に向上させる可能性があるフラックスコンセントレータ(Magnetic flux concentrator : MFC)の利用の検討を開始し、利用可能性が高いことがわかった（ステージ II 成果報告書⑦-2-6）。

ノイズ電圧 10^{-18} V²/Hz (@ 100 Hz)を下回る低ノイズアレイ素子の作製に成功した(ステージ目標⑧)

1 インチ角基板及び 3 インチφ基板でのアレイ素子作製プロセスを確立し、7mm 角の面積内に 10,000 個の TMR 素子を集積化したアレイ素子を実現した。これにより、当初目標としていたノイズ電圧 10^{-18} V²/Hz (@ 100 Hz)を下回る低ノイズアレイ素子の作製に成功した。これは、低周波数領域において世界最高の性能である。（ステージ II 成果報告書⑧-2）。

TMR 素子を用いることで、プロトン核磁気共鳴信号の検出に成功した(ステージ目標⑨)

心磁場、脳磁場と同一センサモジュールを用いて、核磁気共鳴(NMR)信号を測定するための装置を製作した。TMR センサモジュールの性能改善および NMR 検出用の低ノイズ回路の開発により、プロトン（水）の地磁気程度の微小磁場下での NMR-FID（自由減衰振動）信号の検出を試みた。その結果、世界で初めて TMR センサによる NMR 信号の検出に成功した。このことにより、心磁場、脳磁場と同一装置で MRI 測定が可能となる見通しが得られた（ステージ II 成果報告書⑨-2）。

(3) 最終目標達成の可能性

(3-1) 競合優位性

本研究開発課題で開発する磁場センサは、超高感度ながら小型で低コストなものであり、これにより診断・診療に有益な心磁図・脳磁図の室温測定を可能にするものである。磁場検出感度の飛躍的な向上に挑戦する手がかりは、最近の室温 TMR 効果の増大である。

心臓や脳の機能を非侵襲的にモニターするために、心電図や脳波などの生体電圧計測が広く用いられている。しかし、胸部や頭部を構成する組織の導電率が不均一であるため、体表面の電位分布から生体内部の信号源を推定するための空間的精度は低いという問題があった。これを克服するために開発されたのが心磁図と脳磁図である。導電率不均一性による磁場分布の歪みは電圧におけるそれに比べると無視できる程に小さい。このため、心磁図や脳磁図における生体電気活動の位置推定精度は、心電図・脳波に比べると理論的にはきわめて高い。

表 2 は、現在多く用いられている磁気センサの性能比較である。安価であるか高磁場検出感度であるかの二者択一に近い状況であることがわかる。すなわち、現状では超伝導量子干渉素子 (SQUID) しか、心磁計・脳磁計に利用されておらず、しかも限られた一部の施設にしか普及していない。SQUID を冷却するための液体ヘリウムの費用が高価であることと、

複数の電流源を分離する能力が理論的に期待されるレベルに達していないことがその理由である。脳磁計の空間分解能を向上できない理由としては、液体ヘリウム容器の形状が固定されていて患者の頭部の個人差に対応できないことと、液体ヘリウム容器の壁の厚さが限界となってセンサを生体面に密着できないことが挙げられる。更に素子の大きさは、有意なダイポール情報を損失なく測定できる空間分解能の要請から 15mm 程度となり、頭部を脱着可能なヘルメット型にした場合、多くとも 200 素子が限度である。

光ポンピング磁力計は、原理的には SQUID センサより感度面で優れており、かつ室温での作動も可能である。最近急速にその性能を高めているが、TMR 素子磁場センサは臨床応用にとって大きなメリットであるコスト面、簡易性、高集積化の点で優位である。また光ポンピング磁力計は磁場の絶対値を捉えるため、地磁気などの周辺磁場の影響を大きく受け、高性能な磁気シールドルームが必要、ベッドに寝た時の沈み込みなどにより乱れるなどの問題も抱えている

心磁計応用には MI センサ、フラックスゲートなども利用可能であるが、更なる感度向上にはセンサのボリュームを上げていくしか手がなく、SQUID 脳磁計より高密度に配置できないデメリットがあり、これらの解決手段は提案されていない。

表 2：磁気センサとして用いられる原理の性能比較

	感度 nT/V	ノイズ (@1Hz) pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$	ダイミットング mT	消費電力	コスト
ホール素子	30000	100000	0.01	○	○
フラックスゲート	3000	1	0.001	△	△
MI	10000	10	1	△	△
SQUID	1	0.01	0.000005	×	×
光ポンピング	0.1	0.0001	0.00001	△	×
NV センタ	(0.1)	0.01	0.001	△	×
TMR	30000	30	500	○	○

(3-2) 市場性

超高感度磁気センサーの市場として、まずは心磁計・脳磁計などの医療応用分野、そしてその先にはニューロマーケティングなどの非医療分野が考えられる。国内市場規模としては、医療応用分野で800億円程度、非医療分野で4000億円程度が期待される。米国市場の規模は、国内市場のその3～4倍となるはずである。医療機器の認証プロセスを考えるならば、まずは医療のための研究機器としての参入から開始することが適当である。TMR センサの適用が、非接触での心臓磁界測定技術を利用した製品や、てんかん・アルツハイマー病・うつ病の診断等に拡大すれば、より大きな市場を作り出すことができる。さらに、素子の簡易化によりパーソナルユースの市場が開けると、高齢化社会においてそのニーズはさらにふくれ上がると予想される。TMR センサで目標の仕様を達成できれば、参入障壁の高い市場を獲得することができる。

(3-3) 企業戦略適合性

TMR センサ開発のロードマップの中で、センサ性能の向上に応じた市場が存在しており、継続的な収益が期待できる。また、コニカミノルタの、高度な生体計測用微弱信号処理技術や画像処理技術などとの融合が期待できる。

(4) 懸案事項・問題点

極めて挑戦的な開発課題であるため、乗り越えるべき技術課題が多くあることは、すでに課題採択時に認識されており、現在はその課題解決に向けた研究開発が着実に進められている。現在、光ポンピング等の競合技術も急速な進歩を示しており、常にベンチマーキングを行うとともに、TMR 素子方式の優位性を示していく必要がある。

9. 総合所見

9.1 研究開発テーマとしての産業創出の核となる技術の確立に向けた状況

「3次元磁気記録」課題は磁気記録の3次元化という、従来まったく想定されてこなかった極めて挑戦的な研究開発課題である。その開発が成功し、目的とするデバイスが実用化された場合の、社会的・産業的インパクトは非常に大きいと、一方で、あまりの挑戦性の高さのために、その実現性がその実現性は決して高いとは言えないというのが大方の見方であった。これに対して、ステージⅠでは2層の選択的情報読み出しの実験的実証に成功し、ステージⅡでは更に2層の選択的情報書き込みの実験的実証にも成功したことは高く評価される。しかしながら、3次元磁気記録技術の実用化のためには、ステージⅢ終了までに4層の選択的情報書き込み・読み出しの可能性を明確に示すことが必要であった。そのためには、個別要素技術ばかりでなく、信号処理をも含む磁気記録システムとしての可能性を示すことが必要であるが、その面ではステージⅡ終了までの開発には遅れが出ていた。この遅れを挽回するために、集中的な議論を経て、ステージⅢ移行後に実施すべき目標の改訂案が定まり、ステージⅢ終了までには当初の目標を達成することが期待された。しかし、その後、実施企業の経営状況の大きな変化を理由に、ステージⅢへの移行は中止となった。結果として3次元磁気記録の実用技術としての可能性が十分に示されないままに、本課題が終了するに至ったことは誠に残念である。

「心・脳磁計」課題も TMR 素子を用いた心・脳磁計という、従来まったく想定されてこなかった極めて挑戦的な研究開発課題である。その開発が成功し、目的とするデバイスが実用化された場合の、社会的・産業的インパクトは非常に大きいと、一方で、あまりの挑戦性の高さのために、その実現性がその実現性は決して高いとは言えないというのが大方の見方であった。これに対して、ステージⅡまでに、心磁場のリアルタイム計測と脳磁場の検出に成功するなど、世界最高・世界初の高度な成果を複数実現してきたことは高く評価される。POとしてその順調な発進に満足している。ただし、最終目標の実現の可否は、さらなるノイズ低減と検出感度の向上の如何にかかっている。また脳磁場計測を目指す各種の競合技術も急速な進歩を示している。ステージⅢでは実用化のための産学協力体制の更なる強化なども行うことで、ぜひとも実用技術としての成功に結び付けたい。

前回のテーマ中間評価会で指摘のあった特許出願に関しては、ステージⅡでは両課題とも出願件数が大幅に増えた。また論文発表、学会発表の件数も大幅に増えたことは、両課題の生み出した成果の価値の高さと、それに対する関心の大きさを表している。

9.2 研究開発テーマのマネジメントについて

研究開発課題の選考に当たっては、スピン流の学理面において最先端かつ極めて挑戦的であることを求めるばかりでなく、目的とするデバイスが実現した際の産業的・社会的インパクトが大きなものであることを重視した。その結果、採択課題を2件に絞り込んだ。ステージⅡを終えた現時点で振り返ってみても、素晴らしい研究開発課題を的確に選択できたと思っている。産業界と学术界からお願いした強力なアドバイザー陣から、採択審査やテーマ推進会議、サイトビジットの折に触れ寄せられる多様でかつ厳しくも温かい意見は、POとしてのテーマ運営の力強い拠り所である。各研究開発課題の研究・開発リーダーは、毎月の研

究開発課題内ミーティングなどを通して、目的の実現に向けて大きな努力をされている。また2度にわたって行った研究開発テーマ全体のブレインストーミング合宿では、スピン流の基礎学理から、事業展開の考え方にいたる幅広い内容で活発な議論が行われ、テーマ内の情報共有が促進された。さらに、各課題に対するPOによるモニタリングと議論も臨機応変に行った。特に、「3次元磁気記録」課題は、個別要素技術だけではなく、幅広いシステム技術の開発も必要となる複雑な構造の課題であるため、その開発の実施にあたって多くの困難に直面することがあった。そのため、磁気記録の専門家であるアドバイザーの協力も得て、多くの個別議論を行った。これにより、ステージ目標の適切な改訂などが行われ、ステージIII終了までには最終目標が達成されることが期待される状態になったが、如何せん、POの力の及ばぬ外的要因もあり、「3次元磁気記録」課題をステージIIで終了せざるを得なかった。

9.3 本研究開発テーマを設定したことの意義

スピントロニクス・スピン流からは、これまでにハードディスク用磁気ヘッドと不揮発性磁気メモリMRAMという二つのデバイスが実用化されて、情報社会やエレクトロニクス産業に大きなインパクトを与えている。本研究開発テーマは、これら2つの実用化に続く、高インパクトな新しいデバイスの創出を目指している。「3次元磁気記録」と「心・脳磁計」は、この目的にとって、現時点で考えても、最も注視すべき実用的な開発課題であると考えている。これら2つの研究課題を見いだせたことで、本研究開発テーマを設定した意義は十分にあったと考えている。

「3次元磁気記録」課題は、ステージIIで終了という残念な形になったものの、磁気記録を3次元化するという旗を掲げて、その成果を世界に問うてきた意義は高いと考えている。すでに、NANDフラッシュメモリをはじめとして、HDDの競合ストレージ技術は3次元化の手法による高密度化を急速に深めている。ひとり磁気記録のみが、3次元化の端緒を掴めていない現在の状況は、磁気記録技術全体の危機であるといえる。実際、数年前に米国で行われたこの分野で最も権威の高い国際会議において、本課題からの成果発表に対する質疑の場で、米国の研究者から「我々もこの発表のような何らかの3次元化手法に挑戦しないと、HDD業界全体の将来展望が開けない」とのコメントがあったことは、印象深い。実際には、3次元磁気記録の実現のためには、その母体となる2次元マイクロ波アシスト磁気記録

(MAMR)技術が実用化される必要がある。現時点では、当初想定していたよりもMAMRの開発が大きく遅れている。本課題で達成してきた、マイクロ波アシスト磁化反転の学理から個別要素技術に至る多くの高度な成果は、そのままMAMRの開発にも資するものである。

9.4 今後への期待や展望

「3次元磁気記録」と「心・脳磁計」の両課題とも、極めて挑戦的でユニークな研究開発課題であり、本研究開発テーマでのみ開発が行われてきた。しかし、骨太の応用デバイスとなるためには、追従者やライバルの出現による切磋琢磨が欠かせない。いつまでもユニークであることは良いことではない。幸いにして、これまでの成果には多くの注目が集まっており、国際学会および国内学会から多くの招待講演依頼を受けてきた。実際、平成30年9月に行われた日本磁気学会第42回学術講演会においても、全部で7件行われたシンポジウムのうち、2件が、本テーマを構成する各課題の成果を中心とするものであった。

ステージ III では、「心・脳磁計」の一課題のみとなるが、その実用化の道筋をはっきりと示すことで、実際に有用な実用デバイスとしての認知を獲得して欲しい。また「3次元磁気記録」の狙いの正当性は、今後も広く学会レベルでは共有されていくはずであり、将来、MAMR 技術の実用化が実現した場合には、その後継技術として再浮上してくる可能性が十分にある。本研究開発で得てきた多くの成果が、活用されていくことになるであろう。

9.5 感想、その他

不揮発性磁気メモリ MRAM とそのコンピュータシステムへの応用を中心とするスピントロニクス技術に長年携わってきた私が、最初に JST から「スピン流」と題する本研究開発テーマの設定の可否について相談されたとき、スピン流はまさに基礎研究としてこれから大きく花開く時期を迎えつつあるものに、S-イノベのように実用化を強く意識した研究制度にとっては、いささか時期尚早ではないかと思ったのが、正直なところである。しかし、実際公募を行ってみた結果、とても挑戦的かつ骨太の両研究開発課題を得ることができたことに、いささかの驚きを感じたものである。現時点で振り返っても、最良の選択をしたと考えている。

一方で、両課題の挑戦性の高さからみて、実用化を強く意識するステージ III にまで進むことは、両課題とも多分難しいであろうというのが、ステージ I 開始時の時点の率直な思いであった。しかし、その後の真摯で活発な研究開発により、ステージ II 終了までに、両課題ともに高度な成果を輩出してきたのは、嬉しい誤算であった。これにより、「心・脳磁計」課題は実際にステージ III に移行し、もう一つの課題の「3次元磁気記録」も社会経済的な外的環境が通常のものであったならばステージ III に移行できたのではないかと思わせる状態となった。唯一の課題となってしまった「心・脳磁計」は、ぜひ有用な実用技術として成功させたい。