

「固体中へのスピン注入による
新機能創製」

平成12年11月～平成18年3月

研究代表者：鈴木 義茂

(大阪大学大学院基礎工学研究科、教授)

1 研究実施の概要

本チームに於いては電子の電荷のみならずスピンを利用した新たなエレクトロニクス
の確立を目指し固体へのスピン注入による新機能の創成の研究を鈴木・長濱グループ、
大谷グループ、宮崎グループの3グループ編成で遂行した。

①鈴木・長濱グループでは電子のコヒーレントなスピン依存伝導およびスピン注入トルク
の制御により新機能素子を創出することを目的として研究が行なわれた。まず、高度
な電子の伝導性を制御するために鉄およびコバルトの単結晶電極とするトンネル磁気
抵抗素子を世界で初めて作製し、電極を単結晶鉄の超薄膜とした素子においてトンネル
磁気抵抗効果の大きさがバイアス電圧に対して振動的に変化する「スピン依存量子サイ
ズ効果」を発見した。さらに、コバルト単結晶電極とアルミナバリア層の間に単結晶銅
スペーサー層を挿入することによりトンネル磁気抵抗効果が大きさがスペーサー層の
膜厚に対して振動する「スピン偏極共鳴トンネル効果」を発見した。この効果の発見に
より強磁性ベース層のスピン偏極量子準位を利用する共鳴トンネルスピントランジスタ
が原理的に実現可能であることを始めて示した。さらに層状反強磁性を示す単結晶クロ
ムを電極とした場合、トンネル磁気抵抗効果の大きさがクロム層の膜厚に対して2原
子層の周期で振動することを見出したが、クロムを電極としたトンネル素子ではトン
ネル磁気抵抗効果が電極表面の1原子層のスピン偏極の方向によって決められてい
ことを示すものである。以上の事実は、コバルトや鉄などの Δ_1 電子(電極表面に垂直な軸に
よる任意の角度の回転に対して不変な波動関数を持つ電子)を持つ電極では電極全体に
広がった Δ_1 電子がスピン依存伝導を担っていること、一方で、クロムのような Δ_1 電子
をフェルミエネルギー近傍に持たない電極では、電子が電極表面1原子層で散乱され
ることにより伝導が生じるためにスピン依存伝導性が表面1原子層に非常に敏感にな
っているものとして統一的に理解されることを示したもので、以上の一連の実験によりア
モルファスアルミナをバリア層とするトンネル磁気抵抗素子のスピン依存伝導機構に
可なり明瞭な知見を与えることに成功した。

更にスピン偏極共鳴トンネル効果を利用したトランジスタを実現するために、二重バ
リア構造を作製し、上下および中間層からそれぞれ電極を取ることを試み、一部ウエッ
トエッチングを併用することにより3端子構造の作製に成功し、それぞれの電極間でト
ンネル磁気抵抗効果を確認している。3端子素子としての挙動は中間層(ベース)の抵抗
を考慮することによりモデル化された。一方、走査型トンネル顕微鏡の測定結果からア
モルファスアルミナバリア上の鉄は粒状に成長することが見出され、増幅作用を示すト
ランジスタの作製には平坦性の良い超薄中間層の成長技術を開発する必要があること
を明らかにした。

また鉄コバルト合金層の間に銅のスペーサーを挟んだ巨大磁気抵抗素子を作製し、ス
イッチング時間が200psec以下と言う超高速スピン注入磁化反転を実現し、マグネシア

(MgO)をバリア層とするトンネル磁気抵抗素子においてもスピン注入磁化反転を実現しているが、本結果は、スピン注入により情報の書き込みを行う次世代の磁気 RAM(MRAM)が実現可能であることを示すものである。

次いでスピン注入磁化反転素子における電流電圧特性の非対称性を利用してマイクロ波を整流することを試み、外部磁場などでフリー層の磁化と固定層の磁化に適当な角度を持たせてマイクロ波電流を導入すると、その周波数がフリー層の磁気共鳴の周波数と一致したときに磁気共鳴が誘起されることを発見した。この磁気共鳴により小さな印可マイクロ波電流に対してもフリー層の磁化が大きな歳差運動をする。その結果、マイクロ波電流が固定層からフリー層に向かってに流れる瞬間には磁化が反平行に近づくために抵抗が大きくなり大きな負の電圧が発生し、その逆に、電流がフリー層から固定層に向かってに流れる瞬間には磁化が平行に近づくために抵抗が小さくなり、発生する電圧も小さくなる。従って、共鳴周波数において時間平均としては負の直流電圧が発生する。このことをスピントルクダイオード効果と名づけた。発生する電圧は印加電圧の二乗に比例し、二乗検波特性を示す。簡単な理論的考察から発生電圧はスピン注入磁化反転に必要な電圧に反比例することを示し、さらに、スピン注入磁化反転に必要な電圧が 25mV より小さくなるとこの素子の特性は半導体ダイオードを上回る可能性があることを見出し、この素子を基礎として、今後、スピントルクトランジスタといった能動素子も実現可能であると考えられることを示した。

②大谷グループでは、主にスピン注入磁化反転やスピンの拡散伝導に着目して 2 次元ナノスケール素子あるいは 3 次元ナノピラー構造を用いた実験的また理論的な研究を行い、非局所手法を用いた 2 次元スピン注入デバイスを用いて電荷の流れていない領域にスピン流を定常的に誘導する方法を確立した。この手法をホール効果測定に応用し、スピン流から生じる非局所ホール効果の測定に成功した。また、非局所手法を用いて非磁性細線中に誘起されるスピン流の 3 次元分布を計算する手法を確立し、電流から分離されたスピン流のみによって生じる磁化反転素子の設計と作製を行い、電荷流を含まないスピン流のみによるパーマロイ (Py: Ni₈₀Fe₂₀ 合金) 微粒子の磁化反転に成功している。

それぞれの研究の概要は以下の如くである。

非局所ホール効果測定には非磁性体銅クロス構造と強磁性 Py 細線から成る素子を作製してホール電圧の測定を行った。電荷の流れを含む電流は銅細線の一部分を流れるため、Py 細線を境に他方の銅細線部分には電流は流れず、アップとダウンのスピン流が拡散的にお互い向きを異にして流れるが、スピン流が生じている領域に非磁性不純物によりスピン軌道相互作用が生じると、両スピン流の軌道を同じ方向に曲げることになり、スピン量子化軸がデバイスの基板面に垂直の場合のみ横方向電圧が誘起されること、磁場を垂直に印加した場合に非局所ホール抵抗が観測されること、また、磁場を面内に制限して、Py 細線に対して平行あるいは垂直方向に印加するとホール抵抗は観測されないことを見出している。次に、純度の高い銅細線を用いて同様の実験を行ったところホ

ール抵抗は消失してほとんど観測されないので、この結果はこの現象が不純物によるスピン軌道相互作用に起因すると考えられること、また、散乱方向がスピン流の方向と量子化軸との外積により決定されるという定性的な解釈と符合することも明らかにした。

このようなスピン注入素子を設計し実験する上で、素子中のスピン流の分布を詳細に理解する必要があるので、スピン緩和の度合いの指標となるスピン流に対する抵抗（スピン抵抗）の概念を導入した3次元のスピン流分布の数値計算手法を確立した。計算手法の正当性を確かめるために一対の強磁性細線とそれらを橋渡しする非磁性細線から成る面内スピンバルブ素子中のスピン流分布の計算を行い、その結果、スピン流は一方の強磁性スピン注入端子から注入され他方の検出端子へと銅細線中を電荷の流れを伴わずに伝播することを見出し、スピン抵抗の小さい強磁性検出端子に、スピン流が吸収されることにより銅細線中の分布は変化することを示している。これは、強磁性体がスピン流を吸収し内部でスピン緩和（スピントランスファー）を促進することを意味し、強磁性体を微小にするとスピン流の吸収によって磁化反転を誘起できることが予想されることを意味する成果である。

このことを考慮して、上述のスピンバルブ素子の注入源をPyパッド、スピン流を運ぶ銅細線を銅クロス、検出強磁性細線をPy微粒子（幅50nm×長さ150nm×厚さ30nm）に置き換えた磁化反転素子を作製し、Pyパッドから電流を流すと銅クロス位置からPy微粒子に向かってスピン流は拡散的に伝播し、微粒子に吸収されるので、金細線を磁化状態検出用の端子として微粒子に接触させ、通常非局所スピンバルブ抵抗を測定すると微粒子とスピン注入パッドの相対的な磁化状態に対応して明瞭な非局所スピンバルブ抵抗曲線が観測され、変化の大きさが $0.3\text{m}\Omega$ であることを実測し、次に、初期状態として微粒子の磁化とパッドの磁化が反平行の状態、磁場の代わりにパルス状の印加電流を増大させて行くと負の印加電流（約 -12mA ）において非局所スピンバルブ抵抗に大きな変化を観測し、この変化量が前述の磁場印加によって生じる抵抗変化と一致することからスピン流のみによって磁化反転が生じることを検証することに成功している。

更に、スピン注入効率を増大させるために接合間のスピン抵抗を考慮した拡散伝導の2電流モデルを提案し、このモデルを用いて、3次元スピン流分布を可視化する簡単な計算手法を確立し、効率的なスピン注入磁化反転を誘起するデバイスを設計した。この結果、非局所手法を用いて電荷流とスピン流を分離し、スピン流のみによる磁化反転を誘起することに成功した。

一方、ナノピラー磁化反転素子については、再現性良い実験結果を得ることの出来るナノピラー構造の作製手法を確立し、更に上述の計算結果を利用して素子作製と詳細な実験を行い、上部電極のサイズや材料を最適化することによりスピン流を増大することが出来ることを実験的に検証した。その他、スピン流によって生じる磁化の不安定性について理論研究も行った。その結果、一様磁化状態であってもスピン偏極電流を流すことにより、スピン波が励起され、磁化状態の不安定化が引き起こされること、引き続き

この状態にスピン偏極電流を流し続けると、磁壁が核発生することを新たに発見した。更に、この理論解析を磁気渦構造についても適用した結果、磁気渦はローレンツ力のよ
うに渦中心の磁化ベクトルとスピン偏極電流ベクトルの外積で得られる方向に力を受
けて運動することを見出した。このことを実験的にも検証している。

③宮崎グループでは、非磁性体/強磁性体/非磁性体 (N/F/N) の接合における、強磁性
体の才差運動に伴うスピン流の発生、伝搬の現象であるスピンプンピングに関する研究
が行なわれた。強磁性共鳴 (FMR) スペクトルの線幅 (スペクトルのピーク間の幅) か
ら Gilbert のダンピング定数を精度良く算出する手法を提案し、F のダンピング定数は
N に大きく依存することを見だし、この現象は強磁性体の才差運動によりスピン流が
非磁性体内に伝搬し、非磁性体内におけるスピン蓄積とスピン緩和が実現されていると
解釈するスピンプンピングの効果として説明することに成功した。また強磁性の才差運
動の減衰を直接的に観測するために、ポンププローブ法を応用した高速磁化測定装置を
構築し、上記試料におけるスピンプンピングによる磁気緩和の増大現象を直接的に観測
することに成功し、スピン流による新機能創製に関するその後の研究に多大な貢献をし
た。本研究ではさらにスピン流の伝搬によるノンローカルな効果を期待し、N/F/N1 積
層膜および N/F/N1/N2 積層膜 (N1, N2 は非磁性体) における N1 内のスピン流の伝搬お
よび N1/N2 界面におけるスピン緩和に伴う F のダンピング定数の変化を調べ、N1 の膜
厚が十分薄い領域では両積層膜間のダンピング定数は N2 に依存した値を示し、N1 の膜
厚を厚くするに従い両者の差は緩やかに減少すること、これは N1 内のスピンの伝搬に
よって N1/N2 界面における緩和を F 層がノンローカルに影響を受けた結果であることを
スピンプンピングの理論と比較して定性的に示している。さらに F 層のダンピング定数
の N1 膜厚依存性から N1 内のスピン拡散長を求め、N1 が Cu の場合にスピン拡散長は室
温で約 400 nm、低温で約 1000 nm に達することを示しているが、これらはスピン注入
による高周波デバイス応用に際してスピン流の影響を示した重要な成果である。

2 研究構想及び実施体制

(1) 研究構想

①研究開始時に目指した目標

磁性金属多層膜において巨大磁気抵抗効果(Giant magneto-resistance: GMR)が発見されて以来、スピンの自由度を積極的にエレクトロニクスに利用しようという研究が盛んになった。トンネル磁気抵抗効果(Tunneling magneto-resistance effect: TMR effect)を利用した磁気抵抗ランダムアクセスメモリ (Magneto-resistive random access memory: M-RAM)は、その中でも最も野心的な提案の一つである。M-RAMは、D-RAMのキャパシターを強磁性体のトンネル素子で置き換えたもので、素子構造が簡単でありD-RAM並みの集積度とS-RAM並みの速度を持ちながら不揮発性であることから次世代のユニファイドメモリーの候補の一つとされている。しかし、現時点では、磁場を発生して磁化を反転する際の書き込み電力が大きい、あるいは、MOS-FETを使うので集積度がMOS-FETのプロセスで限定されてしまうといった問題点を抱えている。我々は、これらの問題の本質が、電子スピンの情報の保持と読み出しにのみ利用され書き込みとスイッチングには使われていない点にあると考えた。即ち、現状のM-RAMにおいては、磁性材料のもっとも古典的な利用法の一つである電子スピンによる記録の保持と、最近のスピン依存伝導研究の成果であるところのGMRあるいはTMRによる記録の読み出しが利用されている。しかし、GMR・TMRの逆効果である電流・電圧による直接的な磁化の反転、および、電子スピンによる直接的な電流のスイッチング技術は、この研究の発足当時、利用されておらず、また、技術としてもほとんど未知の領域として残されていた。

そこで、本研究では電子スピンのエレクトロニクスにおける更なる直接的な利用のための基礎研究として、スピン偏極電子の注入による種々の新現象・新機能の発現を目指した。具体的には、スピン依存共鳴トンネリングの実現・磁気抵抗効果素子の高度化・スピン偏極電流の金属中への注入とその確認・スピン偏極電子の注入による磁化反転の実現、さらには、スピン注入による電流のスイッチングの実現を目標とした。

以上の研究を通して、「スピントロニクス」という新しい学問・技術分野を構築していく際に共通する「固体中における非平衡スピンの注入と伝播およびその相互作用」を扱う基礎的理解と技術を与え、この分野の発展の基礎とすることを本研究の最終的な目標として研究を開始した。

②本プロジェクト開始時における国内外の状況

本プロジェクトの開始時において、いわゆる“スピントランジスター”についての研究がいくつかあった。電子の拡散を利用したもの、巨大磁気抵抗効果(GMR)による電子のロスを利用したものおよび単電子トンネリングを利用したものなどである。電子の拡散を利用した“スピントランジスター”は、Naval ResearchのMark Johnson等によって精力的に研究されたが、金属ではスピンに依存した化学ポテンシャルの変化は非常に

小さく、極低温で数ナノボルトの出力を得て終わっていた。GMRによる電子のエネルギーロスを利用する“スピバルブトランジスター”は、オランダの Twente 大学、IBM および東芝において研究された。この方法を用いるとコレクタにバリスティックに伝導した電子を集めることが出来るので、見掛けの GMR を著しく増大できることが示された。しかし、この方法ではベースに GMR を示す磁性多層膜を挿入するためにコレクタ注入効率が悪く (1/500 程度)、信号の増幅も不可能だった。また、この研究の発展として共鳴トンネリングを測定する試みはあったが多結晶試料を用いているために明確なスペクトルは得られていなかった。本プロジェクトの提案である単結晶強磁性トンネル接合を用いた共鳴トンネリングの実験例は無かった。最後に単電子トンネルを用いた研究には、筑波大学の犬塚等の実験があった。この結果は大変に美しく魅力的であるが、室温動作のために電極をナノメートル程度に小さくすると強磁性電極の磁化が熱揺らぎのために揺らいでしまう可能性がある。

スピン注入の研究は、世界各所で行われていた。磁性半導体から通常の半導体へのスピン注入が、当時報告され注目を集めた。しかし、磁性半導体のキュリー点が低いことから実用上の制約は大きい。強磁性金属から半導体へのスピン注入も各所で行われていたが、非常に小さな GMR しか得られないうえに Hall 効果などが混在するために明確な結果とはなっていない。

強磁性金属からもう一つの強磁性金属にスピンを注入して磁化を反転しようという試みはかなり以前から行われていた。しかし、巨視的な大きさの素子では電流の作る磁界の影響が大きく測定が困難だった。これに対して、本研究提案時には微細加工を利用した小さな素子で、スピン偏極電流注入によりスピン波を励起することに成功したという報告があった (M. Tsoi, Phys. Rev. Lett., 1998)。この方法については既に当時 IBM により基本特許が取得されていたが、未だ研究要素は山積みであり、研究の中から本質的な改善とそれに関する重要特許が生み出される余地は十分にあると考えた。

③研究開始時(2000年)における各グループの準備状況と役割分担・研究計画

電総研の鈴木グループ(現産総研および阪大)では、磁性金属多層膜(人工格子)の良質なエピタキシャル成長を研究し、早い時期から反射高速電子線回折(RHEED)振動を使った位相制御エピタキシを磁性金属人工格子に適用した (Y. Suzuki et al., Appl. Surf. Sci. 1992)。その後、単結晶磁性金属人工格子や原子層オーダーの単結晶超薄膜中には、

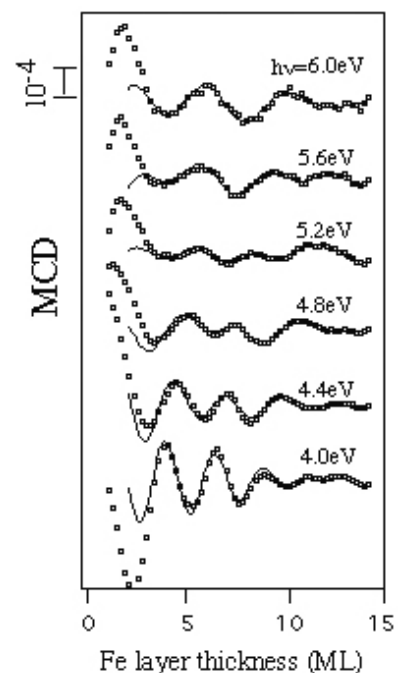


図1 Feの超薄膜にはスピン偏極した量子井戸準位が生じ、磁気光学効果の膜厚に対する振動となって現れる。

スピン偏極した量子井戸準位が生じ、磁気光学効果の増大や膜厚に対する振動現象として現れることを発見した(図1)(Y. Suzuki et al., Phys. Rev. Lett. 1992, Phys. Rev. Lett. 1998)。

更に、このエピタキシャル技術を、酸化膜の反応性蒸着と組み合わせることにより、世界で始めて単結晶磁性金属電極を持つトンネル接合の作製に成功した。当時は、下部電極のみが単結晶であったが、トンネル磁気抵抗効果(TMR:トンネル抵抗が対向する電極の磁化の相対角に依存する現象)が特別な結晶方位において増大することを発見した(S. Yuasa et al., Euro. Phys. Lett., 2000)。この結果は、TMRが電極結晶の電子状態を敏感に反映することを世界で初めて示したものである。従って、金属のエピタキシャル技術を駆使して超薄膜電極を作製すれば、膜の電子状態を人工的に制御しTMRを増大させることも不可能ではないと考えられる。この効果をより顕著化させるには、散乱を受けていない弾道電子を効率的に集める共鳴トンネル構造が望ましい。強磁性体を用いた共鳴トンネル構造では、バンド間の共鳴にスピンの選択(TMR)が重畳するので、通常の共鳴トンネルトランジスタに比べて大きな負性抵抗の出現が期待されスイッチング素子応用に適している。そこで、鈴木グループではその高度な強磁性金属成長技術を生かしてスピン偏極共鳴トンネル素子などの新素子の創製を分担して研究を推進した。

一方、大谷助教授等はその当時から強磁性体の微細加工に関して成果をリードしており、既にスピン自由度を持つ電子の伝導と微細磁区構造の相互関係に関する多くの知見を得ていた。大谷助教授はスピン伝導をより深く理解するための理想的な系の一つとして強磁性体から非磁性体へのスピン注入を試み始めていた。同様に超伝導体へスピン注入すれば、上述の内部磁場により超伝導状態は抑制され、伝導のスイッチングが生じる。強磁性体にスピン注入すれば、内部磁場による磁化反転が生じる可能性がある。これらの実験では、共鳴トンネルの場合と対照的に電子は拡散的に伝導する。東北大の大

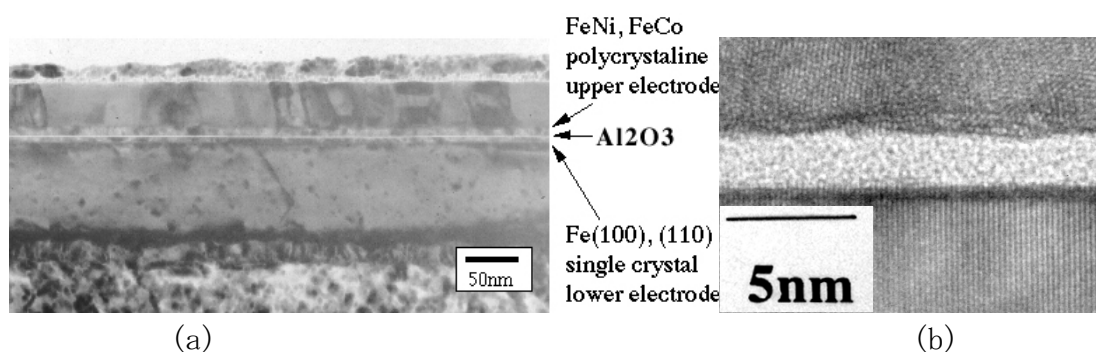


図2 一方の強磁性電極を単結晶にした強磁性金属トンネル接合。(a) 広い範囲にわたり平坦なジャンクションが形成されている。非常に細い白のラインがバリア層。(b)ジャンクションの拡大図。下部電極の格子像が見え、単結晶であることが分かる。単結晶の方位を選ぶことによりTMRを増大できる。

谷助教授グループは、上述の電子の拡散に対するスピンの効果に着目して、非平衡なスピン偏極電子の注入およびそれにより誘起される磁化反転などの諸現象に関する研究を分担する。

東北大の宮崎教授のグループは、実用レベルの大きな TMR 効果を世界で始めて実現し (J. Magn. Magn. Mat., 1995)、その後も TMR の研究をリードし続けている。また、本プロジェクト開始当時には AFM-STM を用いたトンネルバリアの局所評価とトンネルスペクトルの詳細な評価を押し進め、素子の構造と欠陥が TMR に及ぼす影響を明らかにしていた (図 3)。トンネルデバイスにおいてはバリア層の不均一は致命的な欠陥となるので、デバイスの各プロセスにおいて詳細な評価が必要不可欠である。そこで、プロジェクトにおいて素子評価を担当することとした。

④研究の展開と達成度

鈴木グループ (H17 より鈴木グループ (阪大) および長濱グループ (産総研) の 2 グループとして運営) では、スピン注入による新機能素子の実現を目標として研究を展開した。その結果、一方の強磁性電極を単結晶とするトンネル接合において、スピン依存量子サイズ効果およびスピン依存共鳴トンネル効果の観察に世界で初めて成功した (T. Nagahama et al., Appl. Phys. Lett., 2001, S. Yuasa et al., Science, 2002)。また、この頃から鈴木グループもスピン注入トルクとそのダイナミクスに注目した研究に着手、ソニー・パリ南大との協力により世界最高速のスピン注入磁化反転に成功した。さらに、鈴木・長濱グループではスピン注入素子におけるスピントルクを利用した新素子の研究を展開、バリヤを MgO 高配向結晶とした高性能トンネル接合素子 (キャノンアネルバと共同) においてスピントルクダイオード効果を発見した (A. Tulapurkar et al., Nature 2005)。以上、室温で増幅度のあるスピントランジスタまでは実現しなかったも

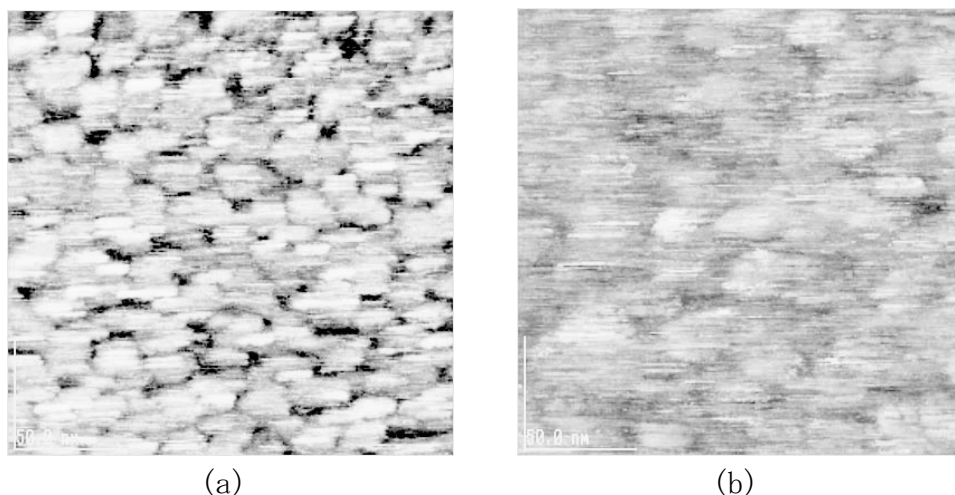


図3 トンネルバリアの局所的な伝導度の評価 (a)絶縁層作製直後。写真の明るいところに電流が集中して流れている。(b)熱処理により最適化された絶縁層。全体的に均一化されていることがわかる。

のの(世界的に見てもまだ実現していない)、研究は順調に進展し「スピン注入による新機能創製」に寄与でき十分な達成度が得られたと考えられる。

大谷グループでは、当初の計画通りにスピン注入磁化反転を実験的に検証するための高品質なナノピラー素子の作製手法を確立した。スピン注入効率を増大させるために接合間のスピン抵抗を考慮した拡散伝導の2電流モデルを提案した。このモデルを用いて、3次元スピン流分布を可視化する簡単な計算手法を確立し、効率的なスピン注入磁化反転を誘起するデバイスを設計した。さらに、非局所手法を用いて電荷流とスピン流を分離し、世界で初めてスピン流のみによる磁化反転を誘起することに成功した(T. Kimura et al., Phys. Rev. Lett., 2006)。また、スピン流によって生じる磁化の不安定性について理論研究も行った。その結果、一様磁化状態であってもスピン偏極電流を流すことにより、スピン波が励起され、磁化状態の不安定化が引き起こされること、引き続きこの状態にスピン偏極電流を流し続けると、磁壁が核発生することを新たに発見した。更に、この理論解析を磁気渦構造についても適用した結果、磁気渦はローレンツ力のように渦中心の磁化ベクトルとスピン偏極電流ベクトルの外積で得られる方向に力を受けて運動することを見出した。このことを実験的にも検証した。ナノピラーに関する研究は磁化反転に要する電流の最小化を実現するために、世界中で行われているが、スピン抵抗に着目して系統的に行った実験研究はほとんどなくスピン流とスピン蓄積の相関に関して質と量ともに満足な実験結果を示したのは、大谷グループが最初と考えられ達成度は非常に高い。

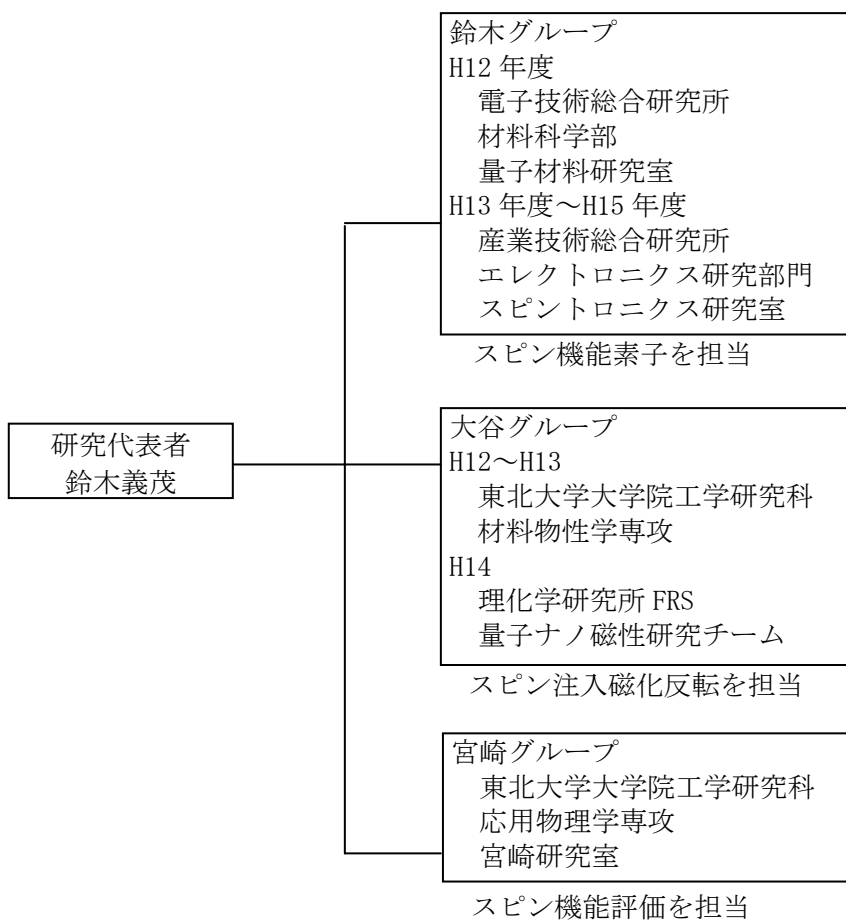
宮崎グループでは、強磁性共鳴(FMR)およびポンププローブ法を用いたスピン機能の評価、微小トンネル接合の作製技術等、概ね研究計画を達成した。また、この研究の中で強磁性層の磁化の運動が周囲にスピン流を発生することを発見した(S. Mizukami et al., J. Jpn. Appl. Phys., 2001, Phys. Rev. B, 2002 他)。この効果は後に「スピンプンピング」と呼ばれるようになり学会で大変注目された。この発見により注入スピンのスピン拡散長の温度依存性などのサブテーマを追加し、成果をあげたことは望ましい展開であり達成度は非常に高い。

チーム全体としては、「スピン注入による新機能創製」という共通のタイトルを掲げて3つのグループ(最後の2年間は4グループ)が刺激・協力しあいながら5年間の研究を行ってきた。大谷グループは主に静的なスピン注入と注入されたスピンの効率的な伝播についての一般的な理解を得た。また、宮崎グループは、「スピンプンピング」により電流を用いなくても磁化の運動によって動的なスピン注入が発生することを見出した。これらの研究の結果、スピンの流れを電流と同じようにしかし独立した実体である「スピン流」として捉えることの妥当性が具体的に理解される様になった。このことを決定的に示したのは電流を伴わない純粋なスピン流による磁化反転の実現(大谷グループ)である。一方、スピン注入を用いた新素子としてスピン偏極共鳴トンネル素子、スピントルクダイオードが鈴木・長濱グループによって実現された。特に後者は、スピンの運動により電子の流れを巧みに制御できることを示したものであり、半導体ダイオー

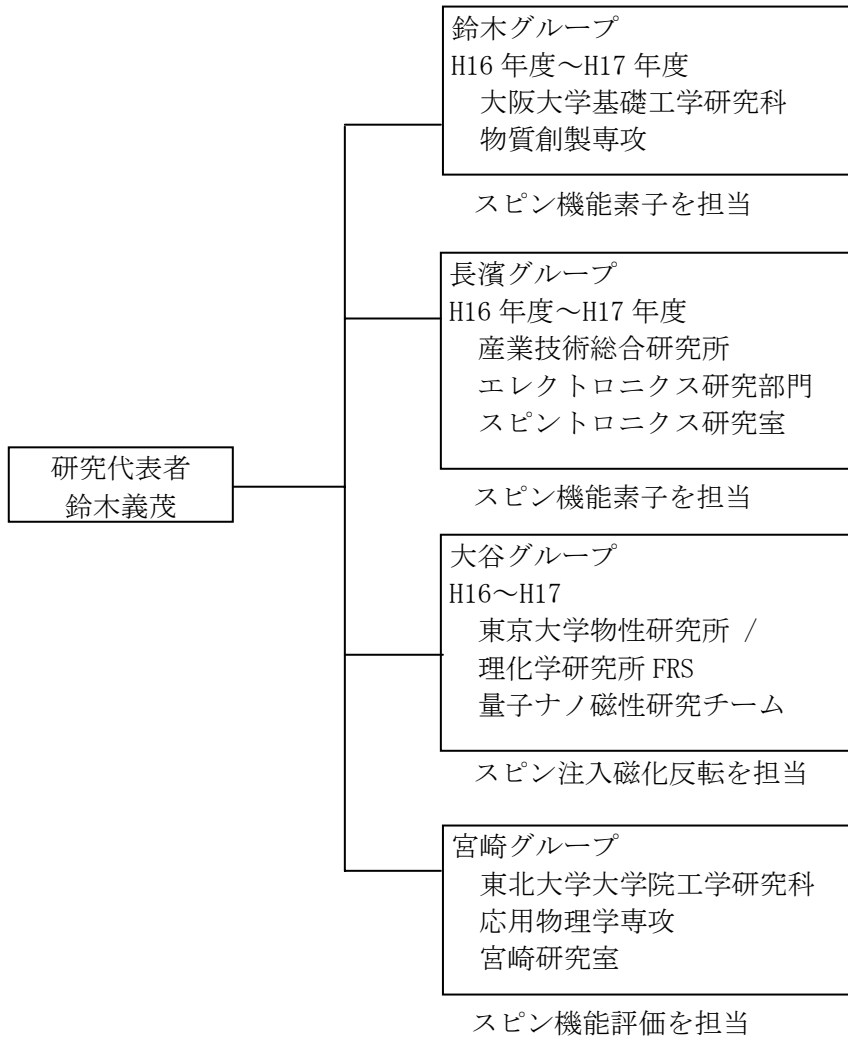
ドとは全く原理が異なる。即ち、スピン注入さらにはスピン流の制御がこれまでの半導体素子には無い全く新しいデバイス概念そして応用を生む可能性を示したものである。以上、本研究は「スピン注入による新機能創製」を目的として行われ、その目的をよく達成したと考えられる。

(2)実施体制

● ～ H15



●H16 ～ H17



3 研究成果

3.1 チーム全体の成果

本研究チームは、「スピン注入による新機能創製」という共通の目標に向かって共同研究を展開した。その結果、スピン注入、さらには、スピン流の発生と伝達に関して基本的な理解とその制御技術を構築するに到った。鈴木・長濱グループは高度な単結晶作製技術を駆使することにより、スピンの依存した共鳴トンネル磁気抵抗効果 (Science

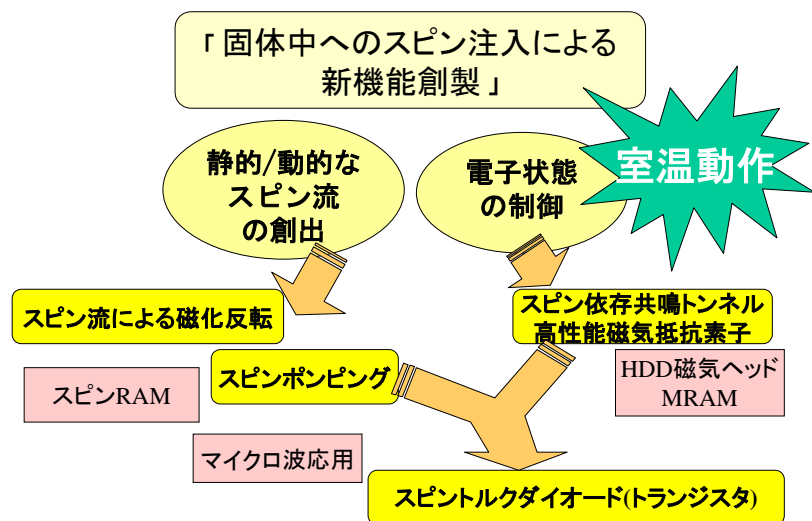


図1 「固体中へのスピン注入による新機能創製」プロジェクトの成果の概念図。

2002, I. F.=31.853, Sitation=51)を実現できること、あるいは、トンネル磁気抵抗素子の強磁性電極表面にある1原子層に非常に敏感な素子を作製できること (Physics Review Letters, 2005, I. F.=7.218, Sitation=0)を示した。このことは、高度な結晶成長技術により固体中の電子とスピンの運動を原子層のオーダーで制御できることを示したものである。諸外国ではトンネル素子におけるスピン依存伝導について電極表面の重要性が議論されていたが、素子の品質の問題で研究は行き詰っていた。本研究は、この行き詰まりを一気に打開し、トンネル磁気抵抗効果の統一的な理解を可能とすると共にその後のコヒーレント磁気抵抗素子の発明に実験的な基礎を与えたものであり世界的に見ても他に例が無く高く評価できると考えられる。

一方、大谷グループはスピン拡散長(数nm~1 μ m程度)よりも小さな構造を持つ素子を巧みに作製することにより、電荷の流れを伴わない純粋なスピンの流れを作り出すことができることを示した。そして、さらに発生したスピン流を強磁性セルに注入することにより磁化反転が生じることを実証した (Physical Review Letters, 2006., I. F.=7.218, Sitation=0)。大谷グループは静的にスピン流を発生したが、宮崎グループは磁化の運動がダイナミックなスピン注入とスピン流を発生することを発見した (Japanese Journal of Applied Physics, 2001, I. F.=1.142, Sitation=22)。後にスピンプンピング効果と呼ばれる様になったこの効果はスピン流磁化反転と逆の効果であるとも言える。即ち、スピン流があると磁化が運動し(反転し)、磁化が運動するとスピン流が発生する。

純粋なスピン流の発生についてはオランダのグループの発表が既にあった。しかし、純粋なスピン流による磁化反転は大谷グループの実験が世界初であり、この分野の研究者に驚きを与えた。また、スピンプンピングの発見は、スピン流の普遍性と重要性を印象付けた。これらの成果は、スピン流と言う新しい物理概念を定着させるきっかけとなるものであり非常に高く評価できる。

これらの効果と磁気抵抗効果を組み合わせると様々な現象が期待できる。強磁性体ナノ構造に高周波電流を流すと高周波スピン流が発生し、磁化が振動する。すると磁気抵抗効果によって電気抵抗も振動する。この結果、最初に与えた電流は磁化の運動のために時間に依存した電圧を発生する。特に、高周波電流の周波数を変化させ磁気共鳴の状態になると磁化の運動と電流が同期する。このために高周波電流の整流作用が生じ、直流電圧が発生することを鈴木・長濱グループが発見しスピントルクダイオードと名づけた(Nature, 2005, I.F.=32.182, Sitaiton=0)。この結果は、スピン流・電流・磁化の3者の関係を巧みに利用すると非線形応答が得られることを示しており、今後、増幅度のあるスピントルクトランジスタの実現可能性を実験的に示唆するものである。また、素子自体にもマイクロ波応用の可能性があり、スピントロニクスにマイクロ波応用と言う新しい展開を与える一つのきっかけとなると期待され高く評価できる。スピントロニクスのマイクロ波応用に関しては、既に米国が中心となりスピン注入によるマイクロ波発振の研究を推進している。しかし、本プロジェクトで発見したスピントルクダイオード効果についてはこれまで全く研究されておらずその独創性が高く評価できるものと考えられる。

図1にこれら諸現象の関係を図示した。スピン注入磁化反転とスピンプンピングは表裏の関係にあり、また、スピントルクダイオード効果とマイクロ波の発振も表裏の関係にある。ここで、これらの現象が全て室温で生じるために応用が容易であることを強調したい。これらの新現象・効果は、高密度磁気ハードディスクの読み出しセンサとしての応用以外にも、スピン注入磁化反転により情報の書き込みを行うスピンRAMや新マイクロ波素子、さらには不揮発性論理素子といった新しい応用につながるものと期待される。

以上、本研究チームは、全体として「スピン注入」の概念を発展させ、スピン流の創製と輸送、さらにその相互作用の理解と制御までに高め、実際に実用になる素子の開発の基盤を与えたと考えられる。

3. 2 スピン機能素子の研究

(1) 研究成果の内容

<スピン偏極共鳴トンネル効果>

・背景 1995年に磁気トンネル接合(MTJ) (トンネル障壁層を2枚の強磁性金属の電極層で挟んだ接合素子) が室温でさらに大きな磁気抵抗効果を示すことが発見され^{1,2)},

トンネル磁気抵抗効果 (Tunneling MagnetoResistance (TMR)効果) と名付けられた。この発見によって、新しい不揮発性ランダム・アクセス・メモリ (MRAM) が実現可能となった。MRAM は不揮発・高集積・高速などの特徴を持つ究極のメモリになると期待されており、世界中で研究開発が行われている。TMR 効果はスピン偏極した伝導電子のトンネル現象であり、工業的応用に直結した分野であるとともに、基礎物理の面でも未解明の課題が数多く存在する興味深い分野となっている。本節では、スピン偏極系で初めて観測された共鳴トンネル効果に関する研究成果を報告する。

TMR 効果の機構の説明として、次に述べる簡単な理論モデル (Julliere モデル) が頻繁に用いられている³⁾。トンネル過程で電子のスピンの向きが変わらない (スピン・フリップ散乱が無い) と仮定すると (2 流体モデル)、両側の強磁性電極の磁化の向きが平行なとき、majority-spin (minority-spin) 電子は他方の電極の majority-spin (minority-spin) バンドにトンネルする (図 1(a))。両側の強磁性電極の磁化の向きが反平行なときは、

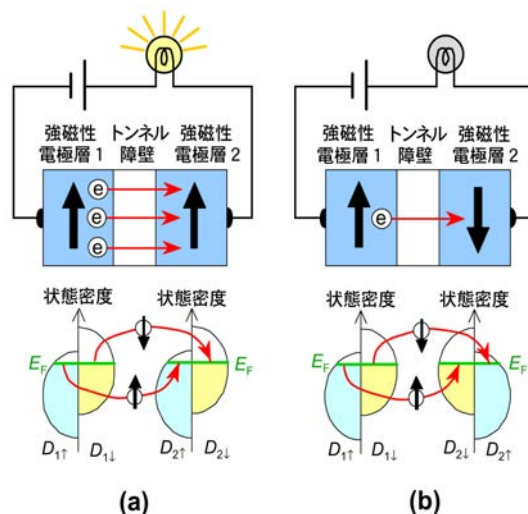


図1 磁気トンネル接合 (MTJ) の TMR 効果の概念図. (a) 両側の強磁性電極の磁化の向きが平行なとき, (b) 両側の磁化の向きが反平行なとき.

majority-spin (minority-spin) 電子は他方の電極の minority-spin (majority-spin) バンドにトンネルする (図 1(b))。この結果、磁化が平行なときのトンネル抵抗 (R_P) と反平行なときのトンネル抵抗 (R_{AP}) の変化率 (磁気抵抗比 (MR 比) と呼ぶ) は次のようになる⁴⁾。

$$\text{MR比} \equiv (R_{AP} - R_P) / R_P = 2P_1 P_2 / (1 - P_1 P_2),$$

$$P_\alpha = (D_{\alpha\uparrow}(E_F) - D_{\alpha\downarrow}(E_F)) / (D_{\alpha\uparrow}(E_F) + D_{\alpha\downarrow}(E_F)), \quad \alpha = 1, 2. \quad (1)$$

ここで、 P_1, P_2 は両側の電極のスピン分極率と呼ばれる量であり、フェルミレベルにおける majority-spin バンドの状態密度 $D_\uparrow(E_F)$ と minority-spin バンドの状態密度 $D_\downarrow(E_F)$ によって定義される (非磁性体では $P=0$)。

Julliere モデルで用いられる状態密度 (DOS) が「界面の DOS」か「電極のバルク DOS」か、あるいは「特定の波動関数の DOS」かという問題が重要であるが、アモルファス酸化アルミニウム (Al-O) トンネル障壁 MTJ ではこの問題に答えを出すことは困難であ

る。アモルファスの構造の乱れのために、種々の DOS の効果が重なっていると考えられるためである。いずれにせよ、何らかの DOS を用いてトンネル現象を記述することは、拡散的な電子伝導を仮定したものである。電極の状態密度で記述できるということは、トンネル障壁をバリスティックに透過した電子が、電極内に入ると強い散乱を受けて拡散的に伝導することを意味している。もし、スピン偏極したトンネル電子が電極内でもバリスティックに伝導できれば、電極の状態密度だけでは記述できない新規の効果が出現するはずである。その端的な例が、スピン偏極系の共鳴トンネル効果である。一般に共鳴トンネル効果は、2つの電極間に存在する量子井戸準位を介して片側の電極から他方の電極にコヒーレントにトンネルする現象である。量子井戸準位がスピン偏極している場合、TMR 効果が共鳴トンネルの影響を受けるはずである。通常の（スピン分極していない）共鳴トンネル効果は、半導体素子で既の実証されているが、スピン偏極系（金属、希薄磁性半導体、酸化物を含めて）で共鳴トンネルを実現した例はこれまでになかった。

・スピン偏極共鳴トンネル効果の実現 共鳴トンネル効果を実現するには通常2枚のトンネル障壁層を用いて中間電極に量子井戸準位を形成させる。しかし、強磁性金属と Al-O トンネル障壁を用いてそのような構造を作製するには技術的に難しい点が多い。これに比べて比較的作製が容易な図 2(a)のような構造を用いても、スピン偏極共鳴トンネル効果の実証実験ができる。トンネル障壁と強磁性電極層の間に非磁性金属の超薄層を挿入した構造を作ると、非磁性/強磁性界面で minority-spin 電子だけが部分的に反射される。もし非磁性層内で minority-spin 電子がコヒーレントに多重反射されればスピン偏極した量子井戸準位が形成され、これを介したスピン偏極共鳴トンネル効果が起こることが期待される。その結果、TMR 比が非磁性層の膜厚に対して量子振動を示すことが理論的に予想される。

これまでも多数の研究者が図 2(a)の構造を用いてスピン偏極共鳴トンネル効果の実証を試みてきたが、これまで成功した例は全くなかった。種々の非磁性金属を用いて実験が行われたが、非磁性層の厚さ(t_{NM})が増すと TMR 比は急激に減少し、 $t_{\text{NM}} \sim 6\text{\AA}$ (約3原子層に相当)以上で TMR 比は0になってしまう。この結果は、スピン偏極した伝導電子が非磁性層に入ると、3原子層を通過する間に全ての電子が散乱されてスピン分極率が0になってしまうことを意味する。スピン偏極共鳴トンネル効果を実現するためには、非磁性層内でのスピン偏極電子の散乱を減らさなければならない。このような非常に強い散乱の原因として、界面で電子波の位相が乱される機構が理論的に提唱されていた。これについて我々は、多結晶の電極と乱れた界面による電子散乱が主要因であると考えた。そこで本研究では、超高真空蒸着 (MBE 法)を用いて高品質な単結晶の強磁性 Co(001)と非磁性 Cu(001)を用いて原子レベルで平坦な界面を持つ Co(001)/Cu(001)/Al-O/NiFe トンネル接合 (図 2(b))を作製して、電極内での電子散乱を画期的に減らすことを試みた⁵⁾。ここで Co(001)/Cu(001)を電極に用いた理由は、結晶成長が良好であることと、 $k_{\parallel}=0$ 方向にスピン偏極した量子井戸準位が形成されることである (図 2(c))。このため、トンネル電子はこのスピン偏極量子井戸準位に効率的に注入されると期待で

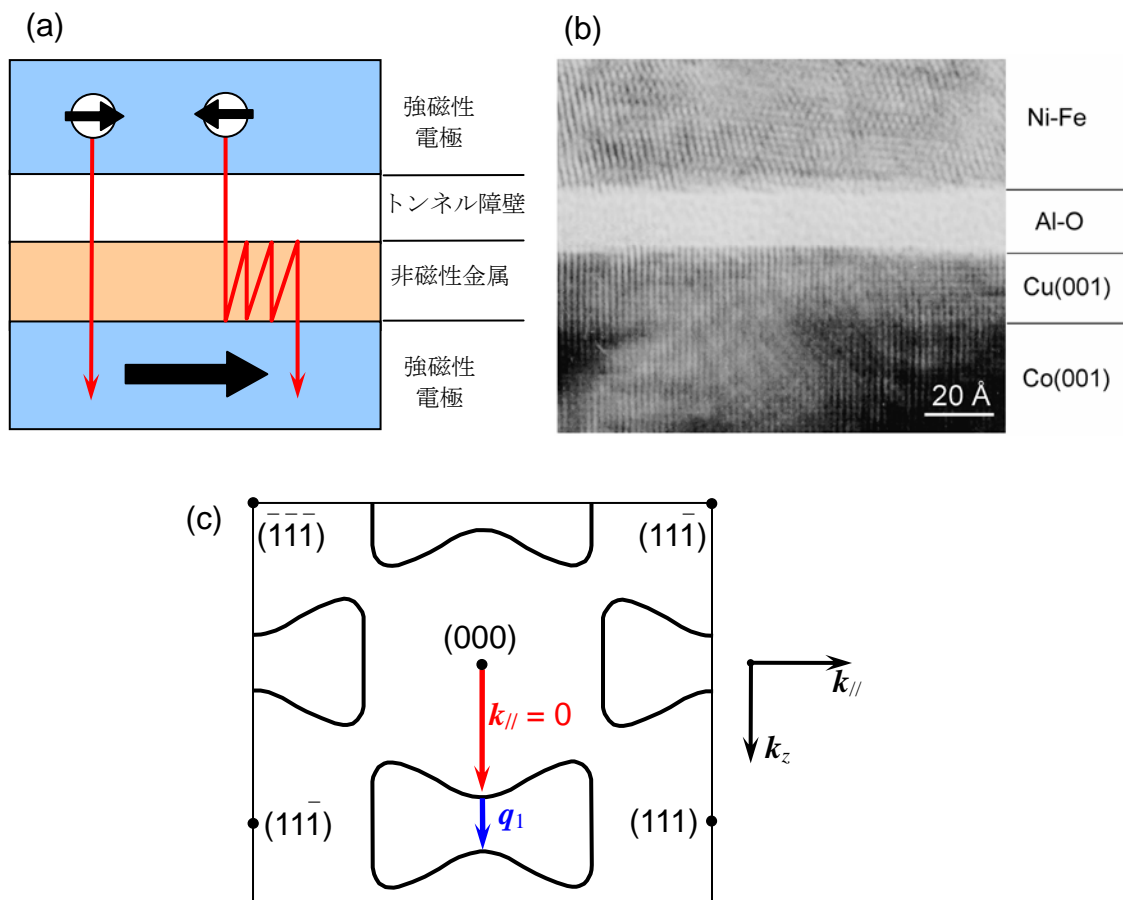


図2 (a)トンネル過程の概念図. minority-spin電子は非磁性金属層内に部分的に閉じこめられ、スピン偏極した量子井戸準位を形成する. (b)Co(001)/Cu(001)/Al-O/NiFeトンネル接合の断面の透過電子顕微鏡(TEM)写真. (c)Cuのフェルミ面. 電子が z 面内に閉じこめられるとき、 $k_{//}=0$ 方向に量子井戸準位(散乱ベクトル q_1)が形成される.

きる。

TMR 比の Cu 層厚(t_{Cu})依存性を図 3(a)に示す。TMR 比は t_{Cu} に対して振動することが観測された。その振動周期は 11\AA であり、これは Cu(001)層中にできるスピン偏極量子井戸準位(図 2(c)の q_1)から予想される量子振動の周期($2\pi/q_1=10.6\text{\AA}$)⁶⁾と良く一致する。したがって、この TMR 効果の振動現象は、Cu 層中に形成された量子井戸準位を介したスピン偏極共鳴トンネル効果に起因したものである。ここで注目すべき点は、TMR 比の振動振幅が非常に大きいため TMR 比の符号まで反転していることと、振動が $t_{Cu}=30\text{\AA}$ まで続いていることである。つまり、Co(001)/Cu(001)電極の実効的なスピン分極率は、Cu 膜厚に対して符号の反転を伴って振動し、 $t_{Cu}=30\text{\AA}$ まで有限の値を持つ。このような振る舞いは、電極/トンネル障壁界面の状態密度では全く説明できない。Cu 層と Al-O トンネル障壁の界面の状態密度からスピン分極率 P を計算すると、スピン分極率は t_{Cu} の増加とともに急速に減少し、Cu 層が 2 原子層以上厚いとき P はほとんど 0 になってしまう⁷⁾。この計算結果はむしろ、これまで多結晶電極の試料で観測されてき

た実験結果と良く一致する。これに対して、この研究では高品質の単結晶電極と超平坦な界面を持つトンネル接合を用いて電極内での電子散乱を画期的に減らした結果、電極の状態密度では説明できないコヒーレントなスピン偏極共鳴トンネル効果を実現した。

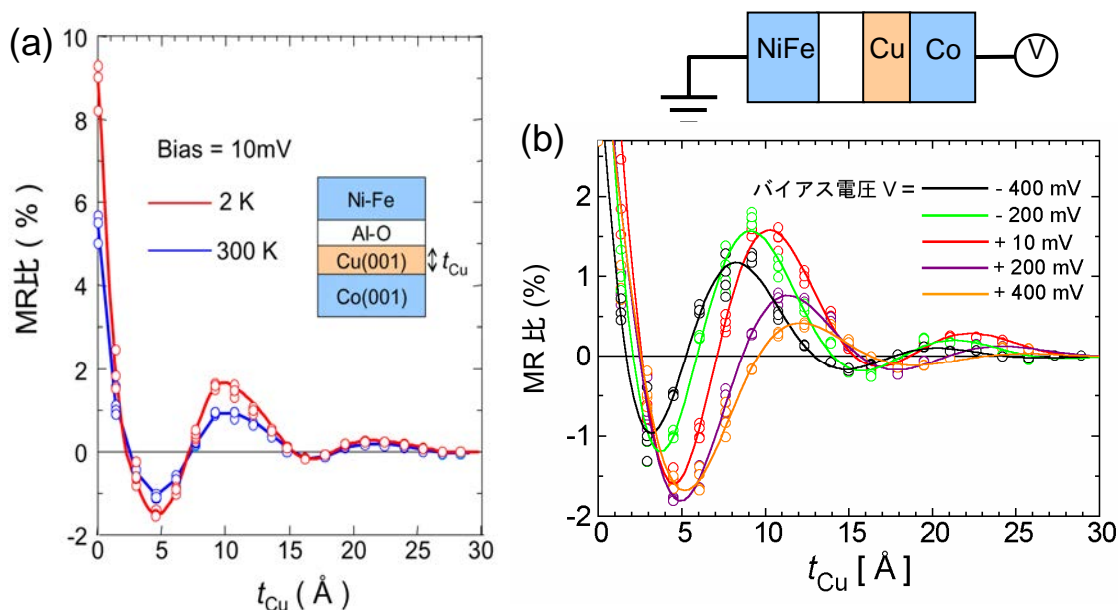


図3 Co(001)/Cu(001)/Al-O/NiFeトンネル接合のTMR比のCu層厚(t_{Cu})依存性. (a) 低バイアス電圧 (+10 mV) の場合. (b) 種々のバイアス電圧 V を印加した場合.

この実験によって、スピントロニクス研究が拡散伝導からコヒーレント伝導の領域へ一歩踏み出すことができた。

次に、TMR効果のバイアス電圧依存性について述べる。種々のバイアス電圧 V を印加したときのMR比の t_{Cu} 依存性を図3(b)に示す。バイアス電圧に依存して、振動周期、減衰距離、位相などが変化する。ここでは特に振動周期に着目して議論する。図4(a)は、TMR振動周期のバイアス電圧依存性である。正バイアス(+ V)を印加した場合、振動周期は V とともに増加する。一方、負バイアス(- V)を印加した場合、振動周期はほとんど V に依存しない。この特徴的なバイアス電圧依存性は、次のように理解できる。振動の原因となる量子井戸準位は、下部電極の単結晶Cu層中に生成する。正バイアス(+ V)を印加した場合、トンネル電子は上部電極(多結晶Ni-Fe)のフェルミレベル(E_F)からCu層の E_F+eV の量子井戸準位にトンネルする(図4(b)参照)。したがって、振動周期はCuの E_F+eV 位置における散乱ベクトル q_1 の長さ(の逆数)で定まる。そもそも、この量子井戸準位は、主にs電子的な高対称性を持つCu- Δ_1 バンドの $k_{\parallel}=0$ 方向([001]方向)に形成される(図4(c)参照)。エネルギー準位が高くなるほど、量子井戸の散乱ベクトル q_1 は短くなるため、 q_1 の長さの逆数に比例する振動周期は短くなる。一方、負バイアス(- V)を印加した場合、トンネル電子はCu層の E_F に生成したの量子井戸準位からNi-Fe上部電極の空き準位のトンネルするため、振動周期はバイアス電圧に依存しない。Cu- Δ_1 バンドの分散(図4(c))から予想される振動周期を図4(a)の赤線で示す。測定された振動周期のバイアス電圧依存性は、Cu- Δ_1 バンドの分散で良く説明できる。この結

果は、共鳴トンネルの過程で電子のエネルギーが保存されていることを示しており、共鳴トンネル型スピン依存デバイスを作製するためには朗報である。

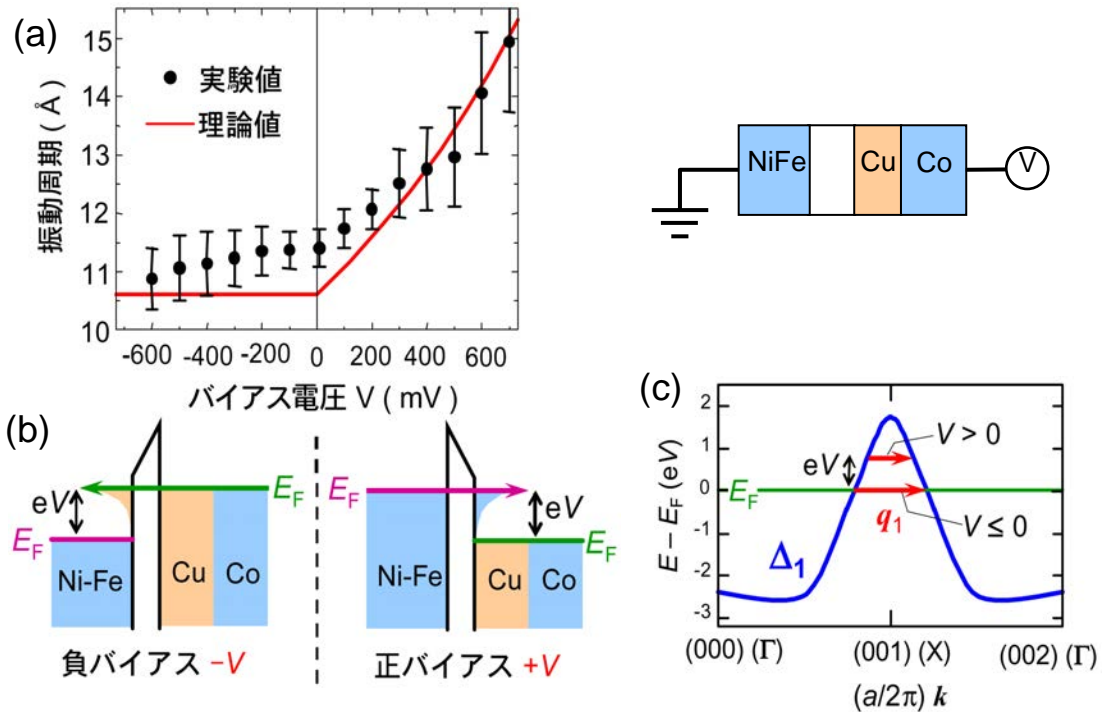


図4 (a) TMR振動周期のバイアス電圧V依存性. (b) トンネル過程の模式図. (c) Cu- Δ_1 バンドの分散と[001]方向に生成する量子井戸準位の散乱ベクトル q_1 .

参考文献

- 1) T. Miyazaki and N. Tezuka: J. Magn. Magn. Mater. **139** (1995) L231.
- 2) J. S. Moodera, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 3273.
- 3) M. Julliere: Phys. Lett. **54A** (1975) 225.
- 4) 2 電流モデルでは、 $G_p = 1/R_p = A(D_{1\uparrow}D_{2\uparrow} + D_{1\downarrow}D_{2\downarrow})$, $G_a = 1/R_a = A(D_{1\uparrow}D_{2\downarrow} + D_{1\downarrow}D_{2\uparrow})$ (A はトンネル確率に比例した定数) であるから、(1)式が導かれる。
- 5) S. Yuasa, T. Nagahama and Y. Suzuki: Science **297** (2002) 234.
- 6) P. Bruno and C. Chappert: Phys. Rev. Lett. **67** (1991) 1602.
- 7) H. Itoh and J. Inoue: private communication.

<強磁性トンネル接合における TMR の理論> (名古屋大学 井上順一郎、伊藤博介)

強磁性トンネル接合におけるトンネル磁気抵抗効果(TMR)に関して、理論的およびコンピュータ・シミュレーション的な手法を用いて研究を行ってきた。この研究で得られた主要な成果は次の3点である。

- (1) 非磁性スペーサ層による TMR の量子振動現象の解明
- (2) Fe/MgO/Fe トンネル接合における巨大な TMR の解明
- (3) ナノ・スケール素子の伝導特性に対する計算手法の確立

ここ数年において、強磁性トンネル接合の質の向上はめざましい。このため、質の高い接合において観測された TMR は、従来の実験結果とは異なり、電子波のコヒーレンスや物質の電子状態の詳細を反映したものとなっている。TMR 素子の実用化に向けては、このコヒーレンスと電子状態をどのようにコントロールすれば、高 TMR 化・低抵抗化できるのかを理論的に明らかにする必要がある。そこで本研究では、電子波のコヒーレンスを破る乱れ、および物質の電子状態の詳細が TMR に与える影響について詳しく調べてきた。以下では、上述の主要な成果の内容について簡単に述べる。

(1) 非磁性スペーサ層による TMR の量子振動現象の解明

強磁性体と絶縁体の間に非磁性スペーサ層を挿入した NiFe/Al₂O₃/Cu/Co トンネル接合において、TMR が非磁性スペーサ層 Cu の膜厚の増加とともに減衰振動することが湯浅らによって観測された。この結果は、物質の電子状態(バンド構造)をはっきりと捉えたものであり、この現象を解明することは TMR と物質の電子構造とを解明する第一歩となる。しかし、従来からある状態密度モデルやバリスティック理論ではこの実験結果を説明することはできない。そこで本研究では、乱れによる電子散乱の効果を正確に取り扱い、TMR の量子振動現象を調べた。得られた結果は、実験で観測されている TMR の振動の特徴(振動の中心、周期、振幅)を良く再現している。また、トンネル障壁による伝導電子の運動量選択、および量子井戸状態を介した伝導チャンネルが乱れによって開くことが、TMR の量子振動現象を理解する上で不可欠であることが明らかとなった。

(2) Fe/MgO/Fe トンネル接合における巨大な TMR の解明

単結晶 MgO をトンネル障壁に用いた Fe/MgO/Fe トンネル接合において、室温で 200% にも達する巨大な TMR 効果が湯浅らによって見出された。バンド計算に基づくバリスティック理論は 1,000% を超える TMR を予測し、この巨大な TMR が生じる原因が、Fe のハーフ・メタル的なバンド構造、電子の持つ運動量の保存、ブロッホ波の対称性の保存にあるとした。しかしながら、接合中に存在する乱れは、運動量およびブロッホ波の対称性の保存を破るため、TMR を大きく減少させる可能性がある。乱れの存在する現実の接合において、どれくらい大きな TMR が期待されるのかを明らかにすることは応用上重要である。また、実験と定量的にも比較可能な理論を構築することは、物質科学の分野における重要な課題である。そこで本研究では、物質の現実的な電子状態と乱れによる電子散乱の効果を同時に正確に取り扱い、Fe/MgO/Fe における TMR に対する乱れの効果を調べた。乱れとしては、(i) MgO 中のポテンシャルの乱れ、(ii) MgO 中の酸素欠損、

(iii) 接合界面における格子歪み、(iv) 接合界面に部分的に形成される酸化鉄、を考えた。計算の結果、たとえ上記のような乱れが接合中に存在したとしても数百%を超える巨大な TMR 効果が得られることが明らかとなった。Fe のハーフ・メタル的なバンド構造によるスピン・フィルター効果は乱れに対して強く、現実の接合で少々の乱れがあっても、Fe/MgO/Fe トンネル接合においては大きな TMR が得られると予想される。

(3) ナノ・スケール素子の伝導特性に対する計算手法の確立

強磁性トンネル接合の TMR を調べるためには、(i) 電子波のコヒーレンス、(ii) 物質の現実的な電子状態、(iii) 乱れによる電子散乱、を同時に取り扱うことのできる計算手法を確立する必要がある。本研究では、コヒーレント・ポテンシャル近似を用いた計算手法と、大規模なコンピュータ・シミュレーションによる計算手法を確立した。これらの手法を用い、上に述べた(1)と(2)の課題に取り組んだ。この手法を用いて得られた結果は、実験結果と定量的にも比較できうるものであり、この成果はコンピュータを用いたデバイス・デザインを目指す物質科学・計算機科学の分野にも大きく貢献するものであるといえる。

以上、本研究で得られた主要な成果について簡単に述べた。本研究で得られた理論および計算手法は、強磁性トンネル接合に限らず、様々な系に適用可能である。実際に、半金属を用いた接合 (FEMD-CREST 中村新男チームの研究課題)、半導体接合、遷移金属酸化物を用いた接合へ適用し、多くの成果をあげている。また、大規模コンピュータ・シミュレーションについても、量子伝導シミュレータの開発を目指して、文部科学省超高速コンピュータ網形成プロジェクトの研究課題として、研究が引き継がれている。

<Fe 超薄膜を挿入した MTJ における量子井戸効果>

続いて強磁性体層中のスピン偏極量子井戸準位について報告する。強磁性体中では電子状態は交換分裂し、上向きスピン電子（↑電子）と下向きスピン電子（↓電子）は、同じ波数を持っていてもそのエネルギーは異なる。すなわち、ある波数の量子井戸準位に対応するエネルギーレベルが↑スピン電子と↓電子では異なるので、例えば↑電子の量子井戸準位が形成されるエネルギーレベル（あるいは電圧）では↓電子の量子井戸準位は形成されない。以上のメカニズムで強磁性体中にスピン偏極量子井戸準位が形成される。この場合、Cu の場合と異なり、強磁性体中の交換分裂が原因であるため、界面でのスピンに依存した反射は必要ない。例えば両側を AlO バリアに挟まれている状況でも実現されるため、新規デバイス開発に有利である。このような強磁性体中のスピン偏極量子井戸について調べるために、FeCo/AlO/超薄 Fe(001)/Cr(001) という構造の TMR 素子を作成し、電気伝導特性を調べた。

この構造の場合はスピン偏極量子井戸準位は超薄 Fe(001) 層中に形成される。量子井戸準位の詳細はバンド構造(図 5) を考慮することによって理解される。本素子の場合には、↑電子の Δ_1 バンドがスピン偏極量子井戸準位を形成すると予想される。理由は Cr 中のフェルミ準位近傍には (001) 方向に Δ_1 バンドが存在しないので、Fe(001) 層内の↑電子は Fe(001)/Cr(001) 界面で反射されるためである。↓電子については Fe(001) 層のフェルミ準位近傍には Δ_1 バンドは存在しないので、量子井戸準位も形成されない。

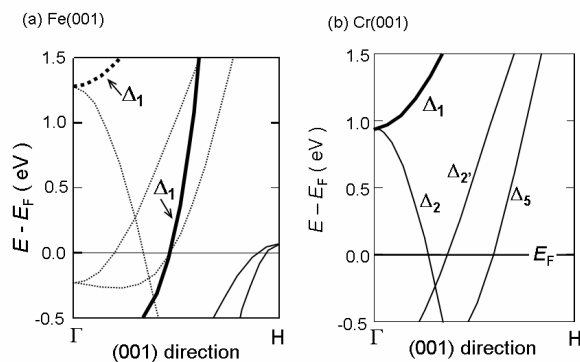


図5 (a)Fe(001), (b)Cr(001)のバンド図。(a)の実線は↑電子、点線は↓電子のバンドを表す。また、太線で表されているのが Δ_1 バンドである。

図 6 に本 TMR 素子の微分電気伝導率を示す。Fe(001) 層の厚さは 2 原子層 (0.3nm) から 9 原子層 (1.3nm) とした。横軸はバイアス電圧 (V)、縦軸は微分伝導率(任意目盛) である。電気伝導率がバイアス電圧に対して振動していることが分かる。また、この振動の様子は、Fe(001) 層の厚さの変化とともにシフトする。さらに、振動は正バイアスでのみ観測され、負バイアスでは観測されない。これらはすべて、量子井戸準位によるトンネル電気伝導率の振動の特徴である。

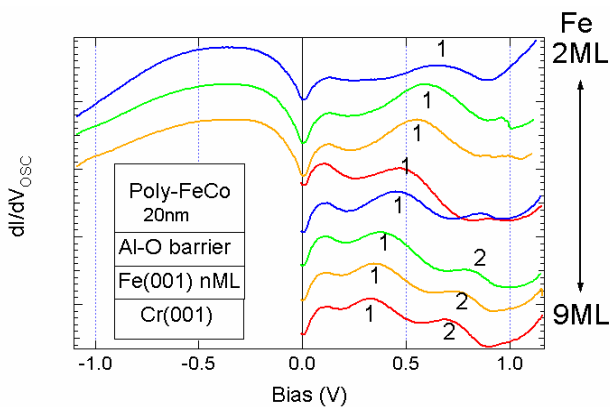


図6 Fe(001)超薄挿入層を有するMTJの微分電気伝導率の振動。実際の伝導率から振動成分のみを取り出してプロットしている。バイアス電圧はFe(001)層について定義している。(正バイアスとは、Fe(001)挿入層側が正という意味)

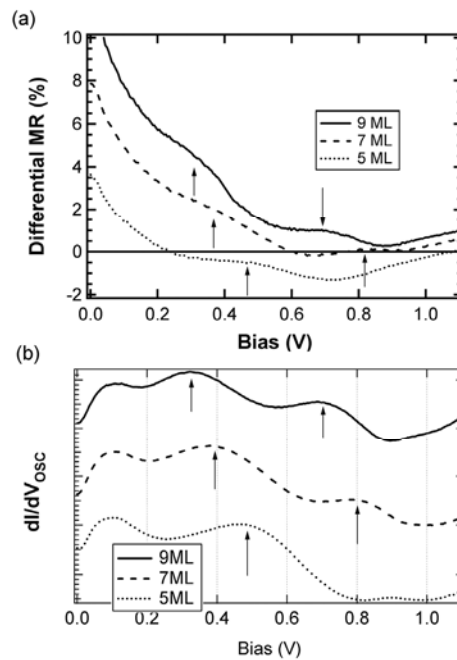


図7 (a)微分抵抗から求めたMRの振動と(b)微分伝導率の振動。

さらに、図7に微分抵抗から求めた磁気抵抗効果(微分TMR)を示す。やはりバイアス電圧に対して振動していることが分かる。さらにその振動の様子は、電気伝導率の振動とよく一致する。これらのことは、本素子の示す電気伝導の振動現象が、超薄Fe(001)層に形成されたスピン偏極量子井戸準位によるものであることを示している。以上の研究は、強磁性体中の量子井戸準位がTMR効果及びMTJの電気伝導特性に影響を与えることを示した初めての結果であり、TMR素子が単なる磁気スイッチング素子以上のデバイスとなりえる可能性を示した研究結果といえる。また、この研究結果の発表後、米国オークリッジ国立研究所のZhangらにより理論計算が行われ、我々の実験結果と非常によく一致する計算結果が報告された[1]。最近では、二重トンネル接合を用いた同様の実験結果も報告されている[2]。

[1] Zhong-Li Yu *et al.*: *Phys. Rev. Lett.* **94** 207210 (2005)

[2] T. Nozaki *et al.* *Phys. Rev. Lett.* *in press*

<Cr 超薄膜を挿入したMTJのTMR効果>

以上に述べてきた量子井戸準位によるトンネル電気伝導特性は、金属電極のバルクの電子状態が電気伝導に与える影響である。しかし、長年MTJの電気伝導特性は界面の電子状態によって決定されるとされてきた。このようにバルクと界面どちらの電子状態がどのように電気伝導に寄与するのかを解明することは、今後MTJをデバイスとして利用する際の膜構成の決定のために不可欠な知見である。我々のもつ単結晶電極を持つMTJは、欠陥などの構造的な散乱要因を除去できるため、上記のような問題に対して本質的な議論をすることができる。電子のトンネル現象において重要なのは波動関数の連続性

である。つまり、波動関数が連続的に繋がることのできるバルクのバンドが電極中に存在すれば、バルクの電子状態を反映した電気伝導となる。そのようなバンドが存在しなければ、界面で散乱されて電極内に入るしかないので、界面の電子状態を反映した電気伝導となると考えられる。以上のことを調べるために Cr(001) 超薄膜を挿入した MTJ を作製し、電気伝導を調べた。

Cr(001) のバンド構造の特徴はフェルミ準位近傍に $\Delta 1$ バンドが存在しないことである(図 5)。 $\Delta 1$ バンドはトンネル素子においてもっともトンネル電流に寄与するバンドであることが、Butler らにより指摘されている[3]。すなわち、トンネル電子は AlO/Cr(001) 界面で散乱され、電気伝導は界面の電子状態の影響を大きく受ける。

ところで、Cr(001) 層の磁気構造は層状反強磁性構造と呼ばれ、同じ原子面内では磁気モーメントは揃っており、次の原子層とは反強磁性的に積層している。つまり、強磁性原子層が隣接原子層と逆向きに積み重なっている。Cr(001) 層全体としては磁化は持たないが、最表面あるいは界面原子層だけに注目すれば、強磁性的配列でありスピン分極している。図 8 に Cr(001) 層の磁気構造と MTJ の膜構造を示す。図 8 のような MTJ を作製すれば、①バンド構造から電気伝導は界面の電子状態に支配され、②層状反強磁性磁気構造のため界面の原子層はスピン分極している。以上より、有限の TMR 効果を観測することができるかと期待される。また、Cr(001) 層の厚さを変えていけば、一原子層ごとに界面磁化の方向が反転するため、TMR は 2 原子層周期で符号を変えて振動すると予想される。

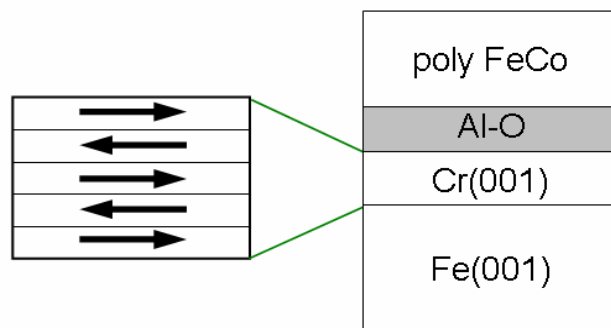


図8 Cr(001)の層状反強磁性磁気構造とMTJの膜構成

図 9 に TMR 比の Cr(001) 膜厚依存性を示す。Cr(001) が 0 \AA (つまり Fe(001) 電極) の場合は、12%程度の MR が観測されるが、約 3 \AA (2 原子層) 程度の Cr(001) の挿入により、MR は大きく減少する。これは、Cr(001) 層の挿入により多くの電子が界面で散乱され、Fe(001) の電子状態を感じられなくなったことを示している。また、さらに Cr(001) 層を厚くすると、MR は完全に消失するのではなくて、振動しながら小さな MR を示す。振動周期は約 2 原子層である。このことは、前述の MTJ のトンネル伝導の描像が正しいものであることを示している。

さらに、TMR 比の振動のバイアス依存性を図 10 に示す。2 原子層周期の振動にはバイアスに依存した振動周期の変化などは見られない。このことは、この振動が Cr(001) 層内

の量子井戸準位によるものではなく、層状反強磁性磁気構造によるものであることを明瞭に示している。さらに、800mV 付近で、2 原子層周期振動の位相が突然変化する。これは、ちょうどこのエネルギー準位に Cr(001)内の $\Delta 1$ バンドエッジが存在することに起因すると考えられる。

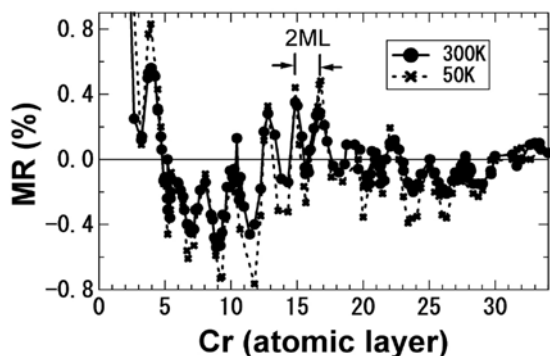


図9 Cr(001)挿入層をもつMTJのTMR比のCr(001)膜厚依存性。

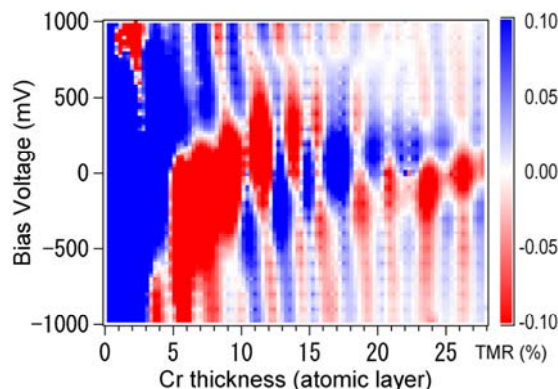


図10 Cr(001)膜厚に対する振動のバイアス電圧依存性。実線(0.8V)付近で突然振動の位相が変化する。点線は16原子層周期の大きな構造。

以上のように、TMR 効果におけるバルクの効果、界面の効果が、電極中のバンドへのトンネル電子の波動関数の接続によって決定されていることが分かった。今後、MTJ は MgO バリアを用いた高品質 MTJ へとシフトしていくと考えられるが、電極（およびトンネル障壁）のバンド構造を考慮することによって、伝導特性を制御し、機能の向上を図ることが可能であることが分かった。

[3] W. H. Butler et al., *Phys. Rev. B* **63**, 054416 (2001).

<Fe(001)電極を持つMTJのFe(001)電極依存性>

これまでの研究により、TMR 効果におけるバルクの効果、界面の効果の違いが明確になった。しかし、界面の効果とバルクの効果は明確に区別されるものではなく、具体的にその特性長を調べた研究は余り無い。そこで、単結晶 Fe(001)/Cr(001)電極を持つ MTJ を作製し、TMR 効果の Fe(001)電極膜厚依存性を調べた。

その結果、Fe(001)膜厚を非常に薄くすると TMR 比が減少することを発見した。TMR 比と Fe(001)膜厚の関係を図 11 に示す。2.5 Å 以下の膜厚では、Fe(001)層が薄くなると TMR 比も減少することが分かる。このことは以下のように解釈することができる。TMR 比はトンネルする直前の電子状態と、トンネル直後の電子状態のスピンの分極率で決定される。すなわち、トンネル後最初に散乱された場所のスピンの分極率によって決定されるということである。ここで、トンネルバリア/Fe(001)界面から、最初の散乱の位置までをその電子の侵入長と定義する。侵入長が長い電子ほど電極の内部まで入って散乱される。超薄 Fe(001)/Cr(001)の場合、電子は Fe(001)層を散乱されることなく通り抜けて、

Cr(001)まで達すると考えられる。Cr層内では全体のスピンの分極は0であると考えられるので、Cr層で散乱される電子はMRを示さないと考えられる。Fe(001)層が薄くなるほどCr層に達する電子は増えるので、Fe(001)が薄いほど、MR比は減少していると考えられる。このモデルの模式図を図12に示す。

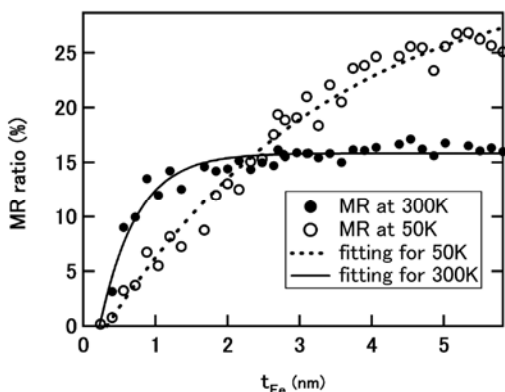


図11 TMR比のFe(001)膜厚依存性。黒丸は室温、白丸は50Kでの測定結果。実線と点線は本文中のモデルに基づいたフィッティング結果。

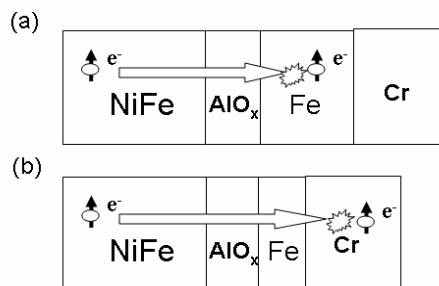


図12 (a)ではFe(001)が十分に厚く、トンネルしてきた電子はFe(001)中電散乱されるためMRを示す。(b)ではFe(001)が薄くバリスティックにCr(001)に達してしまうためMRを示さない。

このモデルは、MR比の温度変化からも支持される。実験では十分に厚いFe(001)層を持つMTJは低温ほど大きなTMR比を示すが、非常に薄いFe(001)層を持つMTJでは低温でTMR比が減少するというこれまで観測されなかった温度変化を示した。この現象は次のように理解することができる。低温ではフォノンなどによる非弾性散乱が抑制されるため、電子の侵入長は長くなる。その結果、薄いFe(001)層を持つMTJでは、低温においてCr層に達する電子が増えるためにMR比が減少してしまうと考えられる。十分厚いFe(001)層の場合は、低温ではスピンフリップ散乱が抑制されるのでTMR比は増大する。また、あるFe(001)膜厚のMTJにおいては、両効果が相殺されTMR比が温度に依存しないことも分かった。

このように、TMR効果を界面かバルクかという議論からさらに実空間でのTMRの位置依存へと推し進めた研究はあまり例が無い。唯一、T. Zhuらによる研究[4]があるが、スパッタ法による多結晶を用いていること、電極をFeCo/NiFeという強磁性の2重層としているためMRの膜厚依存性が不明瞭であること、温度変化のデータが無いことなどから、TMR効果の物理に迫るものではなかった。本研究の結果は実際の膜厚に直接結びついた結果であるので、今後の素子における膜厚の最適化を行ううえで重要な知見といえる。

[4] T. Zhu et al., *Phys. Rev. B* **66**, 094423 (2002)

<二重強磁性トンネル接合を用いた三端子素子の開発>

MTJを用いた新規デバイス開発には三端子素子化が不可欠であると考えられる。さらに、スピン偏極量子井戸準位を利用したスピン偏極共鳴トンネルトランジスタの実現には、縦型三端子素子への加工が必要とされる。しかし、このデバイスは数 nm という非常に薄い中間層（ベース層）を持つため、縦型三端子素子加工は非常に困難である。また、ベース層が非常に薄いためゲート層自身による抵抗、いわゆるベース抵抗の影響が無視できないと考えられる。そこで、強磁性二重トンネル接合の三端子加工を試み、さらに、ベース抵抗が三端子素子の伝導特性に与える影響の評価を試みた。

加工には、スパッタ法により作製した AlO 二重障壁膜を用いた。ベース層は NiFe 層、膜厚は 5nm、及び 3nm を用いた。加工は、フォトリソグラフィ法、Ar イオンミリングを用いた。作製した素子サイズは、約 $60 \times 100 \mu\text{m}^2$ である。図 13 に、①最上層－中間層、②中間層－最下層、③最上層－最下層の磁気抵抗曲線を示す。①と②が完全に異なる形状であること、また③が①と②を加えることで再現できることから、3nm と非常に薄い中間層にもかかわらず、各電極で独立に電気的接触が取れていることが確認された。また、本素子のベース抵抗は約 200Ω であり、NiFe 膜の電気抵抗に直すと良く一致することが確かめられた。

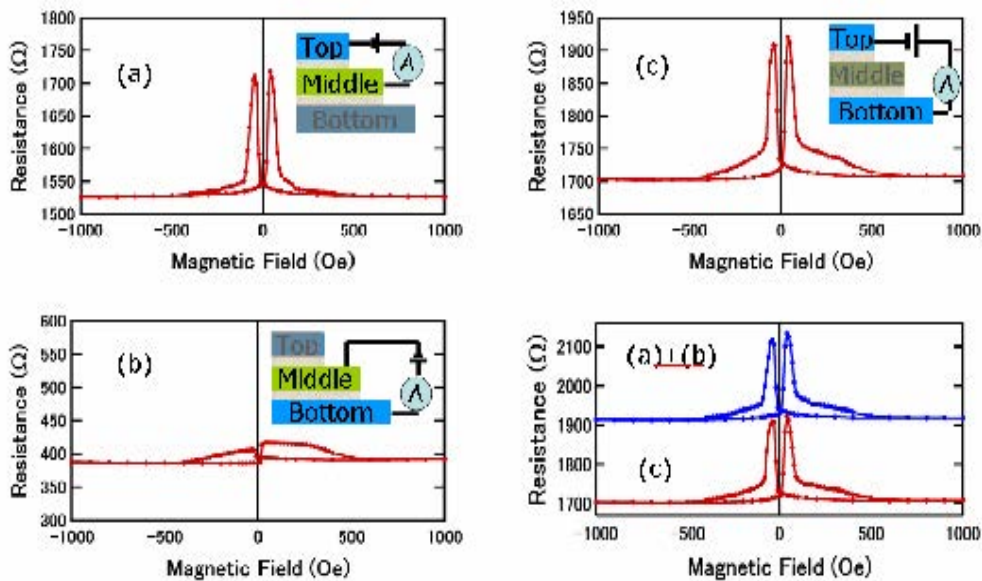


図13 (a)最上層－中間層(b)中間層－最下層(c)最上層－最下層間の磁気抵抗曲線(d)は(a)と(b)を足し算したものと(c)との比較。同じ形状であるということは、(c)は(a)と(b)の直列つなぎであることを示している

この素子に、各接合に様々な電圧を印加した状態で磁気抵抗効果を測定し、また、モデル回路を想定し、実験結果の再現を行った。その結果、本素子の電気伝導は、ベース抵抗を含んだ通常の電気回路として取り扱うことで再現できることが分かった。また、

各接合に印加する電圧のバランスによって、見かけ上 MR 比が増大したり、MR の符号を反転したりすることがわかった。

本素子では、ホットエレクトロンによる非線形伝導が期待されたが、1V までの電圧印加では、非線形性は観測されなかった。これは、中間層が多結晶の NiFe であり、非常に散乱が多いこと、AlO_x バリアの障壁高さは 1.5V 程度と見積もられ、バリアよりも高エネルギーであるホットエレクトロンが得られなかったことが原因と考えられる。同様の、強磁性トンネル接合を用いた三端子素子としては、半導体とのショットキーバリアを用いた強磁性トンネルトランジスタ (MTT) があるが [5]、ショットキー障壁を用いているため、電圧値の自由度が少なく、また、半導体側に強磁性体を用いることができない。それらの点において、強磁性二重トンネル接合を用いた方が利点が多い。本研究により、二重トンネル接合の縦型三端子素子の基本的な伝導特性が明らかになった。この知見は今後の新スピントロニクス素子開発の指針を与えるものである。特にベース抵抗の問題は、素子作製時に接合抵抗値を決定する際に重要である。中間層の品質の向上、MgO など他の材料への応用などは今後の課題である。

<強磁性トンネル接合におけるスピン注入磁化反転>

・背景 1995 年のアルミナ系強磁性トンネル接合 (MTJ) における室温で約 20% の大きなトンネル磁気抵抗効果 (TMR 効果) の発見⁽¹⁾が一つのきっかけとなり MTJ をベースとする磁気抵抗ランダムアクセスメモリ (MRAM) の開発が始まった⁽²⁾。MRAM は磁化を情報担体とするため不揮発、高速、かつ高書き換え耐性をもつユニバーサルメモリとして期待が大きい。MRAM の読み出し動作および書き込み動作に必要とされる MTJ の特性と課題を整理すると次のようになる。

読み出し時には MTJ の抵抗の大小 (2 つの磁性層の磁化が平行時には抵抗小、反平行時には大) で 0 状態または 1 状態を判別するため、高抵抗と低抵抗の抵抗値の差が大きい、つまり、MR 比が大きいことが必要となる。多数のセル間にはある程度の抵抗値お

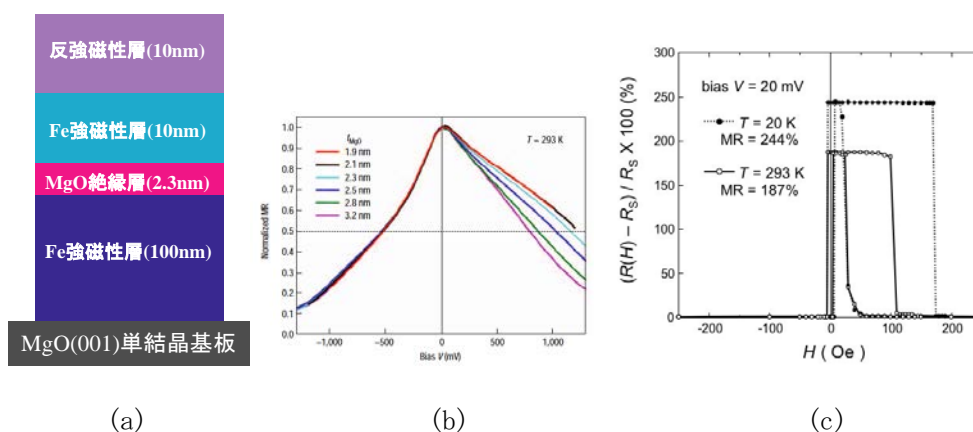


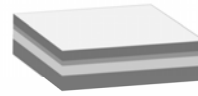
図14 (a) Schematic illustration of the layer stack of the Fe/MgO/Fe MTJ. (b) Magnetoresistance curve of the MTJ. (c) Bias voltage dependence of the normalized MR ratio of the Fe/MgO/Fe MTJ.⁽⁵⁾

よび MR 比のばらつきが不可避である為に抵抗値の差は大きければ大きいほど良い。1Gbit クラスでは抵抗値一数キロ Ω 、MR 比 200%程度が必要と考えられる。しかし、アモルファスの Al-O を絶縁層に用いた MTJ では MR 比は最高で 70%前後と小さいため、MR 比の増大が重要である。2004 年になって MgO を絶縁層とする MTJ で室温において 88%⁽³⁾ ついで 187%⁽⁴⁾ の値が報告され大きなブレークスルーとなった。図 14 に湯浅らの結果を示す⁽⁴⁾。試料は MgO(100) 単結晶基板上に MBE で作製された単結晶 Fe/MgO/Fe サンドイッチ膜を微細加工により MTJ の形状に形成したものである。ゼロバイアスの値で規格化した MR 比のバイアス依存性をみると MgO=2.3~2.5 nm の場合正バイアスのみであるが $V_{1/2}$ (MR 比が半減する値) が 1V を超えており、バイ

アス耐性もアルミナ系に比べ同等以上であることも示された。この報告後、MgO 系 MTJ の MR 比は急激に増大し 355%に達している⁽⁵⁾。このように MgO 系 MTJ の登場により MRAM の読み取りの課題である大きな MR 比に関する課題はほぼ解決の目処がたった。

書き込み時には磁化反転させる為に消費する電流および電力が十分小さいことが求められる。大容量化のためには個々の MTJ の強磁性体セルサイズを小さくする必要がある。例えば 1Gbit クラスの MRAM では MTJ のサイズは一辺が 100nm 前後になるとみこまれる。このような小さなセルでは強磁性体内部の反磁界の影響のために保磁力が増大し、ワード線/ビット線に電流を流し発生する磁界により MTJ セル中のフリー層の磁化を反転させる従来型の書き込み方法では、セルサイズの減少とともに書き込み電流が増加してしまう。そのため、消費電力の増大、電流を発生させるトランジスタおよびセル選択トランジスタのサイズの増大をまねき、高密度化を阻害する要因となっている。これに対して、スピン偏極した電流をセルに流して磁化を反転させるスピン注入磁化反転が高密度 MRAM の書き込み方式として注目されている。Slonczewski は電流を運ぶ電子のスピンとフリー層中の磁化をになう局在スピンの間でスピン角運動量のトランスファーによりトルクが生じ磁化が反転することを理論的に予言した⁽⁶⁾。この現象が Co/Cu/Co の金属 GMR 素子において実験的にも確認され⁽⁷⁾、実用化を目指した研究開発が活発化した。最初の実験後しばらくは全金属の CPP-GMR 素子で研究が進められていたが、GMR 素子では抵抗値、MR 比のいずれも小さく MRAM には不適であった。ついで低抵抗のアルミ

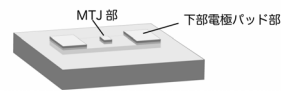
(a) 強磁性金属薄膜/絶縁体薄膜/強磁性体薄膜 3 層構造の作製



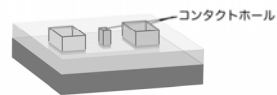
(b) 下部電極形状と EB 位置合わせマークの形成 (リソグラフィー+エッチング)



(c) MTJ 部およびパッド部の形成 (リソグラフィー+エッチング)



(d) 絶縁膜形成およびリフトオフによるコンタクトホール形成



(e) 上部電極形成 (Cr/Au 薄膜作製+リソグラフィー+エッチング)

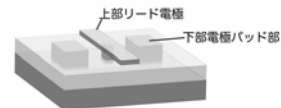


図15 Microrfabrication process of a very small MTJ.

ナ系 MTJ で実験が行われたが、やはり数%と MR 比が小さく、また、トンネル電流ではなくピンホールを通じた GMR 的な伝導による可能性も否定できないものであった⁽⁸⁾。

○MgO 系強磁性トンネル接合におけるスピン注入磁化反転

我々は前述の巨大 TMR 効果を示す MgO 系 MTJ でスピン注入磁化反転を実現することが重要であるとの立場から、いち早く実証実験を開始した^{(9), (10)}。幸いにも MBE のみならず UHV-マグネトロンスパッタによっ

ても高品質の MgO 絶縁層が作製可能であることが明らかになったため⁽¹¹⁾、大口径ウエハーに薄膜を作製し効率よく実験を進めることができた。以下、薄膜作製方法、微細加工方法およびスピン注入の実験方法および結果について述べる。

●薄膜作製方法 薄膜の作製は UHV-マグネトロンスパッタ Canon ANELVA-C7100 を用いた。作製した薄膜は Buffer/Pt-Mn/Co-Fe/Ru/Co-Fe-B/MgO/Co-Fe-B/Ta/Ru を基本とする積層膜である。作製時の Ar 圧は 0.02 Pa、基板温度は室温である。MgO 層は MgO ターゲットを用いて rf 放電により直接スパッタした。同じ膜構成でフリー層を Co-Fe-B として MgO が 1.8 nm と比較的厚い場合、 $RA=420 \Omega \cdot \mu m^2$ 、 $MR=230\%$ のすぐれた特性を達成している⁽¹¹⁾。MgO 膜厚が減少し 1 nm 程度以下になると MR 比が急激に減少する傾向を示した。そこで一部の試料においては MgO 層の下に薄い金属 Mg 層を挿入した。Mg 層の挿入により薄い MgO 膜厚で低抵抗高 MR 比の特性を実現しやすくなった^{(12), (13)}。金属 Mg は MgO 層の結晶性を向上させ、MR 比の増大に寄与していると考えられる。

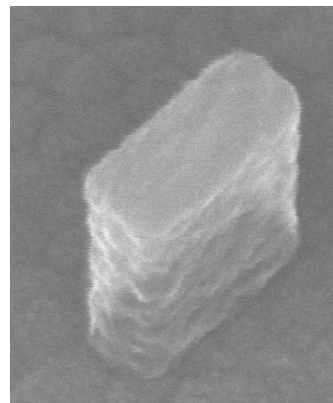


図16 SEM photograph of a mask pattern. Dimension of a shorter side width is about 70nm.

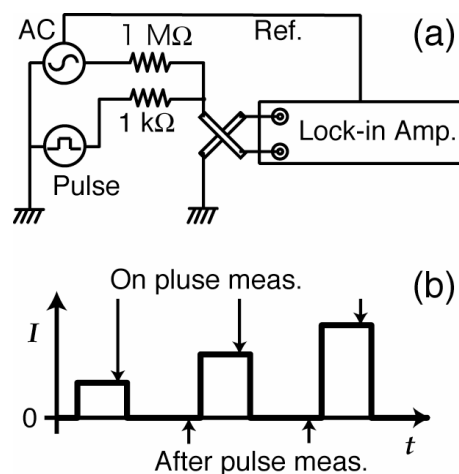


図17 Circuit diagram (a) and measurement sequence (b).

●**微細加工** 微細加工はフォトリソグラフィーと電子線リソグラフィーを組み合わせ
て用いて行った。図 15 に微細加工プロセスを示す。直径 6 インチのウエハーを 20 mm
角基板にダイシングしたのち、各基板ごとに微細加工を行う。(b)まず始めに下部電極
の形成を行う。この時同時に電子線リソグラフィーで使用する位置合わせマークも作製
する。(c)電子線リソグラフィーにより MTJ のセル形状とコンタクトパッドを描画する。
図 16 に現像後のレジストパターンの SEM 写真を示す。デザインは 50 nm x 150 nm で
あるが、実際は 70 nm x 160 nm 程度になっている。形状は長方形あるいは楕円形とし
た。その後、Ar イオンミリングにより MTJ の接合部分を形成する。形成後のサイズは
再付着により片側 5-10 nm ずつ程度大きくなっている。ミリングの最適深さはわずかず
つミリング時間をずらした試料を幾つか作製し、それらの MR 特性から決定した。(d)
ミリング後あまり時間をおかずに SiO₂ 膜 150nm をスパッタ法により作製する。ついで
リフトオフプロセスにより MTJ 接合部上部の SiO₂ を除去しコンタクトホールを形成す
る。この時同時に下部電極にアクセスする為のコンタクトパッドの表面も露出される。
Fig. 3(b)はコンタクトホール部の SEM 写真である。(e)上部リード線のための Cr/Au 2
層膜を真空蒸着またはスパッタ法により基板全面に形成する。薄膜形成前に試料表面を
Ar ミリングまたは逆スパッタにより 20 秒程度クリーニングする。Cr/Au 2 層膜上にフ
ォトリソグラフィーにより上部電極パターンを形成し、Ar ミリングにより切り出す。
残ったレジストを除去して完成となる。

●**測定方法** 本実験で用いた測定システムの模式図を図 17 に示す。磁気抵抗効果の測
定は交流 4 端子法により 97 kHz, 1-100 マクロアンペアのセンス電流を流して行った。
サンプルの面内で MTJ の長軸方向に平行に最大 1 kOe の磁界を印加した。スピン注入磁
化反転の測定にはパルス法を用いている⁽¹⁴⁾。サンプルに幅 0.03-100 ms で高さを 0.1mA
のステップで変化させたパルス電流を流した。抵抗値の測定は図に示すようなタイミン
グで行った。パルス電流が OFF の場合、抵抗値のバイアス電圧依存性の影響を受けない
ため、抵抗値の変化は磁化の変化によるものと見なすことができる。本方法でパルス幅

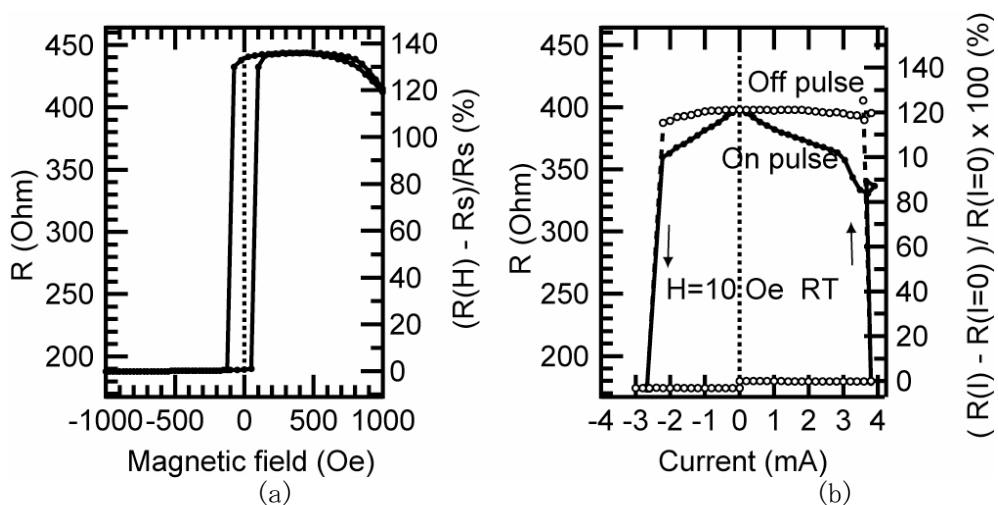


図18 (a) R - H plot and (b) R - I plot of the Co-Fe-B/MgO/ Co-Fe-B MTJ.

を変えスイッチング電流のパルス幅依存性を解析すると、熱揺らぎによりスイッチングがアシストされる効果を除いた本質的なスイッチング電流を求めることができる。さらに、磁化の安定性を示す指標である $K_u V / k_B T$ を求めることができるため、MRAM のセルとして重要な熱安定性も評価できる優れた方法である。

●実験結果 図 18 に Buffer/Pt-Mn/Co-Fe/Ru/Co₆₀Fe₂₀B₂₀ (3 nm)/MgO(0.8 nm)/ Co₆₀Fe₂₀B₂₀ (3 nm)/Ta/Ru MTJ で最初に示されたスピン注入磁化反転の結果を示す⁽⁹⁾。

MTJ の接合部形状は約 100 nm x 200 nm の長方形である。MR 比は約 130%，Resistance-Area-Product ($R \cdot A$) は約 $3 \Omega \cdot \mu\text{m}^2$ であり、低抵抗かつ高 MR 比が実現されていることがわかる。 $R-I$ プロットでは +4 mA および -3 mA 付近で平行から反平行へ、および、反平行から平行へと磁化が反転し、高抵抗状態（反平行）と低抵抗状態（平行）の間をスイッチングしていることがわかる。スイッチング電流密度は $J_c^+ = 2.4 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$, $J_c^- = -1.6 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 、平均すると $J_{c0}^{AV} = 2 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ であった。このように従来の GMR および MTJ に比べはるかに大きい MR 比を示す MTJ において初めてスピン注入磁化反転を観測することに成功した。

ここで、MRAM に用いる場合、スイッチング電流密度としてどのくらいの値が目安となるのかを試算してみる。MTJ セルの面積は 1Gbit クラスの MRAM の場合 100 nm 前後の値になると予想され、また、形状磁気異方性も必要であることからここではセル形状を 80 nm x 160 nm と仮定する。書き込み時に流す電流値を制限する要因は配線、パストランジスタの流せる最大電流値および MTJ の静電破壊電圧の内最も低いものが上限をきめる。一方スイッチング電流が低すぎる場合、読み出し時に書き換えてしまう危険性が生じる。そのため、書き込み電流にくらべ、読み出し電流を十分低く取らなければならないが、その場合、出力信号も当然弱くなる。ここでは読み出し電流を 0.02 mA、書き込み電流を 0.1 mA とする。200%以上の MR 比が確保できれば読み出し電流が 0.02 mA でも十分な信号電圧がみこめる。以上の議論から書き込み電流を 0.1 mA とすると電流密度としては約 $8 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ となる。今回の実験の結果をこの値と比較するとまだまだ高すぎるといえる。これを低減する方法として、磁化の低い磁性材料をフリー層に用いる⁽¹⁵⁾、スピンのダンピング定数の低い材料をフリー層に用いる⁽¹⁶⁾、フリー層の両側にピン層を配置するダブルスピンフィルター構造を用いる⁽¹⁷⁾等が提案されている。さらに、GMR では Ru 膜をフリー層のすぐとなりに配置するとスイッチング電流が低下することが報告されている⁽¹⁸⁾。これらのことをすべて併せることで MRAM に応用する場合の目標値はクリアできると期待される。

●スピン注入による高速磁化反転

スピン注入磁化反転を MRAM の書き込み方法として応用する場合、書き込み動作に要する時間つまり磁化反転時間が短いことが求められる。そこで、短パルス電流によりスピン注入磁化反転を試みた⁽¹⁹⁾。測定に利用した回路は、図 19 の通りである。本測定では 1Hz で電流をスイープして R-I 曲線を描かせ、その最中、ちょうど電流がゼロになった瞬間に短パルスを試料に与えている。そして、パルスによって磁化反転が生じたか否かを引き続き抵抗測定によって判定する。試料には CoFe/Cu/CoFe GMR 膜を 100×150nm の楕円断面を持つピラー状に加工したものを用いた(図 20 (A))。測定例を図 24 (C) に示す。パルス幅が短く、パルス電流が小さいときはパルスによる磁化反転は生じず、測定

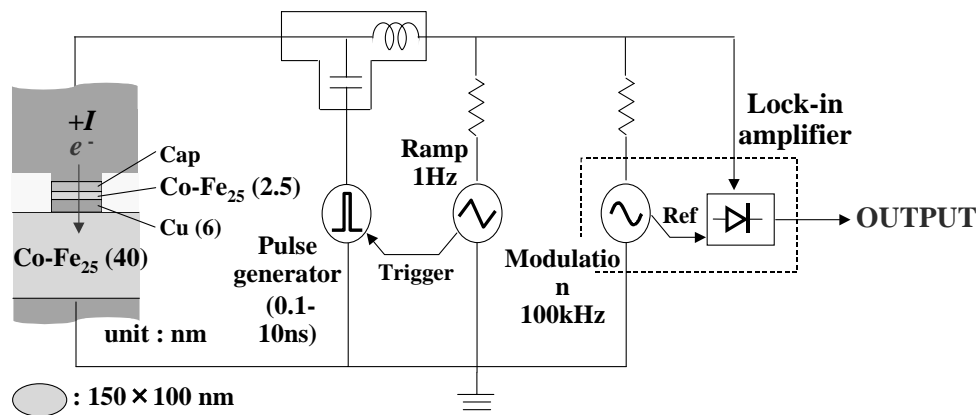


図19 短パルスによる磁化反転の測定回路

系は通常の R-I ヒステレシス曲線を描く。一方、パルス幅が大きくパルス電流も大きいときは、パルスにより磁化反転が生じるためヒステレシス曲線はゼロ電流のところ磁化反転があったことを示すようになる。この中間の状態では、これら 2 つの状態が確率的に現れた。即ち、中間的な電流だからといって中間的な角度まで磁化が回転してそこで止まってしまうと言うことは無かった。この測定の結果、電流値を室温における臨界電流の 3~4 倍とすることにより 200psec という非常に短い時間パルスで磁化反転が可能で有ることが示された。

参考文献

- [1] T. Miyazaki and N. Tezuka: J. Magn. Magn. Mater., **139**, L231 (1995).
- [2] S. S. P. Parkin et al.: J. Appl. Phys. **85**, 5828 (1999), Tehrani et al., IEEE Trans. Magn., **36**, 2752 (2000).
- [3] S. Yuasa, et al.: Jpn. J. Appl. Phys., **43**, L588 (2004).
- [4] S. Yuasa, et al.: Nature Materials, **3**, 868 (2004).
- [5] S. Ikeda, et al., Jpn. J. Appl. Phys., **44**, L1442 (2005).
- [6] J. C. Slonczewski: J. Magn. Magn. Mater., **159**, L1 (1996).
- [7] J. A. Katine, et al.: Phys. Rev. Lett., **84**, 3149 (2004).
- [8] Y. Huai, et al.: Appl. Phys. Lett., **84**, 3118 (2004).
- [9] H. Kubota, et al.: Intermag 2005 EQ-05, IEEE Trans. Mag., **41**, 2633 (2005).
- [10] H. Kubota, et al.: Jpn. J. Appl. Phys., **44**, L1237 (2005).
- [11] D. D. Djayaprawira, et al.: Appl. Phys. Lett., **86**, 092502 (2005).
- [12] 前原大樹ら: 第 29 回日本応用磁気学会学術講演会, 20-pA-3 (2005).
- [13] K. Tsunekawa et al.: Appl. Phys. Lett., **87**, 072503 (2005).
- [14] K. Yagami, et al.: J. Appl. Phys., **97**, 10C707 (2005).

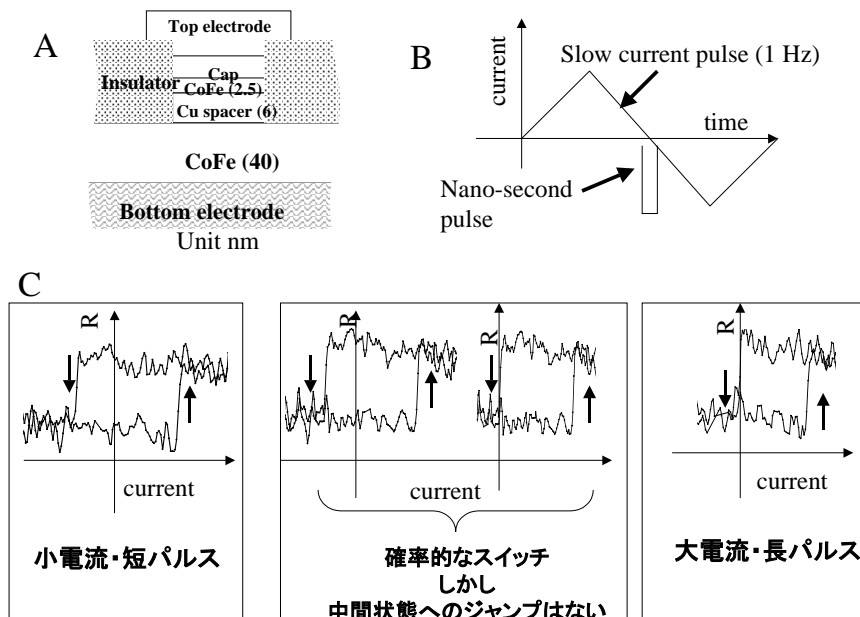


図20 短パルスによる磁化反転の観測例. A. 試料断面模式図. B. 磁化反転用の三角波電流と短パルスの重畳. C. 測定例.

- [15] K. Yagami, et al.: Appl. Phys. Lett., **85**, 5634 (2004).
- [16] M. Oogane, et al.: 50th Magnetism and Magnetic Materials Conference, EH-15, (2005).
- [17] S. Haneda, et al.: 49th Magnetism and Magnetic Materials Conference, HA-05, (2004).

[18] Y. Jiang, et al.: Nature Material, **3**, 361 (2004).

[19] A. A. Tulapurkar, T. Devolder, K. Yagami, P. Crozat, C. Chappert, A. Fukushima, Y. Suzuki, Appl. Phys. Lett., **85**, 5358-5360 (2004).

<スピントルクダイオード効果>

●スピントルクダイオード効果

スピン注入素子の更なる機能を探求する第一歩として、スピン注入素子にダイオード効果を持たせることを試みた。スピン注入素子は電流注入の向きによって高抵抗状態と低抵抗状態になるので、そのまま整流作用があるといえる。しかし、その応答は大きなヒステレシスを示すので記録素子としては利用できるが、整流器として利用するには都合が悪い。そこで、高周波電流を注入することより磁性層に高周波トルクを与え磁気共鳴を起こすことを試みた。磁気共鳴が生じる条件下では、非常に小さな注入電流でも磁化が効率的に振動すると考えられる。後述するように磁化の振動と与えた電流の振動周期が一致すれば直流電圧が発生すること、即ち整流作用が期待される。

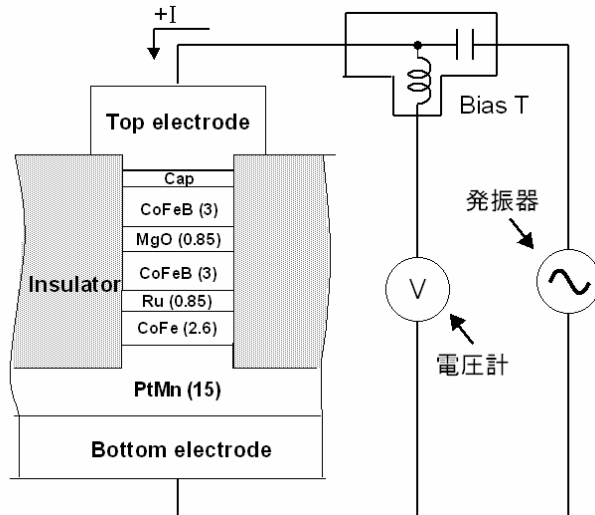


図21 スピントルクダイオード効果の測定回路

磁気共鳴が生じる条件下では、非常に小さな注入電流でも磁化が効率的に振動すると考えられる。後述するように磁化の振動と与えた電流の振動周期が一致すれば直流電圧が発生すること、即ち整流作用が期待される。

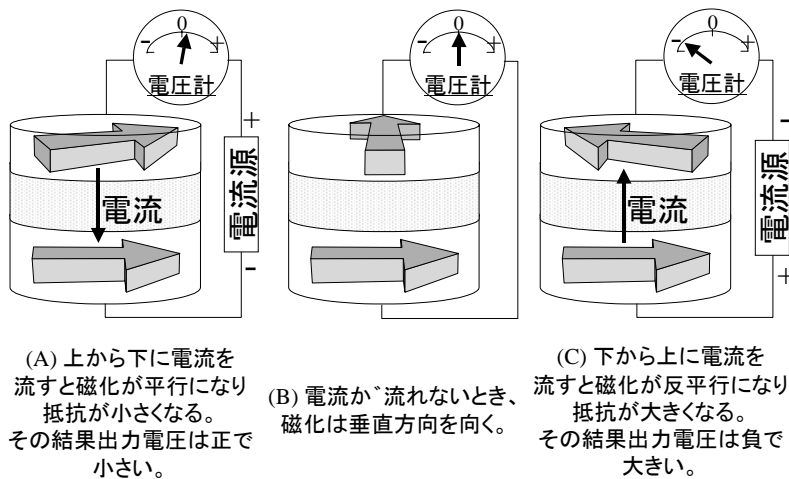


図22 スピントルクダイオード効果の原理

図 21 に測定に利用した試料と測定回路を示す。試料は CoFeB/MgO/CoFeB トンネル磁気抵抗素子[1]である。電子線リソグラフィによって素子を $100 \times 200 \text{ nm}$ のピラー状に加工した。電気抵抗は約 100Ω である。試料に周波数可変な高周波電流を加えて、そのときに発生する直流電圧をナノボルトメーターで測定した。高周波信号と直流信号を分離するためにバイアス T を用いた。試料には外部から静磁界が加えられている。静磁界の方向は磁化固定層の磁化の方向から膜面内で 30 度傾けてある。このことによって、電流を印加しないときのフリー層の磁化は固定層のそれと適当な角度 θ_0 を持っている。まず、試料に角振動数 ω の RF 電流を注入する。

$$I = I_0 \sin \omega t \cdots (1)$$

この振動する電流によってフリー層の磁化にトルクが働き、フリー層の磁化の方向 θ が同じ振動数で振動する。

$$\theta = \theta_0 + aI_0 \sin(\omega t + \beta) \cdots (2)$$

ここで、磁化の振動振幅は注入 RF 電流の振幅 I_0 に比例する。また、 β は磁化の振動の位相を表している。この結果、素子の電気抵抗も同じ周波数で振動する。

$$R = R_0 + \Delta R \cos \theta = R'_0 - aI_0 \Delta R \sin(\omega t + \beta) \sin \theta_0 \cdots (3)$$

素子両端に加わる電圧は電流 \times 抵抗である。すなわち、

$$V = RI = (R'_0 - aI_0 \Delta R \sin(\omega t + \beta) \sin \theta_0) I_0 \sin \omega t \cdots (4)$$

この式を見ると、抵抗と電流の双方が ω で振動するためにその積の項が現れることが分る。この項は、 $2 \sin(\omega t + \beta) \sin \omega t = \cos \beta - \cos(2\omega t - \beta)$ を用いて

$$V = -\frac{a}{2} \Delta R \sin \theta_0 I_0^2 \cos \beta + R'_0 I_0 \sin \omega t + \frac{a}{2} \Delta R \sin \theta_0 I_0^2 \cos(2\omega t - \beta) \cdots (5)$$

となる。上式より、素子両端には角振動数 ω の成分以外に $\omega \pm \omega$ 、即ち、角振動数 2ω および dc 成分が現れる。この様にして直流電圧が現れることを我々は「スピントルクダイオード効果」と名づけた[2]。式から明らかなように発生する電圧は注入電流の振幅の二乗に比例する。即ち二乗検波となる。また、直流電圧の項は $\cos \beta$ を係数として含んでおり位相敏感で有ることが分る。

図 22 に以上の機構を簡単に図示した。図では簡単のために電流が流れないとき、フリー層の磁化は、固定層の磁化と直交しているとする。上(フリー層)から下(固定層)に電流を流す瞬間には磁化が平行になり抵抗が低くなるので小さな電圧しか発生しない。一方、下から上に電流を流す瞬間には磁化が反平行になるので大きな電圧が発生する。従って、時間的な平均としては負の直流電圧が発生する。

図 23 に実際に測定した直流電圧の注入電流周波数依存性を示す[2]。注入 RF 電流は約 0.55 mA で、室温における測定である。磁場の印加方向は固定層の磁化の方向と逆方向から 30 度傾けてある。注入電流の周波数がフリ

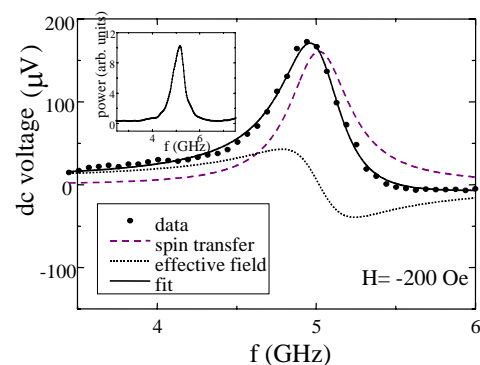


図23 スピンドायオード効果の測定例

一層の強磁性共鳴の周波数と一致すると大きな負の直流電圧が現れることが分る。実際のスペクトルは単純な単一のピークではなく多少非対称になっている。特に共鳴の中止からずれた周波数では正の電圧も現れる。これは、周波数によって注入電流により誘起される歳差運動の位相が変化するためであると考えられる。簡単な解析により、スピントランスファーにより誘起される共鳴は負の単一ピークとなるが、電流が作る磁場、または、磁場と同様に振舞うスピン注入トルク(いくつかの機構が考えられており、スピンアキュムレーショントルク、ベータ項、あるいは、モーメンタムトランスファーの項などと呼ばれている。)があると分散型のスペクトルが現れると予測される。実験結果は、フリー層に加わるトルクが単純なスピントランスファートルクだけでないことを示唆している。

挿入図は、同じ試料について測定したノイズスペクトルである。測定に当たっては、同様に-200 Oe の磁場を印加している。RF 電流の注入は行っていない。磁化の熱運動はトンネル素子の電気抵抗の激しい変化をもたらす。この変化を電圧として測定するために素子には、わずかな直流電流を流してある。熱励起ノイズスペクトルとスピントルク効果によるスペクトルの中心は一致している。

●**スピントルクダイオードの性能** 最後にスピントルクダイオードの性能を半導体 *pn* 接合ダイオードと比較する。前述したようにスピントルクダイオードは二乗検波特性を示す。より詳しい解析によると出力電圧は、

$$[V_{dc}]_{\max} \approx MR \frac{V_{ac}^2}{V_c}, \quad (6)$$

となる。ここで、*MR* は磁気抵抗効果の大きさ、*V_c* はスピン注入磁化反転に必要な電圧、*V_{ac}* は高周波信号電圧である。効率の良い整流作用を得るには *MR* が大きく、スピン注入磁化反転の臨界電圧の低い素子を用いるのが最適である。一方、半導体 *pn* 接合ダイオードの二乗検波出力は、

$$[V_{dc}]_{\max} \approx \frac{V_{ac}^2}{kT/e}, \quad (7)$$

と表される[3]。ここで、*kT/e*=25 mV は室温における熱運動のエネルギーである。従って、大きな *MR* を保ったまま、スピン注入磁化反転の臨界電圧を 25mV 以下にできれば、スピントルクダイオードはその性能で半導体ダイオードを上回る可能性がある。

参考文献

- [1] D. D. Djayaprawira, K. Tsunekawa, M. Nagai, H. Maehara, S. Yamagata, N. Watanabe, S. Yuasa, Y. Suzuki, and K. Ando, Appl. Phys. Lett. **86**(2005)092502.
- [2] A. A. Tulapurkar, Y. Suzuki, A. Fukushima, H. Kubota, H. Maehara, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe, and S. Yuasa, Nature, **438**(2005)339.
- [3] S. M. Sze, “Physics of Semiconductor devices” (John Wiley & Sons Inc.).

(2)得られた研究成果の評価及び今後期待される効果

本研究テーマは、「スピン注入による新機能創製」プロジェクトの中で最も応用に近いものであり、常に応用を意識しながら研究を進展させた。その結果、高度な単結晶作製技術を駆使することにより、スピンに依存した共鳴トンネル磁気抵抗効果(Science 2002, I.F.=31.853, Sitation=51)を実現できること、あるいは、トンネル磁気抵抗素子の強磁性電極表面にある1原子層に非常に敏感な素子を作製できること(Physics Review Letters, 2005, I.F.=7.218, Sitation=0)を示すなどの基礎的で重要な成果を上げた。これらについては現段階では応用が直接可能ではないが、本研究を基礎として始まった研究(さきがけ)においてこれまでにない非常に大きなトンネル磁気抵抗効果を示す全単結晶トンネル磁気抵抗素子が作られ、直接応用となる成果に発展している。

また、スピン注入磁化反転においてもGMRピラーにおける世界最高速度の磁化反転(Appl. Phys. Lett., 2005, I.F.=4.308, Sitation =9)、MgOバリアトンネル接合における世界最初のスピン注入磁化反転(Jpn. J. Appl. Phys., I.F.=1.142, Sitation=0)などの応用と直結した顕著な成果をあけることができた。

また、以上の成果を組み合わせることにより強磁性体ナノ構造がダイオードとなることを発見したことは(Nature, 2005, I.F.=32.182, Sitation=0)、増幅度のあるスピントルクトランジスタの実現可能性を実験的に示唆するものであり今後の発展が期待できる。

<3.2節にかかわる主要発表論文>

- (1) S. Yuasa, T. Nagahama, Y. Suzuki,
“Spin-Polarized Resonant Tunneling in Magnetic Tunnel Junctions”
Science, vol.**297**, no.5579, pp.234-237 (2002).
インパクトファクター：31.853
引用件数：51
- (2) S. Yuasa, T. Nagahama, T. Kawakami, K. Ando, Y. Suzuki
“A large quantum-well oscillation of the TMR effect”
J. Phys. D: Appl. Phys., vol.**35**, pp.2427-2431 (2002).
インパクトファクター：1.366
引用件数：1
- (3) 湯浅新治、長浜太郎、鈴木義茂、田村英一
「磁気トンネル接合のTMR効果と共鳴トンネル効果」
日本物理学会誌, vol.**58**, no.1, pp.38-42 (2003).
- (4) 長浜太郎、湯浅新治、鈴木義茂、田村英一
「単結晶電極を持つ強磁性トンネル接合のトンネル磁気抵抗効果」
日本応用磁気学会誌, vol.**27**, no.1, pp.14-20 (2003).
- (5) Nagahama, T; Yuasa, S; Tamura, E; Suzuki, Y
“Spin-dependent tunneling in magnetic tunnel junctions with a layered antiferromagnetic Cr(001) spacer: Role of band structure and interface scattering”
Phys. Rev. Lett. , vol. **95**, 086602 (2005).
インパクトファクター：7.035
引用件数：0
- (6) Nagahama, T; Yuasa, S; Suzuki, Y; Tamura, E

- “Quantum size effect in magnetic tunnel junctions with ultrathin Fe(001) electrodes”
J. Appl. Phys., vol. **91**, 7035 (2002).
インパクトファクター : 2.171
引用件数 : 2
- (7) Nagahama, T; Yuasa, S; Suzuki, Y; Tamura, E
“Quantum-well effect in magnetic tunnel junctions with ultrathin single-crystal Fe(100) electrodes”
Appl. Phys Lett., vol. **79**, 4381 (2002).
インパクトファクター : 3.44
引用件数 : 8
- (8) H. KUBOTA, A. FUKUSHIMA, Y. OOTANI, S. YUASA, K. ANDO, H. MAEHARA, K. TSUNEKAWA, D. D. DJAYAPRAWIRA, N. W. and Y. SUZUKI,
Evaluation of Spin-Transfer Switching in CoFeB/MgO/CoFeB Magnetic Tunnel Junctions”
Jpn. J. Appl. Phys., **44**, L1237 (2005).
インパクトファクター : 1.142
引用件数 : 0
- (9) A. A. Tulapurkar, T. Devolder, K. Yagami, P. Crozat, C. Chappert, A. Fukushima, Y. Suzuki,
“Sub-nanosecond Magnetization Reversal in Magnetic Nanopillars by Spin Angular Momentum Transfer”
Appl. Phys. Lett., **85**, 5358-5360 (2004).
インパクトファクター : 4.308
引用件数 : 9
- (10) A. A. Tulapurkar, Y. Suzuki, A. Fukushima, H. Kubota, H. Maehara, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe, and S. Yuasa
“Spin-torque diode effect in magnetic tunnel junctions”
Nature, **438**(2005)339.
インパクトファクター : 32.182
引用件数 : 0

3. 3 スピン注入磁化反転の研究

(1) 研究成果の内容

大谷グループでは、主にスピン注入磁化反転、スピントランスファー、拡散伝導や吸収緩和に着目して、主に2次元ナノスケールスピバルブ素子を用いて実験的及び理論的研究を次の7項目について行った。

① 非局所スピン注入ホール効果

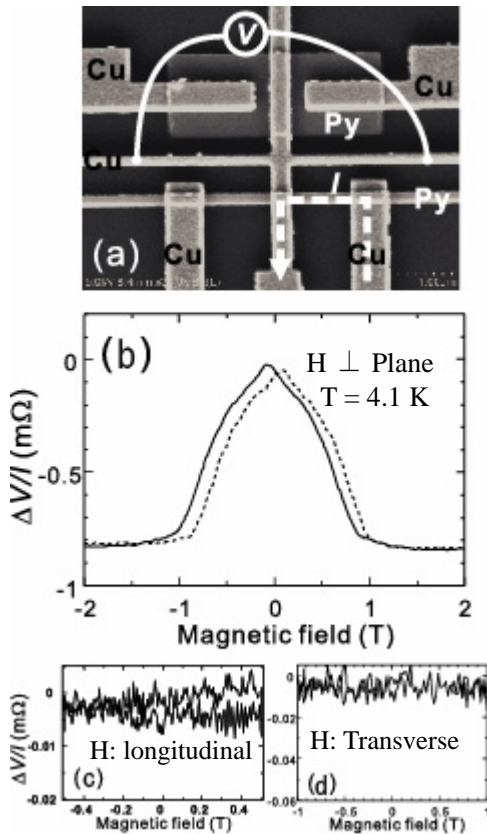


図1 非局所ホール効果の測定素子の (a)走査顕微鏡像、(b)ホール抵抗の紙面に垂直方向の磁場依存性、(c)面内方向Cu細線に平行に印加した場合のホール抵抗の磁場依存性、(d)Py細線に平行に磁場を印加した場合の磁場依存性。

垂直に印加した場合に非局所ホール抵抗が観測される。しかしながら、図1 (b)と(c)に示すように磁場を面内に制限して、Py細線に対して平行あるいは垂直方向に印加するとホール抵抗は観測されない。次に、純度の高いCu細線を用いて同様の実験を行ったところホール抵抗は消失してほとんど観測されない。この結果はこの現象が

非局所手法を用いた2次元スピン注入デバイスを用いて電荷の流れていない領域にスピン流を定常的に誘導する実験手法を確立した。この手法をホール効果測定素子に応用することによりスピン流から生じる非局所ホール効果の測定に成功した。

非局所スピン注入ホール電圧の測定のために図1に示すような素子を作製した。電流は、図1aに破線で示すようにパーマロイ(Py: Ni₈₀Fe₂₀合金)細線の下側を銅線に沿って上から下へ流れる。従って、Py細線より上側の部分には電流は流れずに、アップとダウンのスピンの流れが拡散的にお互い向きを異にして流れる。ここで、スピン流が生じている領域に非磁性不純物等によりスピン軌道相互作用に起因する散乱が生じると、両スピン流の軌道を同じ方向に曲げることになり、スピン量子化軸がデバイスの基板面に垂直の場合のみ横方向電圧が誘起される。図1(b)に示すように、磁場を

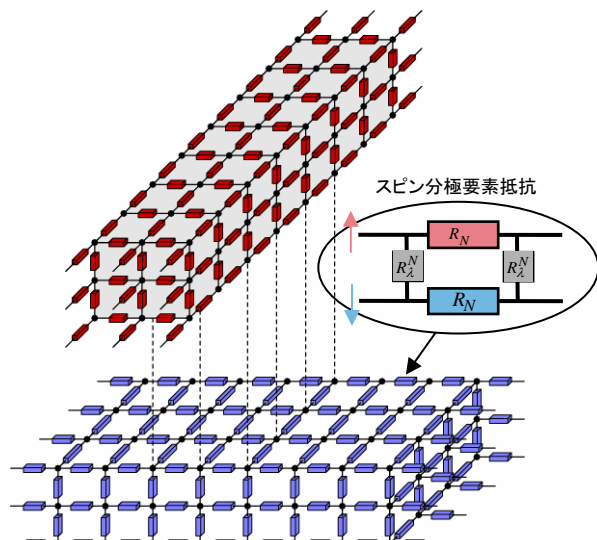
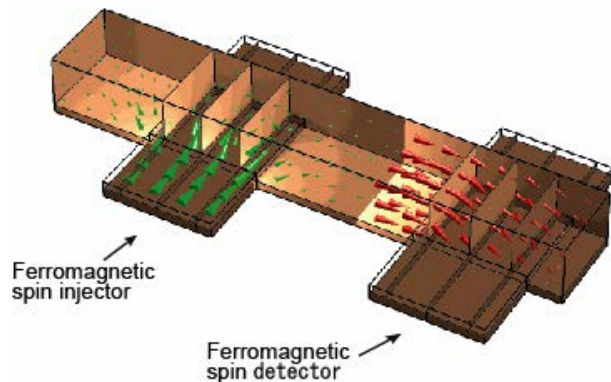


図2 計算に用いた3次元ネットワークの模式図。ネットワーク中の赤と青の抵抗体がそれぞれ強磁性体中および非磁性体中のスピン分極要素抵抗に相当する。また要素抵抗は楕円で囲まれた模式図で示すように2電流モデルにアップとダウンスピンチャンネルを短絡するスピン反転抵抗を組み合わせた等価回路からなる。

不純物によるスピン軌道相互作用に起因することを支持する。また、散乱方向がスピン流の方向と量子化軸との外積により決定されるという定性的な解釈と符合する。信号の磁場応答が偶関数であることや現象が150K以下の低温でのみ観測される等、更に詳細に発現機構を理解することが、研究課題として残った。



② 3次元スピン流分布の数値計算

前節で述べたようなスピン注入素子を用いた実験を行う上であらかじめ素子中のスピン流分布を知っていることは大変重要である。そこで、スピン緩和の起こり難さの指標となるスピン反転抵抗のコンセプト（注入されたスピンは拡散長で反転し、アップとダウンそれぞれのスピッチャネル間の短絡を引き起こす。その

図3 Py強磁性スピン注入・検出電極と銅細線中の計算から求められた3次元スピン流の分布。スピン流は左側のスピン注入電極から注入され右側のスピン検出電極へと銅細線中を電荷の流れを伴わずに伝播する。電荷の流れはスピン↑の流れを $J\uparrow$ 、↓の流れを $J\downarrow$ とすると両者の和すなわち $J\uparrow + J\downarrow$ となる。図の矢印はそれぞれの差すなわちスピン流 $J\uparrow - J\downarrow$ を示す。赤い矢印は見やすくするために緑の部分と比べ約10倍に増幅して大きさを示した。Cu細線の寸法は幅100nm×厚さ80nm、Py細線の寸法は幅120nm×厚さ20nm、端子間距離は120nmである。

ためにスピン分極は抑制されて減少する。スピン反転抵抗はこの短絡抵抗に相当する。)を導入することによりスピン注入能を最適化することを試みた。まず、図2に示すような1次元の拡散伝導に基づく2電流モデルにスピン反転抵抗を組み合わせて記述したスピン分極要素抵抗の3次元ネットワークを用いて素子を等価回路化することによりスピン流の3次元分布の数値計算を行った。図3に示す計算の一例を見て分かるようにスピン流は左側のスピン注入端子から注入され右側の検出端子へと銅細線中を電荷の流れを伴わずに伝播する。詳細を見ると右側に接続されている、スピン流に対する抵抗(スピン反転抵抗)の小さい強磁性検出端子に、スピン流が吸収されることによりCu細線中の分布は変化することが分かった。また、この計算手法を用いて、非局所スピンバルブ信号を計算したところスピン流の2次元的な空間分布の影響を再現することができた。

③ スピン吸収効果

この計算結果を考慮して、適当な大小関係にあるスピン反転抵抗を有する非磁性金属や強磁性金属の接合を用いて、特定の金属端子にスピン流を吸収させる素子の設計・作製を行い、実験的にスピン吸収効果（スピンシンク効果）を検証した。具体的には、非局所スピバルブ測定においてスピン注入端子とスピン蓄積検出電圧端子の間に付加的な強磁性細線を接続し、スピン流の吸収の影響を調べた。試料は、図4(a)の挿入図に示すような、間隔約200 nmで配置された線幅約100 nmの3本のPy細線とそれらと交差するCu細線からなる。図中に示すように、最左側のPy細線を電流端子に、最右側のPy細線を電圧端子に選び、注入端子と検出端子の間に、スピン流を吸収すると考えられるPy細線を接続して非局所スピバルブ測定を行った。また、比較のために、中央の付加的なPy細線が無い場合（図4(b)挿入図）のスピン信号の測定も行なった。図4(a)と(b)は、それぞれ、付加的なPy細線がある場合と、無い場合の非局所スピバルブの測定結果である。付加的なPy細線が無い場合は、0.24 mΩの明瞭なスピン信号が観測されるにも関わらず、Py細線が存在すると、0.04 mΩと僅かなスピバルブ信号しか観測されない。これは、スピン反転抵抗の小さい付加的なPy細線にスピン流が吸収され、非磁性層のスピン分極が抑制されたためと考えられる。

このスピン流の吸収（スピンシンク）効果は、細線のスピン反転抵抗の大きさに依存するため、スピン反転抵抗が小さい物質を接続した場合、強磁性、非磁性に関わらず同様の現象が生じる。また逆に、付加的に接続した細線によるスピン信号の減衰の度合い

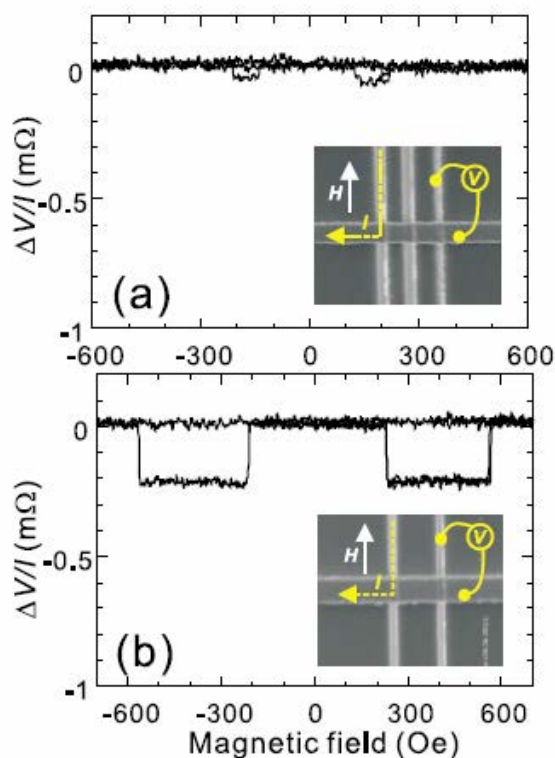


図4 (a) 付加的なPy細線を非局所端子に接続した場合の非局所スピバルブ信号の磁場依存性 (b) 付加的なPy細線が無い場合の非局所スピバルブ信号の磁場依存性。

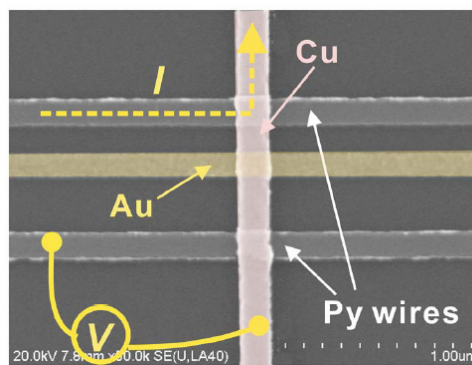


図5 面内スピバルブ素子の非局所端子に、Au細線を接続した試料のSEM写真。

を調べることで、その細線のスピンの反転抵抗及びスピンの拡散長を知ることができる。そこで、Py 細線だけでなく、金 (Au) と銅 (Cu) の付加的細線を接続した場合のスピンの信号も測定した。図 5 に Au 細線を挿入した試料の SEM 像を示す。詳細は省略するが、解析的に拡散方程式を解くことにより、挿入した細線のスピンの反転抵抗 R_{SM} と非局所スピンのバルブ測定におけるスピンの信号 R_{NLSV} との間に以下の関係式を導くことができた。

$$R_{SM}[\Omega] = \frac{7.02R_{NLSV}(m\Omega)}{1.27 - 4.41R_{NLSV}(m\Omega)} \quad (1)$$

ここで、Cu のスピンの反転抵抗、Py のスピンの偏極率、Cu, Py のスピンの拡散長は、別に行った非局所スピンのバルブ測定から得られた値を用いた。この関係式より、それぞれの細線についてスピンのバルブ信号を測定し、(1) 式に代入することで、接続している細線のスピンの反転抵抗を求めることができる。また、スピンの反転抵抗は $\rho_N \lambda_N / S_N$ (ρ_N は非磁性体の抵抗率、 λ_N は非磁性体の拡散長、 S_N はスピンの流が流れる領域の断面積である。) で与えられるので、抵抗率が分かれば、スピンの拡散長を算出することができる。表 1 に各細線を接続した場合のスピンの信号の大きさ、(1) 式から得られたスピンの反転抵抗の大きさ、及びスピンの拡散長を示す。Cu と Py 細線に関連する諸物性値が、以前に行った実験結果と良く一致しており、実験の妥当性を支持する。また、Au 細線では、スピンの反転抵抗 0.62Ω 、スピンの拡散長 60 nm となった。この Au のスピンの拡散長は、これまでに他の研究報告で得られている実験と良く一致しており、本研究の手法により有効なスピンの吸収の発現が可能であることを支持する。

表 1 スピンの信号の接続細線物質依存性とそれから見積もられる各物質のスピンの反転抵抗とスピンの拡散長。

	ΔR_S (m Ω)	R_{si} (Ω)	λ (nm)
Py	0.05	0.33	3
Cu	0.18	2.67	550
Au	0.08	0.62	60

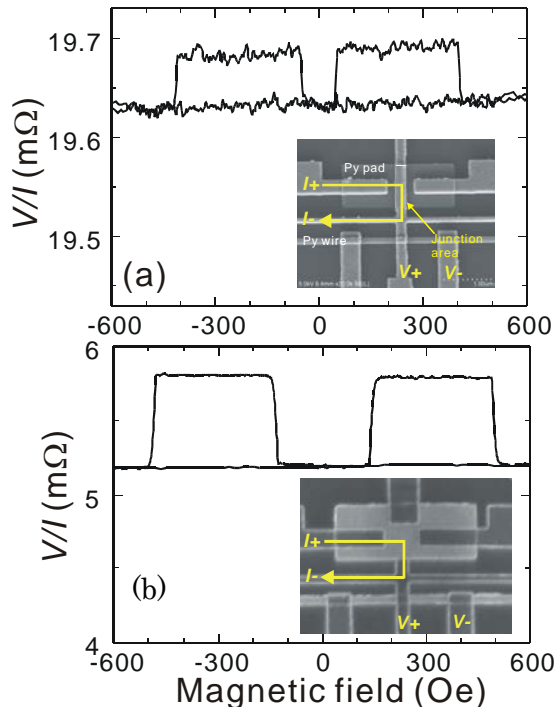


図 6 (a) 接合面積が $1 \mu\text{m} \times 200 \text{ nm}$ の面内スピンのバルブ素子における非局所スピンのバルブ信号 (スピンのバルブ電圧/励起電流 I) の磁場の依存性。 (b) 接合面積が $30 \text{ nm} \times 200 \text{ nm}$ の面内スピンのバルブ素子における非局所スピンのバルブ信号の磁場の依存性。

④ スピンバルブ信号の接合面積依存性

前節では、検出用電圧端子のスピンの反転抵抗に着目し、スピン流が生じている領域にスピン反転抵抗が小さい物質を接続するだけで、スピン流の吸収が生じることを示した。ここでは、電流注入端子に着目し、効率良くスピン注入を行うための構造について述べる。強磁性/非磁性接合において、電流を流した場合の界面におけるスピンバルブ電圧 ΔV_{S0} は、これまでと同様、スピン反転抵抗を用いた等価回路計算を行うことにより次式のように求められる。

$$\Delta V_{S0} = \alpha_F I_C \frac{R_{SF} R_{SN}}{2(R_{SF} + R_{SN})} \quad (3)$$

ここで、 I_C は、接合を流れる電荷流である。効率良くスピン注入を行うためには、大きなスピンバルブ電圧を誘起する必要があるが、(3)式から、強磁性細線のスピン反転抵抗が小さい場合、スピンバルブ電圧も小さくなることがわかる。これは、強磁性細線から非磁性細線に向かって、 $\alpha_F I_C$ のスピン流が流れ込もうとするが、強磁性細線界面近傍に新たに現れるスピン偏極により、逆方向のスピン流（スピン流の再吸収）が生じるために界面を横切る全スピン流が減少することを意味する。したがって、効率良くスピン注入を行うためには、強磁性細線のスピン反転抵抗を大きくして、スピン流の再吸収を防ぐ必要がある。強磁性細線のスピン反転抵抗は $\rho_F \lambda_F / ((1 - \alpha_F^2))$ であり、 ρ_F 、 λ_F と α_F は物質固有の定数であるが、 S_F はスピン流に対する有効断面積であり、形状により制御が可能である。ここで、Py のようにスピン拡散長が短い物質の場合、 S_F は、強磁性細線と非磁性細線の接合面積に対応していると考えてよい。したがって、接合面積を小さくすれば、強磁性層のスピン反転抵抗は大きくなり、効率良いスピン注入が実現できると予想される。そこで、接合面積のサイズを $0.006 \mu\text{m}^2 \sim 0.2 \mu\text{m}^2$ まで変化させた場合の非局所スピンバルブ測定におけるスピン信号を調べ、スピン信号と接合面積の関係について調べた。すべて試料において、Py や Cu の形状、及び Py の間隔は同じであり、注入端子の Py/Cu 接合の面積のみを変化させた。図 6 に接合面積 $30\text{nm} \cdot 200\text{nm}$ 及び $1 \mu\text{m} \times 200\text{nm}$ の試料における非局所スピン信号の測定結果を示す。ここで、測定は 77K で行った。両試料とも電極間隔が同じであるにも関わらず、得られたスピン信号の大きさは、10倍以上異なっている。これより、接合面積を小さくすることで、強磁性注入端子へのスピン流の再吸収を防ぎ、効率良いスピン注入が

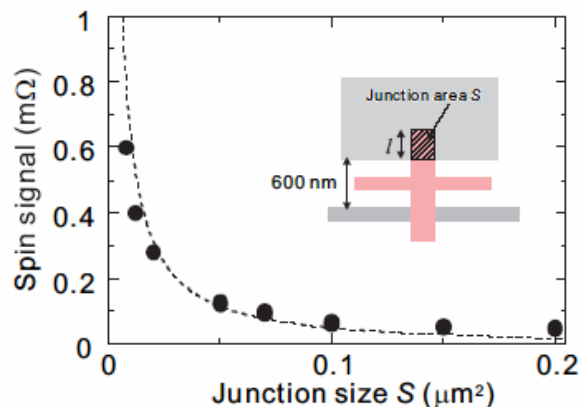


図7 非局所スピン信号の接合面積依存性。点線はスピン反転抵抗モデルにより導出した関係式を用いたフィッティング曲線である。

可能であることを実験的に実証した。

図7に、スピバルブ信号の接合面積依存性を示す。接合面積の減少と共に、スピバルブ信号は単調に増加する。この依存性を、これまでと同様のスピ反転抵抗を用いた等価回路計算から得られる関係式を用いてフィッティングした曲線を点線で示す。フィッティング曲線は、実験結果と良く一致しており、Py/Cu 接合面積の減少により、Pyパッドのスピ反転抵抗が増加し、スピバルブ信号を増大させることが分かる。また、この式から得られたフィッティングパラメータから、Cu のスピ拡散長は77 Kで 1.5 μm 、Cu細線とPy細線のスピ反転抵抗は、それぞれ、2.14 Ω 、0.09 Ω であることが分かった。

⑤ 非局所スピ注入磁化反転

以上述べてきた研究から、効率良くスピ注入を行うための注入端子構造、またスピ流の吸収を効率良く生じさせる構造の指針が得られた。これらの結果をもとに、素子構造を最適化し、非局所手法によるスピ流を効率的に取り出すことができれば、電荷流を伴わないスピ流による磁化反転が可能になるはずである。そこで、図8(a)及び(b)に示すような磁性微粒子を含むスピバルブ素子を作製し、この磁性微粒子に非局所手法を用いてスピ流のみを注入し、磁化状態を制御する実験を行った。スピ注入端子は、比較的大きなサイズのPyパッドとし、定常電流で最大15 mAの大電流を流せるように設計されている。また、高効率のスピ注入を行うため、Py/Cuの接合面積はできる限り小さくした。強磁性微粒子は、幅50nm、長さ180 nm、厚さ6nmのPyで、Cu細線の下に配置されている。また、スピバルブ電圧検出の為に、Au細線が端子として接続されている。

まず、Py微粒子に、Pyパッドからのスピ流が注入されることを確認するために、図9(a)に示すような端子配置で非局所スピバルブ測定を行った。図に示すように、0.18 m Ω の明瞭なスピバルブ信号が観測されており、スピ流が、Py微粒子に注入されていることが確認できる。ここで、得られたスピバルブ信号の大きさは、電極間隔及び接合面積が同程度であるこれまでの実験のものと同程度に減少している。これは、Py微粒子のサイズが小さい為、表面の酸化等により、スピ偏極率やスピ拡散長が減少し、実効的なスピ抵抗が減少したためである。

次に、非局所法による磁性微粒子へのスピ注入の実験を行った。スピ注入は、非局所スピバルブ測定と同じ電流端子配置で、最大15 mAのパルス電流（パルス幅 1s の三

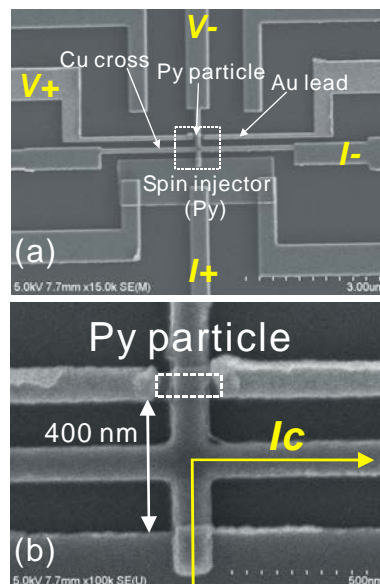


図8 (a) PyパッドとPy微粒子からなる面内スピバルブ素子のSEM写真 (b)接合部分の拡大写真

角波)を流すことで行った。また、電流注入前後の磁化状態は、非局所スピバルブ測定を行うことで検出した。まず、最初に、外部磁場を制御することで、PyパッドとPy微粒子を反平行状態にし、Pyパッドからスピン注入を行った。図9(b)は、非局所スピバルブ信号の注入電流依存性である。電流が正の場合、+15mAの電流まで電流を増加させても、非局所スピバルブ信号に変化は現れなかった。一方、パルス電流を負方向に増加させた場合、-13 mAで、非局所スピバルブ信号に大きな変化が現れた。この大きさは0.18mΩであり、図9(a)に示したスピバルブ信号の大きさと一致している。また、この状態から磁場掃引を行い非局所スピバルブ信号の磁場依存性を調べた結果、Py微粒子の磁化はPyパッドに平行に配列しており、-13mAで観測された変化は、Py微粒子の磁化反転に対応することが明らかとなった。

ここで、注入されたスピン流の分極方向について考える。図10(a)に示すように、負方向の電流によるスピン注入は、Pyパッドの磁化と平行にスピンが、Py微粒子に注入されることに相応しており、Py微粒子を平行にするようにスピントルクが作用する。したがって、負の電流で、Py微粒子の磁化が平行状態に反転したことは、スピントルクモデルと定性的に一致する。一方、正方向の電流は、Pyパッドの磁化と反平行のスピンがPy微粒子に注入することになり、同様のスピントルクモデルから、反平行状態が安定になると考えられる。そこで、次に平行状態から、電流を正方向に増やして同様の実験を行った。しかしながら、+15mAの電流を流しても、平行から反平行への磁化状態の磁化反転は観測できなかった。

上記のPy微粒子の磁化反転が、非局所スピン注入による誘起されたスピン流によるものであることを確認するために、注入されたスピン流の大きさの妥当性について検討した。得られたスピバルブ信号は0.18 mΩであり、これまでと同じスピン反転抵抗を用いた等価回路計算により、磁性層に注入されているスピン流の大きさは160 μAと算出された。ここで、Py微粒子のスピン抵抗は前節の実験を参考にし、0.08 Ωと仮定したが、前述の通り、Py微粒子のスピン抵抗は小さくなっている可能性があるため、吸収されているスピン流の大きさは、160 μAよりも大きい可能性がある。この値を積層構造におけるスピン注入磁化反転の実験と比較してみると、スピン流が200 μA程度でPyの磁化反転が観測されており、今回の結果の妥当性を支持

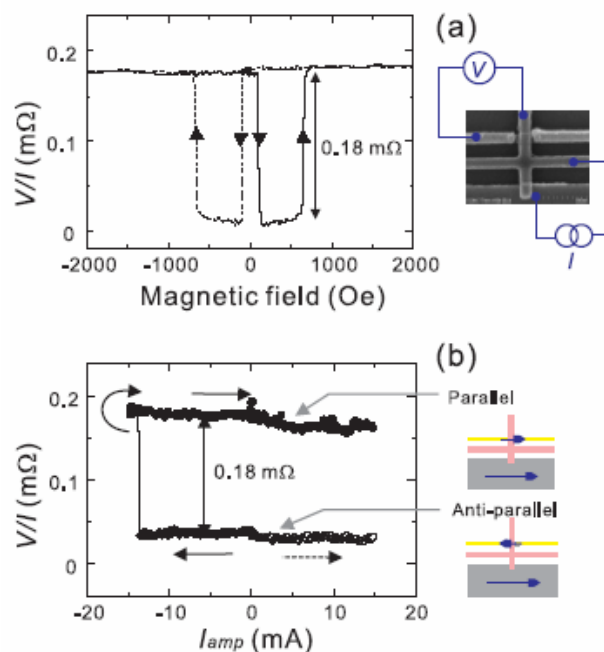


図9 (a) 非局所スピバルブ信号の磁場依存性。挿入図は端子配置を示す。(b)電流注入後の非局所スピバルブ信号の注入電流依存性とそれに対応する磁化状態。

する。したがって、観測された反平行から平行状態への遷移は、非局所スピン注入により誘起されたPy 微粒子の磁化反転であることが分かった。

一方、平行から反平行の遷移が観測されなかった理由として、注入端子の磁化状態の変化が考えられる。これまでに、強磁性/非磁性の点接触 (point contact) の実験において、電流を強磁性層から非磁性層に流すと、強磁性層の磁化状態に変化が生じることが報告されている。この現象は、強磁性層の磁化と反平行のスピ

ンが接合近傍で強磁性層に注入されるため、スピントルクにより界面近傍の磁化が反平行になった為と理解されている。今回の実験でも、正の電流は、強磁性層から非磁性層に流した場合に対応しており、同様の現象が生じたためCu 層に発生するスピン流の方向が変化し、Py 微粒子を反平行状態にするスピントルクが有効に働かなかったためと考えられる。

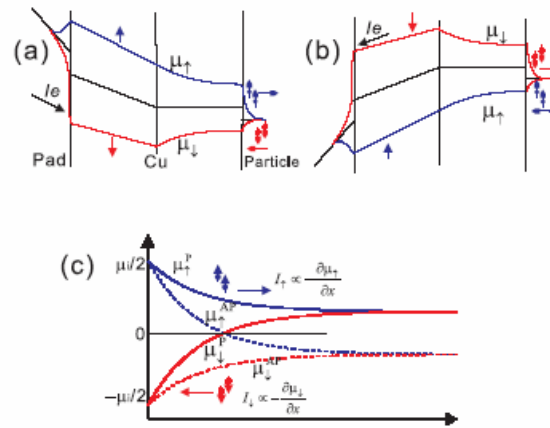


図10 非局所スピン注入により誘起されるスピン依存化学ポテンシャル (a) 電流が負の場合, (b) 電流が正の場合, (c) Py微粒子の化学ポテンシャルと注入されるスピン流

⑥ オーミックに接合したナノピラー磁化反転素子

ナノピラー磁化反転素子については、再現性良い実験結果を得ることの出来るナノピラー構造 (100 nmサイズ) の作製手法を確立した。更に上述の計算結果を利用して素子作製と詳細な実験を行い、上部電極のサイズや材料を最適化することによりスピン流を増大させることの可能性を実験的に検証した。更に、現在議論の焦点となっているスピン流とスピン蓄積のどちらが支配因子となっているかについて一つの実験的解答を得ることに成功した。すなわち、ナノピラー構造のスピン注入磁化反転においてスピン流の引き起こすスピントルクの寄与と接合界面のスピン蓄積により生じる磁気分極の寄与のどちらが支配因子であるかを解明することが効率的な磁化反転を実現する上で重要な課題である。このために系統的に電極サイズを変えて実験を行った結果、図 11 に示すようにスピン蓄積の大きさを増大させても磁化反転に要する反転電流は減少せず逆に増大すること、一方スピン流

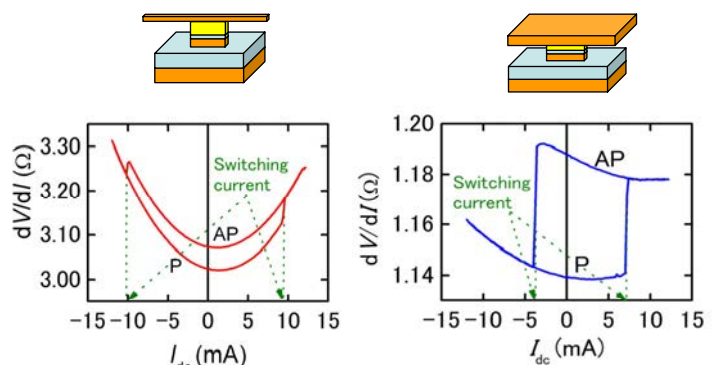


図11 スピン注入磁化反転に伴う微分抵抗の注入電流依存性と対応する素子構造の模式図。左：上部電極を狭くした場合、反転電流は増大する。右：上部電極を広くした場合、反転電流は相対的に減少する。

の大きさを増大させると反転電流が相対的に減少することが実験的にも数値計算的にも明らかとなった。磁化反転には大きい寄与を与えず、スピン流がスピントルクを発生して磁化反転を生じることが支配的であることを実験的に示すことに成功した。

⑦ スピン流による磁壁の核発生

スピン流によって生じる磁化の不安定性についての理論研究も並行して行った。その結果、一様磁化状態であってもスピン偏極電流を流すことにより、スピン波が励起され、磁化状態の不安定化が引き起こされること、引き続きこの状態にスピン偏極電流を流し続けると、磁壁が核発生することを新たに発見した。更に、この理論解析を磁気渦構造についても適用した結果、磁気渦はローレンツ力のように渦中心の磁化ベクトルとスピン偏極電流ベクトルの外積で得られる方向に力を受けて運動することを見出した。このことを実験的にも検証した。

(2) 得られた研究成果の評価及び今後期待される効果

以上、大谷グループはスピン拡散長(数 nm \sim 1 \cdot m 程度)よりも小さな構造を持つ素子を巧みに作製することにより、電荷の流れを伴わない純粋なスピンの流れを作り出すことができることを示した。そして、さらに発生したスピン流を強磁性セルに注入することにより磁化反転が生じることを実証した(Physical Review Letters, 2006., I. F.=7.218, Sitation=0)。純粋なスピン流の発生についてはオランダのグループの発表が既にあった。しかし、純粋なスピン流による磁化反転は大谷グループの実験が世界初であり、この分野の研究者に驚きを与えるとともに、スピン注入さらにスピン流の取り扱いに関する基礎体系を与えるもので今後の波及効果は大きいと考えられる。

3. 4 スピン機能評価の研究 (宮崎グループ)

(1) 研究成果の内容

(a) トンネル接合界面の評価技術

効率的なスピン注入を目指すためには均質でかつ極薄の絶縁膜の作製が必須である。本研究では、均質な絶縁層生成の指針とすべく、走査型トンネル顕微鏡(STM)を用いて極薄絶縁層用 Al の酸化初期過程を観察した。期間初年度に ICP プラズマ酸化、ラジカル酸化、自然酸化と酸化方法を種々変化させて、Al 表面の酸化の様子を原子分解能の STM で評価した。その結果、ラジカル酸化による Al 酸化膜表面は周期、高さいずれも規則性が見られず、アモルファス状であるのに対して、プラズマ酸化による Al 酸化膜表面は明確な周期性が観測された。これは単結晶 Al_2O_3 に対して理論及び実験的に報告されている $(\sqrt{31} \times \sqrt{31})R \pm 9^\circ$ 再構成表面であると推察される。トンネル接合のスピン分極率が接合界面の電子状態を反映すること、および接合の上部電極の結晶性が絶縁層表面の結晶構造に強く依存することから、この結果はスピン偏極共鳴トランジスタ等の素子を設計する上で重要な知見となった。

この結果をもとにして、酸化方法をプラズマ酸化に固定して、下部電極の結晶性を変化させた実験を行った。図1は(a)多結晶下部電極、 $\text{SiO}_2/\text{Pt}/\text{NiFe}/\text{Cu}/\text{NiFe}/\text{IrMn}/\text{CoFe}$ 、および(b) エピタキシャル成長下部電極、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pt}/\text{NiFe}$ の上に成長した Al 表面の STM 像を示す。多結晶上に作製した Al 膜は微細な粒状の形状をし、粒界が大きな構造を示しているのに対して、エピタキシャル成長した下部電極上の Al 膜は緻密な構造をしていることがわかる。この Al 膜を酸化することにより均一な Al-O 絶縁膜が形成されることを伝導性 AFM 測定により確認した。すなわち、下部電極の表面形状が金属 Al の成長に影響し、これを酸化させることにより作製する絶縁障壁の特性に影響することを示した。図2はこのエピタキシャル成長した下部電極を用いて作製した強磁性トンネル接合 (MTJ) において磁気抵抗比の印加バイアス依存性から求めた V_h 値 (この電圧で TMR 比が半減する) と電流-電圧特

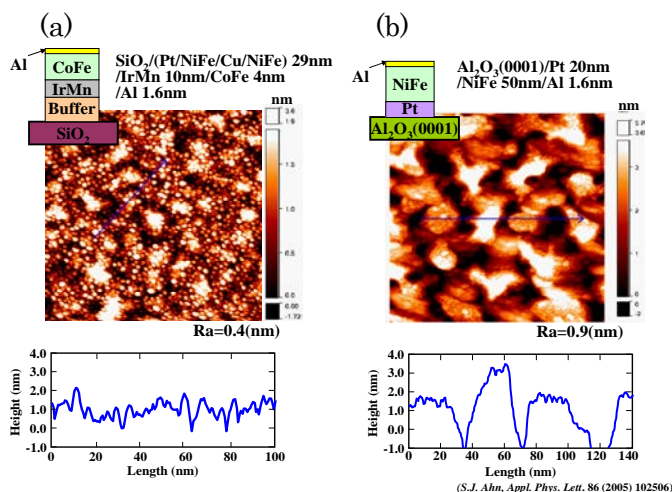


図1 (a) 多結晶, および(b) エピタキシャル成長下部電極上に成長したAl表面のSTM像.

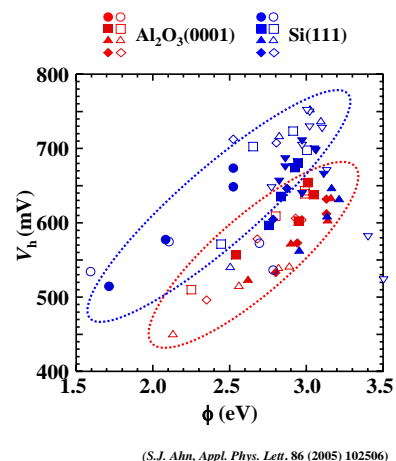


図2 エピタキシャル成長下部電極を用いたMTJの V_h とバリア高さの相関.

性から見積もった絶縁障壁高さの相関を示す。MTJの熱処理、酸化条件の最適化により絶縁障壁の高さは一般的に高くなる傾向を示す。 V_h 値はこの絶縁障壁高さとの正の相関を示す。これらの検討の結果、 V_h 値で最大約800 mVの素子を得ることに成功した。これは、絶縁層としてAl-Oを用いた接合としては最高レベルの値である。

強磁性トンネル接合の界面の構造を、接合を破壊することなく測定する手法として非弾性電子トンネル分光法 (IETS) を開発した。その原理図を図3に示す。弾性トンネル過程においては電子は \uparrow (\downarrow) スピン状態から \uparrow (\downarrow) スピン状態にトンネルする。しかし接合界面においてスピン反転を伴う非弾性トンネル過程が存在する場合、電子は \uparrow (\downarrow) スピン状態から \downarrow (\uparrow) 状態にトンネルする。両磁性電極の磁性体の磁化の方向が並行配置の場合、これはバンドのマジョリティ (マイノリティ) バンドからマイノリティ (マジョリティ) バンドへのトンネル過程となり、そのトンネル確率は低くなる。一方、反並行配列の場合はマジョリティ (マイノリティ) からマジョリティ (マイノリティ) へのトンネル過程となり、そのトンネル確率は高くなる。このような非弾性の伝導パスは界面における素励起のエネルギーよりも印加電圧が高くなった場合に開くことから、電流-電圧特性を測定することにより、界面の素励起を検出することができる。実際の測定においては、二次微分抵抗を測定することにより、素励起のエネルギーをピーク状に検出して感度を高めている。

図4は(a) 多結晶、および(b) エピタキシャル成長下部電極上に成長したMTJのIETスペクトルの一例を示す。下部電極をエピタキシャル成長することにより、①接合界面の磁性不純物に起因するピーク (ゼロバイアス近傍のシャープなピーク) の減少、②絶縁層のAl-O LO フォノン励起に起因するピーク (115 mV 付近) の明瞭化、③接合構造の非対称性によるスペクトルの非対称性、が観測される。すなわち下部電極のエピタキシャル成長化により絶縁層および、接合界面の品質が向上して、 V_h 値の改善に結びついていることを明らかにした。この手法は後に単結晶 Fe/MgO/Fe 接合および FeCoB/MgO/FeCoB 接合にお

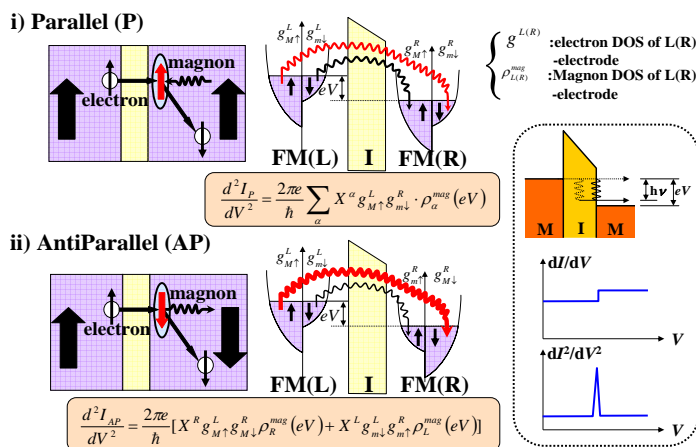


図3 強磁性トンネル接合における非弾性電子トンネル分光の原理図。

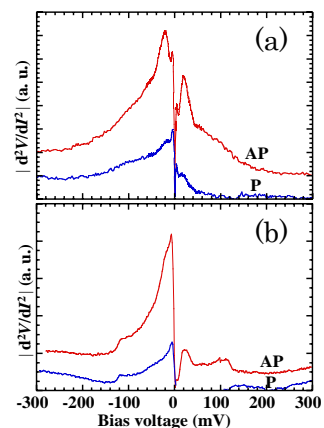


図4 (a) 多結晶、および(b) エピタキシャル成長下部電極上に成長したMTJのIETスペクトル。

ける磁気抵抗比の巨大化メカニズムの解明、TMR 比のバイアス電圧に対する非対称性の原因解明の一助となった。

(b) スピンのダイナミクス評価技術

スピン反転を測定するために①コプレーナ線路からの高速パルス磁界応答信号測定、②ポンププローブ法による磁化の才差運動の測定を行った。はじめに、強磁性トンネル接合にサブナノ秒のパルス磁界を印加し、強磁性電極の磁化反転に伴うトンネル電流の応答信号を測定するために、3個のエア・コプレーナ・プローブからなるアライメントシステムを製作した。測定システムはパルスジェネレータ、高速オシロスコープ、高帯域プローブにより構成した。また、ヘルムホルツコイルにより X、Y 軸方向（容易軸方向、困難軸方向）に磁場を印加しながら測定することができる。伝送系のインピーダンス整合をとるために、接合からの電極およびパルス磁界印加用のコプレーナ線路を加工した。このコプレーナ伝送路上に強磁性トンネル接合 Sub./Ta(3nm)/Cu(20nm)/Ni₈₀Fe₂₀(3nm)/IrMn(10nm)/CoFe(5nm)/Al(0.7nm)-O/Ni₈₀Fe₂₀(15nm)/Cu(20nm)/Ni₈₀Fe₂₀(10nm) を配置した素子を作製し、パルス磁界に反応するパーマロイ層の磁化の反転信号を観測した。接合面積は 10 μm x 10μm である。上部電極にパルス発生器から電流を流し、高速サンプリングオシロスコープを用いて反転信号を測定した。素子の困難軸方向に磁場 $H_h=24$ Oe を印加し、容易磁化方向にパルス磁場 H_e を印加してフリー層の磁化を反転させたとき、 H_e の増大に従いスイッチング時間は短くなり、最速で約 500 ps の反転時間を得た。また反転後の磁化の才差運動がはっきりと観測できた。LLG 方程式による計算と比較し、その振る舞いをほぼ妥当な値を得た。

更に早い時間スケールの磁化の変動を観測するために、ポンププローブ測定が可能な光学系を構築した。delay line は粗動と微動の両ステージで構成され、粗動ステージで精度 100 fs, 最長 10 ns、微動ステージで精度 40 fs, 最長 1.33 ns の pump 光の遅延が可能である。光スイッチとコプレーナ伝送路から構成される伝送路全体の透過信号帯域は 2.4 GHz

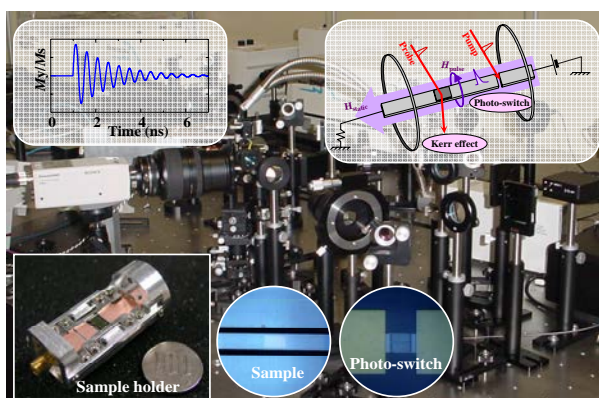


図5 ポンププローブ法を用いた高速磁気光学効果測定装置。

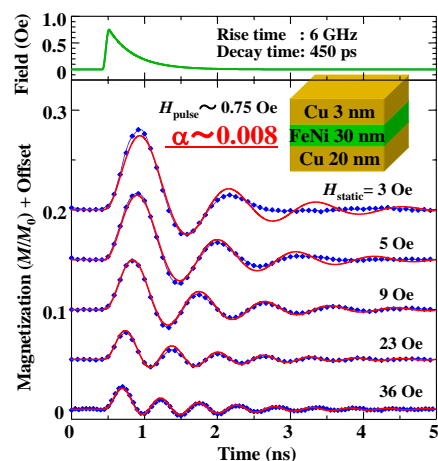


図6 Cu/FeNi/Cu積層膜の才差運動測定例。

であった。本システムを用いて $180 \times 90 \mu\text{m}^2$ の面積のパーマロイ薄膜の磁化の才差運動によるシグナルを測定し、1 ns 以下の振動周期を観測した。得られたシグナルを LLG 方程式を用いてフィッティングをした結果、ダンピング定数 $\alpha=0.008$ を得た。この値は強磁性共鳴により得られるパーマロイ薄膜のそれと一致した。

(c) 強磁性共鳴とダンピング定数の材料依存性

積層膜の界面物性の評価の目的で、強磁性共鳴法を用いた解析手法を確立した。強磁性共鳴の共鳴線幅は磁性体のギルバートダンピング定数に比例するため、容易にダンピング定数を求めることができる。しかし、共鳴線幅は試料の不均一性によっても線幅の増大が起こるために、ダンピング定数を求めるためには、これらの項を分離する必要がある。本研究では静磁場の印加方向を面内から面直に回転させてその共鳴磁場と線幅を理論式にフィッティングすることで不均一性に依存する項を分離する方法を確立した。図 7 は Cu/FeNi/Cu 積層膜の強磁性共鳴線幅の印加角度依存性の一例を示す。実験により得られる全共鳴線幅を黒丸で、また、ダンピング定数からくる本質的な線幅、有功的な磁化の不均一性からくる線幅、異方性の分散による項からくる線幅をそれぞれ赤線、青線、緑線で示す。これらの寄与の総和（黒線）により実験結果を良く再現している事がわかる。このようにして材料固有の本質的なダンピングを様々な磁性材料に対して評価した。

図 8 は様々な材料で強磁性共鳴を測定して得たギルバートダンピング定数を $(g-2)^2$ に対して整理した結果を示す。ギルバートダンピング発現の起源が spin-orbit 機構によるものである場合、そのダンピング定数は $G \propto (g-2)^2$ or $\alpha M_s \propto (g-2)^2 / \gamma$ と表すことができる。測定したダンピング定数は概ね直線上に分散しているように見られることから、spin-orbit 機構はこれらの材料のダンピング定数を決定している起源の一つと見なすことができる。一方、 $(g-2)^2$ がゼロにおいてダンピング定数はゼロに近づかない。これは s-d 相互作用が関連していると考えられる。これらの起源の解明は今後の課題の一つである。

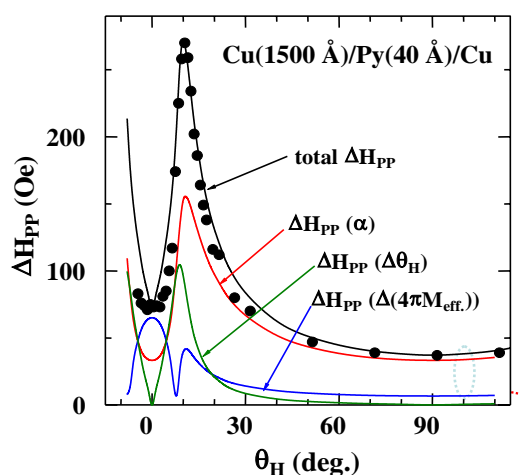


図7 Cu/FeNi/Cu積層膜の強磁性共鳴線幅の印加角度依存性.

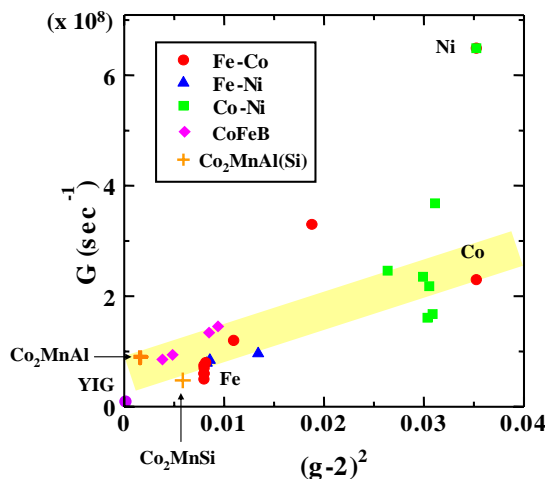


図8 様々な材料のギルバートダンピングの $(g-2)^2$ 依存性.

(d) スピンポンピング

強磁性体(F)/非磁性体(N)接合でFのスピンを高速で才差運動させた場合、F層からN層にバイアス電流を流していなくてもスピncurrentが流れる。この現象はスピンポンピングと呼ばれている。直感的な描像をさらに推し進めれば、次に述べるようなスピンポンピングにともなう新しい現象が予測される。すなわち、スピンの才差運動がスピncurrentを発生させると同時に、その反作用からF層界面で G が増大する。このスピンポンピングによる G の増大は、N層内のスピン緩和に強く依存する。スピンポンピングによる G の増大を調べるために、N/F/Nの G のF層厚依存性及び、Nの材料依存性を調べた。Nをスピン緩和の弱い材料から強い材料に系統的に変えることで、 G も系統的に変化するはずである。図9にN/Py(d_{Py})/N(N= Cu, Ta, Pd, Pt)の G の d_{Py} 依存性を示す。N=Cu, Taの場合、 G はバルクPyの値とほぼ一致しており d_{Py} に対して一定である。他方、N=Pd, Ptの試料の G は $1/d_{Py}$ に比例して増大し、界面で G が増強されていることを示唆している。N内のスピン緩和がCu, Ta, Pd, Ptの順に強く、N=Cu, TaとN=Pd, Ptでは各々、スピン蓄積とスピン緩和が実現されていると解釈すれば、図9のN依存性はスピンポンピングの効果として定性的に説明できる。

このダンピング定数の増大を直観的に見るために、pump-probe法による磁化の才差運動の測定システムを用いて、N(20nm)/Ni₈₀Fe₂₀(d nm)/N(3nm) (N=Cu, Pt, $d=5$ nm, 10 nm and 30 nm) 薄膜の才差運動を測定した。面積は180 μ m x 90 μ mである。図10はこれらの積層膜におけるスピンの才差運動に伴う信号の変化を示す。磁化の才差運動によるシグナルの明瞭な振動が見られる。才差運動の周期は1 ns以下で、振幅は振動しながら数nsかけて徐々に減衰する。また、静磁界が大きくなるに従い振動の周期は短くなる。LLG方程式を用いてパルス応答信号を計算し最適フィッティングからダンピング定数を決定した。N=Cuの場合 α が0.008のとき全ての d に対して信号の減衰の傾向が良く一致する。一方、

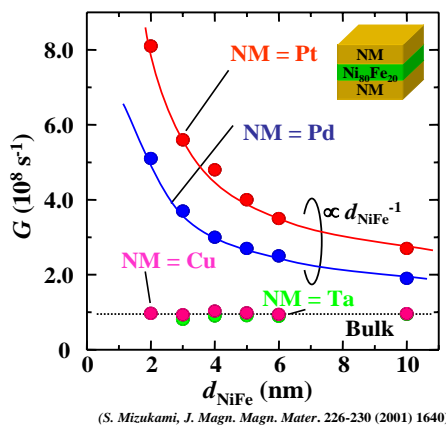


図9 N/Py(d_{Py})/N (N= Cu, Ta, Pd, Pt) 膜におけるGilbert damping G の d_{Py} 依存性。破線はバルクのPyの G 。

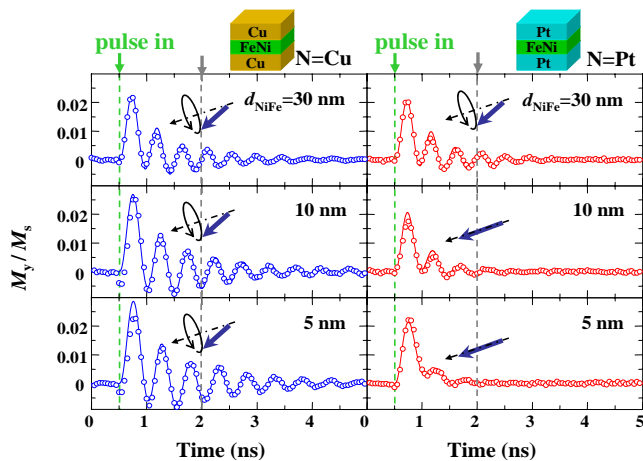


図10 N/Ni₈₀Fe₂₀(d nm)/N (N=Cu, Pt, $d=5$ nm, 10 nm and 30 nm) 薄膜における高速磁気カー効果信号。

N=Pt の場合は α の値は増大し、Ni₈₀Fe₂₀の膜厚が薄くなるに従い顕著となる。このようにしてLLGのフィッティングから得られた α の値は、強磁性共鳴の線幅から求めた α 値と一致した。

図11にCu/Py/PtのPy層とPt層の間にCu層を挿入したCu/Py(3nm)/Cu(d_{Cu})/Pt(5nm)、及びCu/Py(3nm)/Cu(d_{Cu})における G の d_{Cu} 依存性を各温度で測定した結果を示す。Cu/Py/Cu/Ptにおける G は、 d_{Cu} が小さい場合にはバルクの約2倍に増大しているものの、 d_{Cu} が大きくなるにつれてゆるやかに減少し、 d_{Cu} ~300nm以上ではCu/Py/Cuの G とほぼ一致している。Cu/Py/Cu/PtとCu/Py/Cuの G の一致する d_{Cu} が、Cu内の電子がスピン状態を保存しながら拡散する距離(スピン拡散長)に相当する。Cu/Py/Cu/Ptでは d_{Cu} がスピン拡散長よりも小さい場合、スピンがCu内を拡散していき、Cu/Pt界面やPt層内でスピン緩和が激しく起こる。 d_{Cu} がスピン拡散長よりも大きくなると、Py層から流出したスピンは、Pt層まで拡散する以前に緩和してしまう。従って、実効的にPt層はないものとみなすことができ、Cu/Py/Cu/PtとCu/Py/Cuの G は一致する。図中の実線および点線は、現象論を拡張した計算によるフィッティング結果を示している。計算値は実験値とよく一致し、フィッティングに用いたパラメータも妥当な値であった。

得られたスピン拡散長の妥当性を確認するために、Cu/Ni₈₀Fe₂₀/Cu(d_{Cu})/Pt積層膜のFMRスペクトルの共鳴線幅の温度依存性を詳細に測定することによりスピン拡散長を見積もった。Cu/Ni₈₀Fe₂₀/Cu(d_{Cu} =400 nm)積層膜において温度の減少とともにFMR線幅 ΔH_{pp}^{Cu} は減少する。これに対して、Cu/Ni₈₀Fe₂₀/Cu(d_{Cu} =400 nm)/Pt積層膜では約150 K以下においてFMR線幅は急に増大し始める。この違いはCu内を拡散するスピンの拡散長がこの温度において増大していることで説明できる。界面におけるスピン緩和項のみを議論するために、 $\Delta H_{pp}^{Cu/Pt}$ と ΔH_{pp}^{Cu} の差分を計算して、この結果に対してフィッティングを

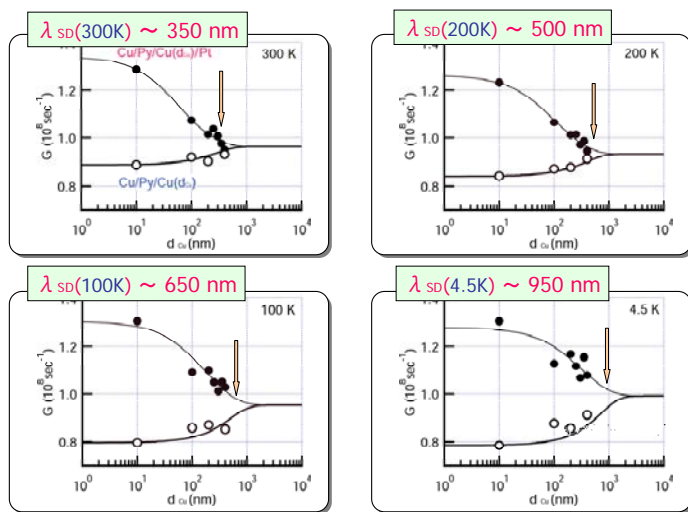


図11 各温度で測定したCu/Py(3nm)/ Cu(d_{Cu})/Pt(5nm) 及びCu/Py(3nm)/Cu(d_{Cu})における G の d_{Cu} 依存性.

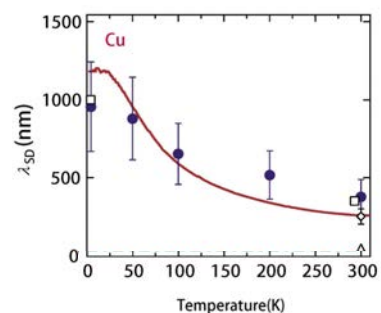


図12 スピン拡散長の温度依存性.

行いスピン拡散長を得た。図 1 2 はこれらの方法により各温度で得られたスピン拡散長を整理した結果を示す。最適フィッティングが得られたときのスピン拡散長は室温で ~ 400 nm、低温で ~ 1000 nm であり、他の方法で報告されている Cu 内のスピン拡散長と比較しても良い一致を示した。

(e) スピン注入用極微小メモリセル形成および測定装置の開発

収束イオンビーム(FIB)のカーボン(C)薄膜デポジション機能を用いて微小 MTJ セル形成用のマスクパターン作製プロセスを検討した。図 1 3 は Ar エッチング前後の C マスクの FIB 像を示す。イオンビームのプロープ電流、アパーチャー径を種々検討した結果、最小約 110 nm のサイズの C マスクパターンを作製することができた。最も小さいサイズのパターン形状は円錐状であった。セル形成に適していると考えられる直方体形状では一辺のサイズは最小 130 nm であった。この場合、マスクパターンの高さは 300 nm 以上であり、マスクの高さは十分に確保できた。C マスクパターンの Ar および酸素ガスに対するエッチングレートを求めた。C マスクは Ar エッチングに対しては十分硬く、酸素エッチングに対しては非常に速いエッチングレートを示した。次いで MTJ 薄膜上に 130 nm x 130 nm、150 nm x 260 nm の形状の C マスクパターンを形成し、Ar エッチングを用いて MTJ 薄膜をエッチングした。エッチング後もパターン形状は良好であり、マスクパターン形状を MTJ 薄膜に転写することができた。パターン形状、エッチング後の形状変化、エッチング速度の結果から、想定するプロセス中でデポジションした C をマスクとして用いることができると判断した。

ついで、FIB の局所的なタングステン薄膜堆積機能を用いた微小 MTJ の作製プロセスを検討した。試料表面に吸着した原料ガス(W(CO)₆)が収束 Ga イオンビームの照射により分解し、微小領域に堆積された金属タングステンをもマスクおよび電極として用いた。電極のサイズは最小 100 nm と小さく、高さは数百 nm と高いマスクが作製できた。作製した素子の最小面積は 200 × 400 nm² である。図 1 4 (a)、(b)はタングステンマスクの表面および完成した微小 MTJ の断面の走査イオン (SIM) 像を示す。その磁気抵抗曲線を測定した結

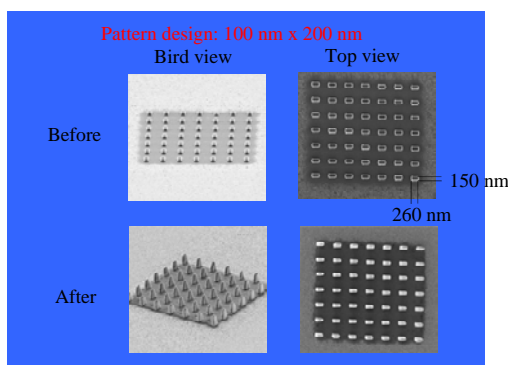


図13 Arエッチング前後のCマスクのFIB像.

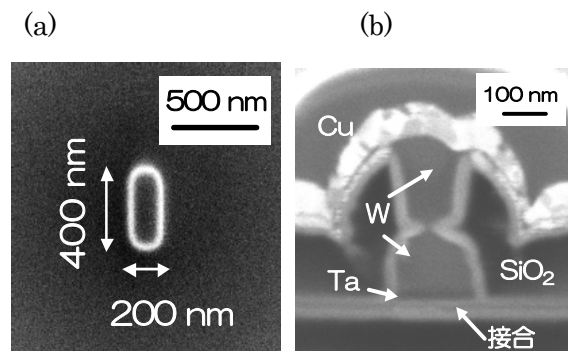


図14 (a)上部から見たタングステンマスク(面積200 × 400 nm²)のSIM像, (b)完成した微小MTJの断面SIM像.

果、30%の TMR 比を示した。また、接合面積で規格化した素子の抵抗値は設計どおりの値を示し、電流電圧 (I - V) 特性を解析して得られた絶縁障壁高さおよび膜厚は従来の加工による面積の大きい接合と同等の値を示した。即ち、FIB 照射によって素子が劣化することなく良好な特性を有する微小 MTJ が作製できた。またこの微細加工技術を用いて、フリー層を CoFeB とする微小低抵抗 MTJ (素子面積 $500 \times 500 \text{ nm}^2$, 素子抵抗 $RA=26 \Omega\mu\text{m}^2$) を作製した。この素子においてスピン注入による磁化反転を観測することに成功した。反転電流密度は $1.56 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ であり、理論的に予想される値と比較して妥当であった。

スピン注入による新機能の発現を顕在化するためには素子の微細化が必然である。ミクロン以下のサイズの極微小トンネル接合を作製する場合、フォトリソグラフィ、電子線リソグラフィ、及びイオンエッチングを組み合わせた複雑なプロセスが必要であるため、研究を効率よく遂行する上でプローブ技術を用いた新しい素子の評価法の確立が重要である。そこで電子線リソグラフィを用いたシンプルな接合作製プロセスと伝導性 AFM を用いた極微小素子のトンネル磁気抵抗効果の測定方法を開発した。おおまかには 3 つのステップで試料の作製は完了し、通常のプロセスに必要な絶縁層の作製、コンタクトホール作製、リード電極の作製は不要である。試料の形状は連続な下部電極の上に島状の絶縁層及び上部電極が多数のっている。この試料に対して、伝導性チップと下部電極の間に最大 30 mV の交流電圧を印加し、ロックインアンプで電流を測定した。磁界の印加はヘルムホルツコイルを用い、最大 200 Oe、1 ループ当たりの計測時間は約 40 秒である。1 回のスキャンで表面形状像と電流像が同時に得られ、接合の上部に AFM チップがある時にのみ電流が流れた。スキャン後にチップを接合上に移動し固定して磁気抵抗曲線を測定し、最小 50 nm x 50 nm、最大 700 nm x 3500 nm の接合の磁気抵抗曲線を、多数回の磁界のスweep に対して再現性良く得た。

(2) 得られた研究成果の評価及び今後期待される効果

(a) トンネル接合界面の評価技術

走査型トンネル電子顕微鏡、非弾性電子トンネル顕微鏡、強磁性共鳴など多彩な手法を開発した。これらの技術は国内外含めて常にトップレベルを維持するものであったと評価できる。これらの成果は論文、学会発表を通じて広く公開された。これらの解析手法は今後も高磁気抵抗比を有する強磁性トンネル素子の開発に際しての界面評価技術として幅広く応用できると期待される。主要な論文と引用件数を以下に列記する。

1. Annealing Effect on Low-Resistance Ferromagnetic Tunnel Junctions, Y. Ando, H. Kubota, M. Hayashi, M. Kamijo, K. Yaoita, Andrew C. C. Yu, X.-F. Han, T. Miyazaki, Jpn. J. Appl. Phys. 39 (2000) 5832-5837
引用件数 : 22件
2. Local transport properties of ferromagnetic tunnel junctions, Y. Ando, M. Hayashi, M. Kamijo, H. Kubota and T. Miyazaki, J. Magn. Magn. Mater., 226-230 (2001) 924-925.
引用件数 : 3件

3. Analysis of intrinsic magnetoelectric properties in spin-valve-type tunnel junctions with high magnetoresistance and low resistance, X. F. Han, A. C. C. Yu, M. Oogane, M. Murai, T. Daibou, T. Miyazaki, *Physical Review B*, 63 (2001), 224404-1-7
引用件数 : 21件
4. Growth mechanism of thin insulating layer in ferromagnetic tunnel junctions prepared using various oxidation methods, Y. Ando, M. Hayashi, S. Iura, K. Yaoita, C. C. Yu, H. Kubota and T. Miyazaki, *J. Phys. D*, 35 (2002) 2415-2421.
引用件数 : 6件
5. Electron transport properties in magnetic tunnel junctions with epitaxial NiFe (111) ferromagnetic bottom electrodes, J. H. Yu, H. M. Lee, Y. Ando, T. Miyazaki, *Appl. Phys. Lett.*, 82 (2003) 4735-4737
引用件数 : 4件

(b) スピンポンピング

スピンポンピング効果は強磁性共鳴による界面評価技術の開発に際して新たに発見し展開したテーマである。この研究成果が発端となり、国内外の類似の研究を誘発したことは評価に値する。スピンポンピング効果は今後スピン注入磁化反転の低反転電流化に際して無視する事ができないものであり、素子構造、材料面からの詳細な研究が期待される。これらの成果の主要な論文と引用件数を以下に列記する。

1. Ferromagnetic resonance linewidth for NM/80NiFe/NM films (NM=Cu, Ta, Pd and Pt), S. Mizukami, Y. Ando and T. Miyazaki, *J. Magn. Magn. Mater.*, 226-230 (2001) 1640-1642
引用件数 : 15件
2. The study on Ferromagnetic Resonance Linewidth for NM/80NiFe/NM (NM=Cu, Ta, Pd and Pt) Films, S. Mizukami, Y. Ando, T. Miyazaki, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 40 (2001) 580-585
引用件数 : 21件
3. Magnetic relaxation of normal-metal(NM)/80NiFe/NM films, S. Mizukami, Y. Ando, T. Miyazaki, *J. Magn. Magn. Mater.*, 239 (2002) 42-44
引用件数 : 5件
4. Effect of spin diffusion on Gilbert damping for a very thin permalloy layer in Cu/permalloy/Cu/Pt films, S. Mizukami, Y. Ando, T. Miyazaki, *Physical Review B*, 66 (2002) 104413-1 -9
引用件数 : 11件

4 研究参加者

①鈴木グループ(スピン機能素子の研究)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
鈴木義茂	大阪大学基礎工学研究科	教授	研究代表 スピン機能素子の総括	平成12年11月～18年3月
白石誠司	大阪大学基礎工学研究科	助教授	スピン機能素子	平成16年4月～18年3月
水口将輝	大阪大学基礎工学研究科	助手	スピン機能素子	平成16年4月～18年3月
斎藤和広	大阪大学基礎工学研究科	修士課程2年	スピン機能素子	平成16年4月～18年3月
武部幸三郎	大阪大学基礎工学研究科	修士課程2年	スピン機能素子	平成16年4月～18年3月
中村修一	大阪大学基礎工学研究科	修士課程2年	スピン機能デバイス	平成16年4月～18年3月
濱田祐介	大阪大学基礎工学研究科	修士課程2年	スピン機能デバイス	平成16年4月～18年3月
戸田順之	大阪大学基礎工学研究科	修士課程1年	スピン機能デバイス	平成16年4月～18年3月
三輪真嗣	大阪大学基礎工学研究科	修士課程1年	スピン機能デバイス	平成16年4月～18年3月
川越毅	大阪教育大学	助教授	スピン機能デバイス	平成13年4月～18年3月
井上順一郎	名古屋大学工学研究科・応用物理学専攻	教授	スピン機能デバイスの理論	平成13年4月～18年3月
伊藤博介	名古屋大学工学研究科・応用物理学専攻	助手	スピン機能デバイスの理論	平成13年4月～18年3月

②長濱グループ(スピン機能素子の研究)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
長浜太郎	産業技術総合研究所エレクトロニクス部門	主任研究員	スピン機能デバイス	平成12年11月～18年3月
湯浅新治	産業技術総合研究所エレクトロニクス部門	主任研究員 グループリーダー	スピン機能デバイス	平成12年11月～18年3月
鈴木義茂	大阪大学基礎工学研究科/産業技術総合研究所エレクトロニクス部門兼任	教授/ 客員研究員	研究代表 スピン機能デバイスの総括	平成12年11月～18年3月
久保田均	産業技術総合研究所エレクトロニクス部門	主任研究員	スピン機能デバイス	平成16年4月～18年3月
福島章雄	産業技術総合研究所エレクトロニクス部門	主任研究員	スピン機能デバイス	平成16年4月～18年3月
片山利一	産業技術総合研究所エレクトロニクス部門	支援研究員	スピン機能デバイス	平成16年4月～18年3月
横山侑子	産業技術総合研究所エレクトロニクス部門	実験補助員	スピン機能デバイス	平成12年11月～18年3月
Tulapurkar Ashwin	産業技術総合研究所エレクトロニクス部門	JSPS Fellow	スピン機能デバイス	平成14年4月～平成16年3月
斎藤秀和	産業技術総合研究所エレクトロニクス部門	研究員	スピン機能デバイス	平成12年11月～平成14年3月
時鐘	産業技術総合研究所エレクトロニクス部門	CREST 技術員	スピン機能デバイス	平成13年4月～平成14年3月

③大谷グループ(スピン注入磁化反転の研究)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
大谷義近	東京大学物性研究所/理研量子ナノ磁性研究チーム	教授/理研チームリーダー	グループ統括 スピン注入磁化反転・磁気相転移	平成12年11月 ～平成18年3月
木村崇	東京大学物性研究所/量子ナノ磁性研究チーム	助手	スピン注入磁化反転・磁気相転移	平成14年4月 ～平成18年3月 (平成17年度より東大物性研に移動)
柴田絢也	量子ナノ磁性研究チーム	研究員	スピン注入磁化反転・磁気相転移	平成14年4月 ～平成18年3月
楊涛	量子ナノ磁性研究チーム	研究員	スピン注入磁化反転・磁気相転移	平成15年2月 ～平成18年3月
原正大	量子ナノ磁性研究チーム	研究員	スピン注入磁化反転・磁気相転移	平成16年4月 ～平成18年3月
廣畑貴文	量子ナノ磁性研究チーム	研究員	スピン注入磁化反転・磁気相転移	平成17年4月 ～平成18年3月
石田俊樹	東京大学物性研究所	修士1年	スピン注入磁化反転・磁気相転移	平成17年4月 ～平成18年3月
Jaroslav Hamrle	量子ナノ磁性研究チーム	研究員	スピン注入磁化反転・磁気相転移	平成15年4月 ～平成17年9月
Andrei Moskalenko	科技団	CREST研究員	スピン注入磁化反転・磁気相転移	平成14年4月 ～平成15年2月
重藤訓志	量子ナノ磁性研究チーム	研究員	微小磁性体磁化反転	平成14年4月 ～平成15年9月
藤田麻哉	東北大学大学院工学研究科材料物性学専攻	助手	スピン注入磁化反転・磁気相転移	平成12年11月 ～平成13年3月
Novosad Valentine	東北大学大学院工学研究科材料物性学専攻	助手	スピン注入磁化反転・磁気相転移	平成12年11月 ～平成13年8月
金承九	東北大学大学院工学研究科材料物性学専攻	博士研究員	スピン注入磁化反転・磁気相転移	平成12年11月 ～平成13年3月

④宮崎グループ(スピン機能評価の研究)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
宮崎照宣	東北大学大学院 工学研究科応用 物理学専攻	教授	スピン機能評価とスピ ン機能評価の 総括	平成12年11月 ～平成18年3月
安藤康夫	東北大学大学院 工学研究科応用 物理学専攻	助教授	スピン機能評価	平成12年11月 ～平成18年3月
久保田均	東北大学大学院 工学研究科応用 物理学専攻	助教授	スピン機能評価	平成12年11月 ～平成15年3月 平成16年度～産総研 へ移動
水上成美	日本大学工学 部総合教育物 理学教室	講師	スピン機能評価	平成14年4月 ～平成18年3月
大兼幹彦	東北大学大学院 工学研究科応用 物理学専攻	助手	スピン機能評価	平成12年11月 ～平成18年3月
大坊忠臣	東北大学大学院 工学研究科応用 物理学専攻	研究員	スピン機能評価	平成13年4月 ～平成18年3月
林 将光	東北大学大学院 工学研究科応用 物理学専攻	離脱	スピン機能評価	平成14年4月 ～平成14年3月
新関智彦	東北大学大学院 工学研究科応用 物理学専攻	研究員	スピン機能評価	平成14年4月 ～平成18年3月
中村洋明	東北大学大学院 工学研究科応用 物理学専攻	離脱	スピン機能評価	平成15年4月 ～平成15年3月
桜庭裕弥	東北大学大学院 工学研究科応用 物理学専攻	D2	スピン機能評価	平成16年4月 ～平成18年3月
劉 智亨	東北大学大学院 工学研究科応用 物理学専攻	離脱	スピン機能評価	平成16年4月 ～平成18年3月
家形 諭	東北大学大学院 工学研究科応用 物理学専攻	D1	スピン機能評価	平成17年4月 ～平成18年3月

5 成果発表等

(1)論文発表 (英文 95 件、和文 22 件)

英文

- [1] T. Nagahama, S. Yuasa, Y. Suzuki and E. Tamura, "Quantum-well effect in magnetic tunnel junctions with ultrathin single-crystal Fe (100) electrodes", *Applied Physics Letters*, vol. 79, number 26, page 4381-4383 (2001).
- [2] Andrew C. C. Yu, A. Petford-Long, and T. Miyazaki, Direct observation of domain structure and magnetization reversal of magnetic thin films using Lorentz transmission electron microscopy, *Jpn. J. Appl. Phys.* 40 (2001) 4891-4896.
- [3] Andrew C. C. Yu, R. Doole, A. Petford-Long, and T. Miyazaki, "High resolution electron microscopy of Al-oxide barriers in magnetic tunnel junctions", *Jpn. J. Appl. Phys.* 40 (2001) 5058-5064.
- [4] J. Murai, Y. Ando, T. Daibou, K. Yaoita, H. F. Han and T. Miyazaki, Magnon excitation of CoFe/Al-oxide/CoFe ferromagnetic tunnel junctions, *J. Magn. Magn. Mater.*, 226-230 (2001) 922-923.
- [5] Y. Ando, M. Hayashi, M. Kamijo, H. Kubota and T. Miyazaki, Local transport properties of ferromagnetic tunnel junctions, *J. Magn. Magn. Mater.*, 226-230 (2001) 924-925.
- [6] S. Mizukami, Y. Ando and T. Miyazaki Ferromagnetic resonance linewidth for NM/80NiFe/NM films (NM=Cu, Ta, Pd and Pt), *J. Magn. Magn. Mater.*, 226-230 (2001) 1640-1642.
- [7] M. Hayashi, Y. Ando and T. Miyazaki, Scanning Tunneling Microscopy Observation of the Initial State of Oxidation in Ferromagnetic Tunnel Junctions, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 40 (2001) L1317-L13109.
- [8] T. Kawagoe, E. Tamura, Y. Suzuki, and K. Koike, "Scattering of surface-state electrons by the monatomic step in Fe(001): Differential conductivity imaging by scanning tunneling microscopy" *Physical Review B*, vol. 65, page 024406 (2002).
- [9] T. Nagahama, S. Yuasa, Y. Suzuki, E. Tamura, "Quantum size effect in magnetic tunnel junctions with ultrathin Fe(001) electrodes", *Journal of Applied Physics*, 91-10, pp.7035-7037, 2002/05.
- [10] S. Yuasa, T. Nagahama, Y. Suzuki, "Spin-Polarized Resonant Tunneling in Magnetic Tunnel Junctions", *Science*, 297-5579, pp.234-237, 2002/07.
- [11] S. Yuasa, T. Nagahama, T. Kawakami, K. Ando, Y. Suzuki, "A large quantum-well oscillation of the TMR effect", *J.Phys.D:Appl.Phys.*, 35, pp.2427-2431, 2002/09.
- [12] J. Inoue, H. Itoh, "Magnetoresistance and interfacial electronic state of impurity doped ferromagnetic tunnel junctions", *Journal of Physics D*, 35, pp.2432-2436 (2002).
- [13] T. Devolder, C. Chappert, V. Mathet, S. Bounabi, Y. Suzuki, Y. Yokoyama, H. Bernas, "Weak coercivity dispersion in magnetic nanostructures fabricated by ion irradiation", *IEEE Transactions on Magnetism*, Vol. 38, No. 5 (2002)pp.2547-2549.
- [14] V. Novosad, M. Grimsditch, K. Guslienko, P. Vavassori, Y. Otani, and S.D. Bader, "Spin excitations in magnetic vortices in ferromagnetic nanodots", *Phys. Rev. B* 66 (2002)
- [15] T. Kimura, "Fabrication of spin-current-induced domain-wall-nucleation device in

- planar configuration”, *Journal of Vacuum Science of Technology B*, 20 (2002)
- [16] H. Kubota, G. Reiss, H. Bruckl, W. Schepper, J. Wecker, G. Gieres, Magnetoresistance and Dipole Shift of Ultrasmall Magnetic Tunnel Junctions Characterized by Conducting Atomic Force Microscope, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 41 (2002) L180-L182.
- [17] Andrew C. C. Yu, C. C. H. Lo, A. Petford-Long, D. Jiles, and T. Miyazaki, Lorentz transmission electron microscopy and magnetic force microscopy characterization of NiFe/Al-oxide/Co films, *J. Appl. Phys.*, 91 (2002) 780-784.
- [18] S. Mizukami, Y. Ando, T. Miyazaki, Magnetic relaxation of normal-metal(NM)/80NiFe/NM films, *J. Magn. Magn. Mater.*, 239 (2002) 42-44.
- [19] X. F. Han, W. Y. Lai, J.-Q. Wang, C. J. O'Connor, T. Miyazaki, A self-consistent calculation of intrinsic magnetoelectric properties in magnetic tunnel junctions, *J. Magn. Magn. Mater.*, 239 (2002).
- [20] S. Mizukami, Y. Ando and T. Miyazaki, Effect of spin diffusion on Gilbert damping for a very thin Ni₈₀Fe₂₀ layer in Cu/ Ni₈₀Fe₂₀/Cu/Pt films, *Physical Review B*, 66 (2002) 104413-1 -9.
- [21] Y Ando, M Hayashi, S Iura, K Yaoita, C C Yu, H Kubota and T Miyazaki, Growth mechanism of thin insulating layer in ferromagnetic tunnel junctions prepared using various oxidation methods, *J. Phys. D*, 35 (2002) 2415-2421..
- [22] T. Kawagoe, Y. Suzuki, M. Bode, K. Koike, "Evidence of a topological antiferromagnetic order on ultrathin Cr(001) film surface studied by spin-polarized scanning tunneling spectroscopy", *Journal of Applied Physics*, Vol. 93, No. 10 (2003) pp.6575-6577.
- [23] V. Novosad, M. Grimsditch, J. Darrouzet, J. Pearson, S.D. Bader, V. Metlushko, K. Guslienko, Y. Otani, H. Shima, and K. Fukamichi, "Shape effect on magnetization reversal in chains of interacting ferromagnetic elements", *Appl. Phys. Lett.* 82 (2003)
- [24] J. Shibata, K. Shigeto, and Y. Otani, "Dynamics of magnetostatically coupled vortices in magnetic nanodisks", *Phys. Rev. B* 67 (2003)
- [25] G. N. Kakazei, P.E. Wigen, K. Yu Guslienko, R.W. Chantrell, N.A. Lesnik, V. Metlushko, H. Shima, K. Fukamichi, Y Otani, and V. Novosad, "In-plane and out-of-plane uniaxial anisotropies in rectangular arrays of circular dots studied by ferromagnetic resonance" , *J. Appl. Phys.* 93 (2003)
- [26] T. Kimura, Y. Otani, I. Yagi, K. Tsukagoshi, and Y. Aoyagi, "Spin current assisted domain wall depinning in a submicron magnetic wire", *J. Appl. Phys.* 94 (2003)
- [27] T. Kimura, Y. Otani, K. Tsukagosi, and Y. Aoyagi, "Suppressed pinning filed of a trapped domain wall due to direct current injection", *J. Appl. Phys.* 94 (2003)
- [28] S. Iura, H. Kubota, Y. Ando, T. Miyazaki, Thermal Stability of Tunnel Junctions with additional oxidation at the surface of the bottom electrode, *J. Magn. Soc. Jpn.*, 27, 303-306 (2003).
- [29] T. Miyazaki, Y. Ando and H. Kubota, Recent Development of MRAM Technology, *Journal of Magnetism*, 8, 36-44 (2003).
- [30] Y. Ando, M. Hayashi, M. Oogane, H. Kubota, and T. Miyazaki, "Interface characterization of magnetic tunnel junctions by using tunneling spectroscopy", *J. Appl. Phys.*, 93, 7023-7025 (2003).
- [31] H. Kubota, M. Hamada, Y. Ando, and T. Miyazaki, "Hard mask fabrication for magnetic random access memory elements using focused ion beam assisted

- selective chemical vapor deposition”, *J. Appl. Phys.*, 93, 8370-8372 (2003).
- [32] J.H. Yu, H. Lee, M. Hayashi, M. Oogane, T. Daibou, H. Nakamura, H. Kubota, Y. Ando and T. Miyazaki, “Magnetic tunnel junctions with high magnetoresistance and small bias voltage dependence using epitaxial NiFe(111) ferromagnetic bottom electrodes”, *J. Appl. Phys.*, 93, 8555-8557 (2003).
- [33] J. H. Yu, H. M. Lee, Y. Ando, T. Miyazaki, “Electron transport properties in magnetic tunnel junctions with epitaxial NiFe (111) ferromagnetic bottom electrodes”, *Appl. Phys. Lett.*, 82, 4735-4737 (2003).
- [34] H. Kubota, Y. Ando, T. Miyazaki, G. Reiss, H. Brückl, and W. Schepper, “Size dependence of switching field of magnetic tunnel junctions down to 50 nm scale”, *J. Appl. Phys.*, 94, 2028-2032 (2003).
- [35] S. Mizukami, Y. Ando, T. Miyazaki, “Spin Pumping in Ferromagnetic-Metal/Normal-Metal Junctions”, *J. Magn. Soc. Jpn.*, 27, 934-939 (2003).
- [36] T. Niizeki, H. Kubota, Y. Ando, T. Miyazaki, “Nanofabrication of magnetic tunnel junctions by using side-edge thin film deposition”, *Science and Technology of Advanced Materials*, 4, 347–352 (2003).
- [37] H. Itoh, J. Inoue, A. Umerski, and J. Mathon, “Quantum oscillation of TMR in tunneling junctions containing a non-magnetic spacer”, *J. Magn. Magn. Mater.* 272-276 (2004) e1467-e1468.
- [38] A. A. Tulapurkar, T. Devolder, K. Yagami, P. Crozat, C. Chappert, A. Fukushima, Y. Suzuki, “Sub-nanosecond Magnetization Reversal in Magnetic Nanopillars by Spin Angular Momentum Transfer”, *Applied Physics Letters*, Vol.85, No.22 (2004) pp.5358-5360.
- [39] H. Itoh, J. Inoue, A. Umerski, and J. Mathon, “Quantum oscillation of TMR in tunneling junctions containing a non-magnetic spacer”, *J. Magn. Magn. Mater.* 272-276 (2004) e1467-e1468.
- [40] T. Kimura, Y. Otani, I. Yagi, K. Tsukagoshi, and Y. Aoyagi, “Domain wall drag due to dc current injection into ferromagnetic nano-wires”, *J. Magn. Magn. Mater.*, 272-276 (2004)
- [41] T. Kimura, Y. Otani, K. Tsukagoshi, and Y. Aoyagi, “Non-local Hall resistance measured in submicron-scale non-magnetic/ferromagnetic junctions”, *J. Magn. Magn. Mater.*, 272-276 (2004)
- [42] J. Shibata, K. Shigeto, and Y. Otani, “Dynamics of nano-scale magnetic vortices in ferromagnetic dot arrays”, *J. Magn. Magn. Mater.*, 272-276 (2004)
- [43] G. Council, J-V. Kim, K. Shigeto, Y. Otani, T. Devolder, P. Crozat, H. Hurdequint, and C. Chappert, “Inductive measurement of the high frequency permeability of a Permalloy thin film”, *J. Magn. Magn. Mater.*, 272-276 (2004)
- [44] J. Shibata and Y. Otani, “Magnetic vortex dynamics in a two-dimensional square lattice of ferromagnetic nanodisks”, *Phys. Rev.*, B 70 (2004)
- [45] G.N. Kakazei, P.E. Wigen, K. Y. Guslienko, V. Novosad, A.N. Slavin, V.O. Golub, N.A. Lesnik, and Y. Otani, “Spin-wave spectra of perpendicularly magnetized circular submicron dot arrays”, *Appl. Phys. Lett.*, 85 (2004)
- [46] T. Kimura, J. Hamrle, Y. Otani, K. Tsukagoshi, and Y. Aoyagi, “Spin-dependent boundary resistance in the lateral spin valve structure”, *Appl. Phys. Lett.*, 85 (16), (2004)
- [47] T. Kimura, J. Hamrle, Y. Otani, K. Tsukagoshi, and Y. Aoyagi, “Suppression of spin

- accumulation in nonmagnet due to ferromagnetic ohmic contact”, *Appl. Phys. Lett.*, 85 (2004)
- [48] T. Kimura, J. Hamrle, Y. Otani, K. Tsukagoshi, and Y. Aoyagi. “Enhancement of nonlocal spin-valve signal using spin accumulation in local spin-valve configuration”, *Appl. Phys. Lett.*, 85 (2004)
- [49] G. Counil, J-V. Kim, T. Devolder, C. Chappert, K. Shigeto, and Y. Otani, “Spin wave contributions to the high-frequency magnetic response of thin films obtained with inductive methods”, *J. Appl. Phys.*, 95, (2004)
- [50] D. Watanabe, H. Kubota, Y. Ando, and T. Miyazaki, “A Simple Fabrication Process using Focused Ion Beam for Deep Submicron Magnetic Tunnel Junctions”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 43 (2004) 7489-7490.
- [51] M. Hayashi, Y. Ando, M. Oogane, H. Kubota, T. Miyazaki, “Spin-dependent inelastic electron tunneling spectroscopy of magnetic tunnel junctions”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 43 (2004) 7472-7476.
- [52] T. Miyazaki, “Recent development of MRAM and related phenomena”, *Trans. Magn. Soc. Japan*, 4 (2004) 67-73.
- [53] H. Kubota, J. Nakata, M. Oogane, Y. Ando, A. Sakuma, and T. Miyazaki, “Large magnetoresistance in magnetic tunnel junctions using Co-Mn-Al full Heusler alloy”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 43 (2004) L984-L986.
- [54] H. Nakamura, Y. Ando, S. Mizukami, H. Kubota, T. Miyazaki, “Measurement of Magnetization Precession for NM/Ni₈₀Fe₂₀/NM (NM=Cu and Pt) Using Time-Resolved Kerr Effect”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 43 (2004) L787-L789.
- [55] Y. Ando, H. Nakamura, S. Mizukami, H. Kubota, T. Miyazaki, “Time-resolved magnetization precession and reversal dynamics investigated using tunneling current and Kerr effect”, *J. Magn. Magn. Mater.*, 272-276 (2004) 293-294.
- [56] T. Niizeki, H. Kubota, Y. Ando, T. Miyazaki, “Nanofabrication of magnetic tunnel junctions by using electron beam lithography”, *J. Magn. Magn. Mater.*, 272-276 (2004) 1947-1948.
- [57] H. Kubota, Y. Ando, T. Miyazaki, “CO+NH₃ plasma etching for magnetic thin films”, *J. Magn. Magn. Mater.*, 272-276 (2004) e1421-e1422.
- [58] M. Oogane, H. Kubota, Y. Ando, T. Miyazaki, “Tunnel spectra for Al/Al-oxide/Ni₈₀Fe₂₀ junctions under the superconducting transition temperature of Al films”, *J. Magn. Magn. Mater.*, 272-276 (2004) e1515-e1516.
- [59] M. Oogane, H. Kubota, Y. Ando, T. Miyazaki, “Tunnel Conductance in Ni₈₀Fe₂₀/Al-oxide/Al Junctions below the superconducting transition temperature of the Al films”, *Transactions of Material Research Society*, 29 (2004) 1527-1530.
- [60] C. You, and Y. Suzuki, “Tunable interlayer exchange coupling energy by modification of Schottky barrier potentials”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Volume 293, Issue 2, Pages 774-781, 2005.
- [61] T. Devolder,* P. Crozat, and C. Chappert, J. Miltat, A. Tulapurkar and Y. Suzuki, K. Yagami, “Instability threshold versus switching threshold in spin-transfer-induced magnetization switching”, *PHYSICAL REVIEW B* 71, 184401(6),2005.
- [62] A. Thiaville, Y. Nakatani, J. Miltat and Y. Suzuki, “Micromagnetic understanding of current-driven domain wall motion in patterned nanowires”, *Europhys. Lett.*, 69 (6), pp. 990–996 (2005).
- [63] M. Mizuguchi and Y. Suzuki, T. Nagahama and S. Yuasa, “In situ scanning tunneling microscopy of atomically flat amorphous oxidized aluminum layer

- constituting magnetic tunneling junction”, Applied Physics Letters 87, 171909 (2005).
- [64] Rie Matsumoto, Yusuke Hamada, Masaki Mizuguchi, Masashi Shiraishi, Hiroki Maehara, Koji Tsunekawa, David D. Djayaprawira, Naoki Watanabe, Yoshinari Kurosaki, Taro Nagahama, Akio Fukushima, Hitoshi Kubota, Shinji Yuasa and Yoshishige Suzuki, “Tunneling Spectra of Sputter-Deposited CoFeB/MgO/CoFeB Magnetic Tunnel Junctions Showing Giant Tunneling Magnetoresistance Effect”, Solid State Communication, Volume 136(2005) pp.611-615.
- [65] A. A. Tulapurkar, Y. Suzuki, A. Fukushima, H. Kubota, H. Maehara, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe & S. Yuasa, “Spin-torque diode effect in magnetic tunnel junctions”, Nature, Vol 438(2005)339.
- [66] T. Devolder, C. Chappert, and P. Crozat, A. Tulapurkar and Y. Suzuki, J. Miltat, K. Yagami, “Precharging strategy to accelerate spin-transfer switching below the nanosecond”, Applied Physics Letters, **86**(2005)062505-1 - 062505-3.
- [67] T. Devolder, A. Tulapurkar, K. Yagami, P. Crozata, C. Chappert, A. Fukushima, Y. Suzuki, “Ultra-fast magnetization reversal in magnetic nano-pillars by spin-polarized current”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 286(2005)77-82.
- [68] Nagahama, T; Yuasa, S; Tamura, E; Suzuki, Y, “Spin-dependent tunneling in magnetic tunnel junctions with a layered antiferromagnetic Cr(001) spacer: Role of band structure and interface scattering”, *Phys. Rev. Lett.*, vol.**95**, 086602 (2005).
- [69] T. Kawagoe, Y. Iguchi, A. Yamasaki, Y. Suzuki, M. Bode, K. Koike, and S. Suga, “Surface magnetic structures of epitaxial Cr (001) films on Au(001) studied by spin-polarized scanning tunneling spectroscopy”, Physics Review B, **71**, 014427 (2005).
- [70] G. Kimura, T. Ohsawa, H. Itoh, J. Inoue, “Tunnel magnetoresistance of junctions with twisted magnetization”, Transactions of the Magnetic Society of Japan, **5** (2005) 13-17.
- [71] G. Kimura, T. Ohsawa, H. Itoh, J. Inoue, “Tunnel magnetoresistance of junctions with twisted magnetization”, Transactions of the Magnetic Society of Japan, **5** (2005) 13-17.
- [72] T. Kimura, J. Hamrle, Y. Otani, K. Tsukagoshi, and Y. Aoyagi, “Effect of probe configuration on spin accumulation in lateral spin valve structure”, J. Magn. Mater., 286 (2005)
- [73] J. Shibata, G. Tatara, and H. Kohno, “Effect of spin current on uniform ferromagnetism: Domain nucleation”, Phys. Rev. Lett., 94 (2005)
- [74] T. Kimura, J. Hamrle and Y. Otani, “Spin-polarized current induced in a single ferromagnetic strip due to inhomogeneous spin injection”, J. Appl. Phys., 97 (2005)
- [75] T. Yang, T. Kimura, and Y. Otani, “Spin-injection-induced intermediate state in a Co nanopillar”, J. Appl. Phys., 97(2005)
- [76] J. Hamrle, T. Kimura, Y. Otani, K. Tsukagoshi and Y. Aoyagi, “Current distribution inside Py/Cu lateral spin-valve device”, Phys. Rev. B 71(2005)
- [77] J. Hamrle, T. Kimura, T. Yang, and Y. Otani, “Three-dimensional distribution of spin-polarized current inside (Cu/Co) pillar structures”, Phys. Rev. B 71(2005)
- [78] T. Kimura, J. Hamrle, and Y. Otani, “Estimation of spin-diffusion length from the magnitude of spin-current absorption: Multiterminal ferromagnetic / nonferromagnetic hybrid structures”, Phys. Rev. B 72 (2005)

- [79] T. Kimura, J. Hamrle, Y. Otani, K. Tsukagoshi and Y. Aoyagi, "Influence of Au Capping Layer on Spin Accumulation in a Lateral Spin-Valve Structure", *IEEE Trans. Magn.* 41 (2005)
- [80] T. Kimura, Y. Otani, and J. Hamrle, "Determination of magnetic vortex chirality using lateral spin-valve geometry", *Appl. Phys. Lett.* 87 (2005) and the cover in the October 24, 2005 issue. (http://apl.aip.org/apl/covers/87_17.jsp)
- [81] J. Shibata, G. Tatara, H. Kohno and Y. Otani, "Current-induced Domain Nucleation in Ferromagnet", *IEEE Trans. Magn.* 41 (2005)
- [82] T. Yang, J. Hamrle, T. Kimura, and Y. Otani, "Influence of top electrode on the current-induced magnetic switching in magnetic nanopillars", *Appl. Phys. Lett.* 87, (2005)
- [83] J. Hamrle, T. Kimura, T. Yang, and Y. Otani, "Three-dimensional distribution of the spin-polarized current inside nanostructures", *J. Appl. Phys.* 98 (2005)
- [84] Y. Ando, T. Miyakoshi, M. Oogane, T. Miyazaki, H. Kubota, K. Ando, S. Yuasa, "Spin-dependent tunneling spectroscopy in single-crystal Fe/MgO/Fe tunnel junctions", *Appl. Phys. Lett.*, 87, No14 (2005).
- [85] Y. Sakuraba, J. Nakata, M. Oogane, H. Kubota, Y. Ando, A. Sakuma, T. Miyazaki, "Fabrication of Co_2MnAl Heusler Alloy Epitaxial Film Using Cr Buffer Layer", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 44 (2005) 6535-6537.
- [86] Y. Sakuraba, J. Nakata, M. Oogane, H. Kubota, Y. Ando, A. Sakuma, and T. Miyazaki, "Huge Spin-Polarization of L_{21} -Ordered Co_2MnSi Epitaxial Heusler Alloy Film", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 44 (2005) L1100-L1102.
- [87] M. Oogane, J. Nakata, H. Kubota, Y. Ando, A. Sakuma, and T. Miyazaki, "Temperature Dependence of Tunnel Magnetoresistance in Co-Mn-Al/Al-Oxide/Co-Fe Junctions", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 44 (2005) L760-L762.
- [88] S.-J. Ahn, T. Kato, H. Kubota, Y. Ando, and T. Miyazaki, "Bias-voltage dependence of magnetoresistance in magnetic tunnel junctions grown on Al_2O_3 (0001) substrates", *Appl. Phys. Lett.*, 86 (2005) 102506-1-3.
- [89] T. Niizeki, H. Kubota, Y. Ando, and T. Miyazaki, "Fabrication of ferromagnetic single-electron tunneling devices by utilizing metallic nanowire as hard mask stencil", *J. Appl. Phys.* 97 (2005) 10C909-1-3.
- [90] H. Kubota, J. Nakata, M. Oogane, Y. Ando, H. Kato, A. Sakuma, and T. Miyazaki, "Fabrication and characterization of Co-Mn-Al Heusler-type thin film", *J. Appl. Phys.* 97 (2005) 10C913-1-3.
- [91] S. Yakata, Y. Ando, S. Mizukami, T. Miyazaki, "FMR spectrum-linewidth and spin diffusion length in $\text{Cu/NiFe}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{N}$ ($\text{N}=\text{Cu}, \text{Cu/Pt}$)", *J. Magn. Soc. Jpn.*, 29 (2005) 450-454.
- [92] H. Itoh and J. Inoue, "Theory of tunnel magnetoresistance", *J. Magn. Soc. Jpn.*, 30 (2006) 1-37.
- [93] H. Itoh, J. Ozeki, and J. Inoue, "Effects of disorder on tunnel magnetoresistance in Fe/MgO/Fe junctions", *J. Magn. Mater.*, in press.
- [94] J. Ozeki, T. Ohsawa, H. Itoh, J. Inoue, "Magnetoresistance and interlayer exchange coupling in perovskite manganite junctions", *J. Magn. Mater.*, in press.
- [95] J. Shibata, Y. Nakatani, G. Tatara, H. Kohno, and Y. Otani, "Current-induced Vortex Motion by Spin-Transfer Torque", *Phys. Rev. B* 73, 020403(R) (2006)
- [96] T. Kimura, Y. Otani, and J. Hamrle, "Switching magnetization of nano-scale

- ferromagnetic particle using non-local spin injection”, submitted to Phys. Rev. Lett. 96, (2006)
- [97] T. Yang, J. Hamrle, T. Kimura, and Y. Otani, “Roles of spin-polarized current and spin accumulation in the current-induced magnetization switching”, submitted to J. Magn. Magn. Mater.
- [98] M. Hara, T. Kimura, J. Shibata and Y. Otani, “Detection of magnetization process in a small ferromagnetic ring by using semiconductor two-dimensional electron system” (仮題) , submitted to Appl. Phys. Lett.

和文

- [1] 井浦聡則, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, ラジカル酸化法で作製した高耐熱強磁性トンネル接合, 日本応用磁気学会誌, 26 (2002) 839-842.
- [2] 湯浅新治, 長浜太郎, 鈴木義茂, 田村英一
「磁気トンネル接合の TMR 効果と共鳴トンネル効果」
日本物理学会誌, vol. 58, no. 1, pp. 38-42 (2003).
- [3] 長浜太郎, 湯浅新治, 鈴木義茂, 田村英一
「単結晶電極を持つ強磁性トンネル接合のトンネル磁気抵抗効果」
日本応用磁気学会誌, vol. 27, no. 1, pp. 14-20 (2003).
- [4] 屋上公二郎, 鈴木義茂, 「スピントロニクス基礎と最前線 第 14 章 スピン注入による磁化反転」, シーエムシー出版, 東京 (2004) 167-183.
- [5] 屋上公二郎, 鈴木義茂, 「スピン注入磁化反転の研究動向」, 日本応用磁気学会誌, 第 28 巻, 9 号 (2004), pp. 937-948.
- [6] 黒崎義成, 長浜太郎, 湯浅新治, 鈴木義茂, 片山利一, 「トンネル磁気抵抗効果の Fe(001) 電極膜厚依存性」, 日本応用磁気学会誌, 第 29 巻, 4 号 (2004), pp. 446-449.
- [7] 屋上公二郎, 鈴木義茂, 「スピントロニクス基礎と最前線 第 14 章 スピン注入による磁化反転」, シーエムシー出版, 東京 (2004) 167-183.
- [8] 屋上公二郎, 鈴木義茂, 「スピン注入磁化反転の研究動向」, 日本応用磁気学会誌, 第 28 巻, 9 号 (2004), pp. 937-948.
- [9] 黒崎義成, 長浜太郎, 湯浅新治, 鈴木義茂, 片山利一, 「トンネル磁気抵抗効果の Fe(001) 電極膜厚依存性」, 日本応用磁気学会誌, 第 29 巻, 4 号 (2004), pp. 446-449.
- [10] 大谷 義近, 「ナノ磁気円盤格子の多彩な物性」, パリティ, 19, 04 (2004)
- [11] 赤羽 浩一, 木村 崇, 大谷 義近, 「高感度マイクロ Kerr 磁化測定装置の開発」, 日本応用磁気学会誌, 28 (2004)
- [12] 大谷 義近, 「スピントロニクス基礎と最前線 第 9 章 配列ドット格子と磁気物性」, シーエムシー出版 東京 (2004)
- [13] 渡邊大輔, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, ” 集束イオンビームを用いた微小強磁性トンネル接合の作製” , 日本応用磁気学会誌, 28, 569-572 (2004).
- [14] 中田淳, 大兼幹彦, 久保田均, 安藤康夫, 加藤宏朗, 宮崎照宣, ” Co₂MnAl ホイスラー合金を用いた強磁性トンネル接合” , 日本応用磁気学会誌, 28, 573-576 (2004).
- [15] 安藤康夫, 水上成美, 宮崎照宣, 「スピンドYNAMIXとスピントロニクスデバイス」, 固体物理, 45 (2005) 35-43.
- [16] 宮崎照宣, 「トンネル磁気抵抗効果」, スピントロニクス基礎と最前線, 第 2 章, シーエムシー出版 (2004) 12-27.
- [17] 安藤康夫, 水上成美, 中村洋明, 久保田均, 宮崎照宣, 「スピンドYNAMIX」, スピントロニクス基礎と最前線, 第 5 章, シーエムシー出版 (2004) 51-63.
- [18] 小瀬木淳一, 大澤友克, 伊藤博介, 井上順一郎, “Mn 酸化物を用いたトンネル接合の TMR に対するスピン揺らぎの効果” , 日本応用磁気学会誌, 29 (2005) 286-291.

- [19]木村 崇, J. Hamrle, 大谷 義近, 「非局所手法を用いたスピン蓄積およびホール効果の測定」, 日本応用磁気学会誌 29, (2005)
- [20]多々良 源, 河野 浩, 柴田 絢也, 斎藤 英治, 「電流による磁壁駆動の物理」, 固体物理 40 (2005)
- [21]多々良 源, 河野 浩, 柴田 絢也, 仲谷 栄伸, 山口 明啓, 小野 輝男, 「電流による磁壁駆動」, 応用物理 第74巻 第12号 (2005)
- [22]安藤康夫, 水上成美, 宮崎照宣, 「スピンドYNAMIXとスピントロニクスデバイス」, 固体物理, 45 (2005) 35-43.

(2)口頭発表 国際会議 126 件(招待及び口頭講演 97 件、ポスター講演 29 件)
国内会議 173 件(招待及び口頭講演 170 件、ポスター講演 3 件)

①招待及び口頭講演

国際会議

- [1] S. Yuasa, T. Nagahama, Y. Suzuki and K. Ando, "Magnetic Tunnel Junctions with Ultrathin Al-O Barrier", International Symposium on Physics of Magnetic Materials, Taiwan, 2001/05/13 [Invited].
- [2] Taro Nagahama, Yoshishige Suzuki, Shinji Yuasa, Eiichi Tamura, "TUNNEL SPECTRA OF MAGNETIC TUNNEL JUNCTIONS WITH EPITAXIAL Fe ELECTRODES", International Symposium on Physics of Magnetic Materials, Taiwan, 2001/05/14
- [3] Takeshi Kawagoe, Yoshishige Suzuki, Shinji Yuasa, "Observation of Spin-Polarized Tunneling Using Scanning Tunneling Microscopy", International Symposium on Physics of Magnetic Materials, Taiwan, 2001/05/16
- [4] T.Nagahama, S.Yuasa, Y.Suzuki, and E.Tamura, "Quantum size effect of magnetic tunnel junction with ultrathin Fe (100) electrodes", International Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Ceattle, 2001/11/13
- [5] Yoshishige Suzuki, Taro Nagahama, Shinji Yuasa, and Koji Ando, "Resonant Tunneling Magneto-Resistance Devices and Its Development into Nano-Spinelectronics", AIST Nanotech symposium, Odaiba, 2001/11/14 [Invited].
- [6] T. Kawagoe, E. Tamura, Y. Suzuki and K. Koike, "Local electronic states at steps on the epitaxial Fe(001) film surface studied by differential conductivity imaging using STM", Yamada conference, Tsukuba, 2001/11/14
- [7] H. F. Han, W. Y. Lai, T. Miyazaki, J. Q. Wang and C. J. O'Connor, A Self-Consistent Calculation of Intrinsic Magnetoelectric Properties in Magnetic Tunnel Junctions, International Symposium on Physics of Magnetic Materials, Taipei, Taiwan, 5/13-16/2001.
- [8] Y. Ando, M. Hayashi, K. Yaoita, S. Iura, H. Kubota and T. Miyazaki, Growth Mechanism of Thin Insulating Layer in Ferromagnetic Tunnel Junctions Analyzed by Conducting AFM Method, International Symposium on Physics of Magnetic Materials, Taipei, Taiwan, 5/13-16/2001.
- [9] S. Mizukami, Y. Ando and T. Miyazaki, Magnetic Relaxation of Normal-Metal(NM)/80NiFe/NM Films, International Symposium on Physics of Magnetic Materials, Taipei, Taiwan, 5/13-16/2001.
- [10] Y. Ando, M. Hayashi, K. Yaoita, S. Iura, H. Kubota and T. Miyazaki, Growth Mechanism of Thin Insulating Layer in Ferromagnetic Tunnel Junctions Analyzed by Conducting AFM Method, 4th International Symposium on Metallic Multilayers, Aachen, Germany, 6/24-29/2001.
- [11] Y. Ando, T. Siripongsakul, Andrew C. C. Yu, H. Kubota, T. Miyazaki, C. Kim and O. Song, Spin Dependent Transport Properties in Ferromagnetic Double Barrier Junctions, 4th International Symposium on Metallic Multilayers, Aachen, Germany,

- 6/24-29/2001.
- [12] T. Nagahama, S. Yuasa, Y. Suzuki, E. Tamura, and K. Ando, "Observation of quantum-well states in magnetic tunnel junctions with ultrathin Fe electrodes", International Colloquium on Magnetic Thin Films, Kyoto, 2002/03/07
 - [13] Y. Suzuki, E. Tamura, S. Yuasa, and T. Nagahama, "Theory of quantum size effects in the magnetic tunnel junction", International Colloquium on Magnetic Thin Films, Kyoto, 2002/03/06
 - [14] S. Yuasa, T. Nagahama, K. Ando, and Y. Suzuki, "A large quantum-well oscillation of the TMR effect", International Colloquium on Magnetic Thin Films, Kyoto, 2002/03/06 [Invited].
 - [15] T. Kawagoe, E. Tamura, Y. Suzuki and K. Koike, "Scattering of surface-state electrons by steps on the epitaxial magnetic film: differential conductivity imaging by STM", International Colloquium on Magnetic Thin Films, Kyoto, 2002/03/06
 - [16] Y. Suzuki, T. Nagahama, S. Yuasa, and E. Tamura, "Quantum size effect in the TMR devices with a single crystal electrode", NEDO workshop on Nano-MagnetoElectronics, Kameyama, 2002/03/11 [Invited].
 - [17] Y. Suzuki, S. Yuasa, T. Nagahama, K. Ando, "Quantum size effects in the tunneling magneto-resistance devices with a single crystal ultrathin electrode", The 8th International Conference on Electronic Materials, Xi'an, 2002/06/12 [Invited].
 - [18] T. Nagahama, S. Yuasa, Y. Suzuki, K. Ando, "Magnetic Tunnel Junctions with Single-Crystal Electrodes", 第 26 回日本応用磁気学会学術講演会 日韓シンポジウム, 東京都小金井市、2002/09/18 [Invited].
 - [19] S. Yuasa, T. Nagahama, Y. Suzuki, "A Large Oscillation of Tunnel Magnetoresistance due to Spin-Polarized Resonant Tunneling", 47th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Tampa, (U.S.), 2002/11/12 [Invited].
 - [20] Y. Suzuki, S. Yuasa, T. Nagahama, Y. Yokoyama, H. Manaka, T. Shidara, T. Koide, T. Katayama, "X-ray absorption and X-MCD studies on the single-crystal Fe(100)monatomic layer at the interface with amorphous Al₂O₃", 47 th Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Tampa, 2002/11/13.
 - [21] S. Yuasa, T. Nagahama, Y. Suzuki, "Quantum-size effect in spin-dependent tunneling", Gordon Research Conference -Magnetic Nanostructure-, Ciocco (Italy), 2002/05/15.
 - [22] Nagahama, S. Yuasa, Y. Suzuki, E. Tamura, "Magnetic Tunnel Junctions with Single-Crystal Electrodes", The Science and Technology of Spin Transport in Nanostructure, Trieste(Italy), 2002/08/21.
 - [23] T. Kawagoe, Y. Suzuki, M. Bode, K. Koike, "Evidence of a topological antiferromagnetic order on ultrathin Cr(001)film surface studied by spin-polarized scanning tunneling spectroscopy", 47th Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Tampa, 2002/11/13.
 - [24] Y. Otani, K. Shigeto, and J. Shibata, "Vortex spin dynamics in magnetic nano-patterns", International workshop on Nanopatterned Magnetic Systems: Magnetic Structures and Dynamical Behaviors, Les Vaux de Cernay, Yvelines, France, Oct. 2002 [Invited].
 - [25] Y. Otani and J. Shibata, "Dynamics of magnetostatically coupled vortices in magnetic circular nanodisks", RIKEN-Taiwan Workshop on Nano-Science & Nano-Technology, Wako, Oct. 2002 [Invited].
 - [26] V. Novosad, V. Metlushko, K.Y. Guslienko, J. Pearson, H. Shima, Y. Otani, K. Fukamachi, and S.D. Bader, "Long-range magnetostatic interaction in truncated chains of ferromagnetic dots", 47th Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials, Tampa, Nov. 2002.
 - [27] G. Kakazei, P. Wigen, K. Guslienko, R. Chantrell, N. Lesnik, V. Metlushko, H.

- Shima, K. Fukamachi, Y. Otani, and V. Novosad, "In-plane and Out-of-plane uniaxial anisotropies in rectangular arrays of circular dots studied by FMR", 47th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Tampa, Nov. 2002.
- [28] V. Novosad, M. Grimsditch, Y. Otani, and S.D. Bader, "Spin excitations in magnetic vortices probed by Brillouin Light scattering", 47th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Tampa, Nov. 2002.
- [29] J. Yu, H. Lee, M. Hayashi, H. Kubota, Y. Ando, T. Miyazaki, "Magnetic Tunnel Junctions with High Magnetoresistance and Small Voltage Dependence Using Epitaxial NiFe(111) Ferromagnetic Bottom Electrode", 47th Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials, Tampa, Florida, USA, November 11-15, 2002.
- [30] Y. Ando, M. Hayashi, S. Iura, K. Yaoita, H. Kubota, T. Miyazaki, Growth Mechanism of Thin Insulating Layer in Ferromagnetic Tunnel Junctions Prepared by Various Oxidation Methods, 17th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces, Kyoto, Japan, 3/4-8/2002.
- [31] Y. Ando, H. Kubota, T. Miyazaki, "Interface Characterization of Magnetic Tunnel Junctions", KIST seminar, Seoul, Korea, October 29, 2002 [Invited].
- [32] Y. Ando, M. Hayashi, H. Kubota, T. Miyazaki, "Interface Characterization of Tunnel Junctions Prepared Using Different Oxidation Methods", 47th Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials, Tampa, Florida, USA, November 11-15, 2002.
- [33] H. Kubota, M. Hamada, Y. Ando, T. Miyazaki, "Fabrication of Hard Masks for MRAM Elements Using FIB Assisted Carbon Deposition", 47th Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials, Tampa, Florida, USA, November 11-15, 2002.
- [34] J. Yu, H. Lee, M. Hayashi, H. Kubota, Y. Ando, T. Miyazaki, "Magnetic Tunnel Junctions with High Magnetoresistance and Small Voltage Dependence Using Epitaxial NiFe(111) Ferromagnetic Bottom Electrode", 47th Annual Conference on Magnetism & Magnetic Materials, Tampa, Florida, USA, November 11-15, 2002.
- [35] T. Miyazaki, Y. Ando and H. Kubota, "Recent Development of MRAM Technology, International Symposium on Magnetic Materials and Applications", YongPyung, Korea, December 11, 2002 [Invited].
- [36] Y. Ando, M. Hayashi, S. Iura, K. Yaoita, H. Kubota, T. Miyazaki, Growth Mechanism of Thin Insulating Layer in Ferromagnetic Tunnel Junctions Prepared by Various Oxidation Methods, 17th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces, Kyoto, Japan, 3/4-8/2002.
- [37] H. Itoh, J. Inoue, A. Umerski, J. Mathon, "Theory of quantum oscillation of tunneling magnetoresistance in junction with a nonmagnetic spacer", EU RTN "Computational Magnetoelectronics", NEDO "NANOmagnetoElectronics" network, ESF Working Group "Magneto-Electronics" joint workshop on Spin Mesoscopics, Enschede (オランダ) , 2003/03/15 [Invited].
- [38] S. Yuasa, "Spin-Polarized Resonant Tunneling in Magnetic Tunnel Junctions ", 1st RIKEN Nanoscience Symposium, Tokyo, 27, May, 2003 [Invited].
- [39] T. Nagahama, S. Yuasa, E. Tamura, Y. Suzuki, "Quantum Size Effect in Magnetic Tunnel Junctions with Single-Crystal Ultrathin Electrodes", The 2003 International Conference on MEMS, NANO, and Smart Systems, Canada 2003.7 [Invited].
- [40] T. Nagahama, S. Yuasa, Y. Suzuki, "AN OSCILLATION OF TMR EFFECT IN MAGNETIC TUNNEL JUNCTIONS WITH A SINGLE-CRYSTAL Cr (001) ELECTRODE", International conference on magnetism, Rome(Italy), 2003.8
- [41] V. Novosad, K.Y. Guslienko, M. Grimsditch, V. Metlushko, J. Pearson, Y. Otani, and S.D. Bader, "Magnetization reversal in interacting laterally patterned magnetics structures", International Conference on Magnetism, Rome(ICM2003), July-Aug 2003.
- [42] G. N. Kakazei, P.E. Wigen, K.Y. Guslienko, R.W. Chantrell, N.A. Lesnik, Y. Otani,

- and V. Novosad, "Spin-wave resonance in normally magnetized circular submicron dots", International Conference on Magnetism, Rome(ICM2003), July-Aug. 2003.
- [43] T. Kimura, Y. Otani, I. Yagi, K. Tsukagoshi, and Y. Aoyagi, "Injection into ferromagnetic nano-wires", International Conference on Magnetism, Rome(ICM2003), July-Aug. 2003.
- [44] T. Kimura, Y. Otani, K. Tsukagoshi, and Y. Aoyagi, "Spin Hall Effect in Sub-Micron Sized Ferro- / Non-Magnetic Multi-Terminal Junctions", Spintech II, International Conference and School, Semiconductor Spintronics and Quantum Information Technology (SPINTECHII), Brugge, Aug. 2003.
- [45] J. Hamrle and Y. Otani, "Phenomenological formalism of the spin-polarized current in an electrical network", International Workshop on Nano-Scale Magneto-electronics, Nagoya, Nov. 2003.
- [46] Y. Otani and T. Kimura, "Spin hall effect measured in the non-local configuration", International Workshop on Nano-Scale Magneto-electronics, Nagoya, Nov. 2003 [Invited].
- [47] T. Kimura, and Y. Otani, "Spin-current-assisted domain wall depinning in a submicron magnetic wire", International Workshop on Nano-Scale Magneto-electronics, Nagoya, Nov. 2003.
- [48] T. Miyazaki, "Development of Spin-electronics Technology and Application for Magnetic Random Access Memory", JSPS-Univ. Oxford Joint Seminer, UK, March 24-25, 2003 [Invited].
- [49] H. Kubota, Y. Ando, T. Miyazaki, Fabrication and evaluation of sub-micron magnetic tunnel junctions for magnetic random access memory, 9th Symposium on Lower Temperature Physics, Wuhan, China, October 29, 2003 [Invited].
- [50] S. Mizukami, H. Nakamura, Y. Ando, T. Miyazaki, Study of spin pumping using Ferromagnetic resonance and Time-resolved Kerr effect, International workshop on Nano-scale Magneto-electronics, Nagoya, Japan, November 25-27, 2003 [Invited].
- [51] Y. Ando, J.H. Yu, S.J. Ahn, T. Kato, M. Oogane, H. Kubota, T. Miyazaki, Magnetic tunnel junctions with epitaxially-grown bottom electrodes, International workshop on Nano-scale Magneto-electronics, Nagoya, Japan, November 25-27, 2003 [Invited].
- [52] H. Kubota, J. Nakata, T. Endo, Y. Ando, A. Sakuma, T. Miyazaki, Magnetoresistance of bulk, film and tunnel junction using Co₂MnAl Heusler alloy, International workshop on Nano-scale Magneto-electronics, Nagoya, Japan, November 25-27, 2003.
- [53] J.H. Yu, T. Kato, M. Oogane, T. Daibou, H. Kubota, Y. Ando, T. Miyazaki, H.M. Lee, Influence of the structure of ferromagnetic bottom electrode on electron transport in magnetic tunnel junctions, International Symposium on Magnetic Materials and Applications and Winter Conference of the Korean Magnetic Society, Daejeon, Korea, December 3-6, 2003.
- [54] Y.M. Lee, H. Kubota, Y. Ando, T. Miyazaki, Thermal stability and underlayer effect on synthetic ferrimagnet free layer of magnetic tunnel junctions, International Symposium on Magnetic Materials and Applications and Winter Conference of the Korean Magnetic Society, Daejeon, Korea, December 3-6, 2003.
- [55] Y. Ando, S. Mizukami, H. Nakamura, H. Kubota, T. Miyazaki, Effect of Spin pumping on Gilbert Damping for Thin Permalloy Films Detected by using Time-Resolved Kerr Effect, International Symposium on Magnetic Materials and Applications and Winter Conference of the Korean Magnetic Society, Daejeon, Korea, December 3-6, 2003 [Invited].
- [56] H. Kubota, J. Nakata, T. Endo, Y. Ando, A. Sakuma, T. Miyazaki, Magnetotransport of Co₂MnAl Heusler alloy, International Symposium on Magnetic Materials and Applications and Winter Conference of the Korean Magnetic Society, Daejeon, Korea, December 3-6, 2003 [Invited].
- [57] Taro Nagahama, Shinji Yuasa and Yoshishige Suzuki, "Spin polarized resonant

- tunneling for various magnetic electrode", 5th International Symposium on Metallic Multilayers (MML '04), 7 - 11 June, 2004, National Institute of Standards and Technology Boulder, Colorado, USA [Invited].
- [58] T. Nagahama, Y. Kurosaki, Y. Suzuki, S. Yuasa, "TMR effect of magnetic tunnel junctions with ultrathin Fe(001) electrodes", 49th conference on magnetism and magnetic materials, USA, Jacksonville, 2004/11/11
- [59] H. Itoh, J. Inoue, A. Umerski, and J. Mathon, "Enhancement of tunnel magnetoresistance in junction with a thin ferromagnetic spacer", International workshop on Nano-scale Magnetoelectronics, Nagoya, 2004/11/27 [Invited].
- [60] H. Itoh, G. Tatara, H. Kohno, and J. Inoue, "Charge and spin currents in ferromagnet/ normal metal/ ferromagnet junctions with noncollinear magnetization", International workshop on Nano-scale Magnetoelectronics, Nagoya, 2004/11/26.
- [61] G. Kakazei, P. Wigen, K. Guslienko, A. Slavin, V. Golub, N. Lesnik, Y. Otani, and V. Novosad, "Spin-wave spectra in arrays of normally magnetized circular submicron dots", 9th Joint MMM-Intermag Conference, Anaheim, USA, Jan. 2004.
- [62] Y. Otani, "Detection of spin current using non-local configuration", SESSE-4: 4th Symposium on the Electron Spin Science and Engineering, Muju, Korea, Feb. 2004 [Invited].
- [63] J. Hamrle, T. Kimura, and Y. Otani, "Vectorial Magnetization Measurements by Kerr Effect", Magneto-optical recording international symposium (MORIS2004), Yokohama, May 2004 [Invited].
- [64] M. Hara, A. Endo, S. Katsumoto, and Y. Iye, "Transport in a two-dimensional electron gas narrow channel with a magnetic field gradient", 27th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-27), Flagstaff, USA, July 2004.
- [65] M. Hara, A. Endo, S. Katsumoto, and Y. Iye, "Suppression of backscattering in quantum hall narrow channel under transversally modulated magnetic field", 16th International Conference on High Magnetic Fields in Semiconductor Physics (SemiMag-16), Tallahassee, USA, August 2004.
- [66] H. Kubota, J. Nakata, M. Oogane, Y. Ando, T. Miyazaki, Fabrication of magnetic tunnel junctions using Co₂MnAl Heusler alloy, 9th Joint MMM/INTERMAG Conference, Anaheim, California, USA, January 5-9, 2004.
- [67] T. Miyazaki, "Recent development of MRAM and related phenomena", Condensed Matter Physics Zhong Guan Cun Forum, Beijing, April 29, 2004 [Invited].
- [68] T. Miyazaki, "Spin-electronics and Related Materials", The third Advanced Science Institute Seminar, Zao, July 28, 2004 [Invited].
- [69] Y. Ando, S. Yakata, S. Mizukami, T. Miyazaki, "Temperature dependence of Gilbert damping and spin diffusion length", 49th annual conference on magnetism and magnetic materials, Jacksonville, November 9, 2004.
- [70] T. Daibou, M. Oogane, Y. Ando, T. Miyazaki, "Spin-Injection into the Superconductor in Ferromagnet / Superconductor / Ferromagnet Double Tunneling junctions", 49th annual conference on magnetism and magnetic materials, Jacksonville, November 9, 2004.
- [71] T. Niizeki, H. Kubota, Y. Ando, T. Miyazaki, "Fabrication and Characterization of Ferromagnetic Single-Electron Tunneling Devices by Utilizing Metallic Nano-Wire as Hard Mask Stencil", 49th annual conference on magnetism and magnetic materials, Jacksonville, November 9, 2004.
- [72] Y. Ando, H. Nakamura, J.H. Yu, S. Mizukami*, T. Miyazaki, "Effect of spin pumping on Gilbert damping for thin permalloy films detected by using time-resolved Kerr effect", 49th annual conference on magnetism and magnetic materials, Jacksonville, November 10, 2004.
- [73] H. Itoh, J. Inoue, "Full tight-binding calculation of TMR for Fe/MgO/Fe junction with randomness", INTERMAG Asia 2005, Nagoya, Japan, 6 April, 2005.

- [74] H. Itoh, J. Inoue, "Numerical Simulation of Tunnel Magnetoresistance for Fe/MgO/Fe Junctions with Disorder", SANKEN International Symposium on Scientific and Industrial Nanotechnology 2004, Osaka, Japan, 6 December, 2004.
- [75] H. Itoh, J. Inoue, A. Umerski, J. Mathon, "Quantum oscillation of tunneling magnetoresistance in junctions with a nonmagnetic interlayer", APS March Meeting, Montreal, Canada, 23 March, 2004.
- [76] Y. Suzuki, A. Tulapurkar, A. Fukushima, H. Kubota, S. Yuasa, H. Maehara, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe, K. Yagami, T. Devolder, P. Crozat, C. Chappert, "Spin-injection induced ultrahigh speed magnetization reversal and ferromagnetic resonance (FMR)", International Meeting on Magnetism and Magnetic Materials, San Jose, Nov., 2005 [Invited].
- [77] J. Hamrle, "How can we switch magnetization without magnetic field", International nanotechnology Exhibition & Conference (nanotech 2005), Tokyo, February 2005.
- [78] J. Hamrle, T. Yang, and M. Hara, "Spin polarized current inside magnetic nanostructure", Nanotech 2005 International nanotechnology Exhibition & Conference(nanotech 2005), Tokyo, February 2005.
- [79] J. Shibata, G. Tatara, H. Kohno, and Y. Otani, "Fate of uniform ferromagnetism under spin current: Domain nucleation", 2005 APS March Meeting, Los Angeles, USA, March 2005.
- [80] Y. Otani, T. Kimura, and J. Hamrle, "Determination of magnetic vortex chirality using lateral spin valve geometry", Intermag2005, Nagoya, April 2005.
- [81] T. Kimura, T. Yang, J. Hamrle, and Y. Otani, "Magnetization switching due to non-local spin injection into small ferromagnetic particle, Intermag2005, Nagoya, April 2005.
- [82] T. Yang, J. Hamrle, T. Kimura, and Y. Otani, "Enhancement of spin current by modifying the chemical potential profile in the nanopillar", Intermag2005, Nagoya, April 2005.
- [83] Y. Otani, "Manipulating magnetic state of nano-scale ferromagnetic particle by means of non local spin injection technique", Toyota Work Shop on "High Magnetic Anisotropy L10 Ordered Alloy FePt and Related", Toyota Technological Institute, Nagoya, April 2005 [Invited].
- [84] Y. Otani and T. Kimura, "Magnetization reversal of ferromagnetic nano-dot by non local spin injection", The 8th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (ISQM-Tokyo'05), Hatoyama-cho, August 2005 [Invited].
- [85] Y. Otani and T. Kimura, "Manipulation of the magnetic state of a small ferromagnetic particle by means of non-local spin-injection techniques", The 50th Magnetism and Magnetic Materials Conference, San Jose, USA, October. 2005 [Invited].
- [86] J. Shibata, "Current-induced domain wall nucleation in ferromagnet", International Workshop on Spins and Quantum Transport, Tohoku University, Oct. 2005 [Invited].
- [87] T. Miyakoshi, Y. Ando, M. Oogane, T. Miyazaki, H. Kubota, A. Fukushima, T. Nagahama, S. Yuasa, "Inelastic electron tunneling spectroscopy in magnetic tunnel junctions with MgO(001) barrier", International Magnetism Conference 2005, Nagoya, April 6, 2005.
- [88] S.J. Zhao, Z.M. Zeng, X.F. Han, Y. Ando, T. Miyazaki, "Tunneling current-induced butterfly-shaped domains and magnetization switching in double-barrier magnetic tunnel junctions", International Magnetism Conference 2005, Nagoya, April 7, 2005.
- [89] Y. Sakuraba, J. Nakata, M. Oogane, H. Kubota, Y. Ando, H. Kato, A. Sakuma, T. Miyazaki, "Fabrication of Heusler-type Co₂MnAl epitaxial films by using sputtering method", International Magnetism Conference 2005, Nagoya, April 7, 2005.

- [90] R. Yilgin, M. Oogane, S. Yakata, Y. Ando, T. Miyazaki, "Damping constant in Co₂MnAl Heusler alloy films", International Magnetism Conference 2005, Nagoya, April 8, 2005.
- [91] Y.M. Lee, H. Kubota, Y. Ando, T. Miyazaki, "Low switching effect of sub-micron sized MTJs with synthetic ferrimagnet free layer based on NiFe/Ru/NiFe multilayers", International Magnetism Conference 2005, Nagoya, April 8, 2005.
- [92] Y. Ando, T. Miyakoshi, M. Oogane, T. Miyazaki, S. Yuasa, "Spin-dependent spectroscopy of MTJs with MgO barrier", 1st NEDO International joint research meeting, Homburg, Germany, July 29, 2005.
- [93] T. Miyazaki, T. Wakitani, R. Yilgin, S. Yakata, Y. Sakuraba, M. Oogane, Y. Ando, "Gilbert damping factors in Fe-Co-Ni and Co₂MnAl Alloy films" 1st NEDO International joint research meeting, Homburg, Germany, July 29, 2005.
- [94] H. Kubota, Y. Sakuraba, M. Oogane, Y. Ando, T. Miyazaki, "Spin polarization in magnetic tunnel junctions with full-Heusler alloy electrode" 1st NEDO International joint research meeting, Homburg, Germany, July 29, 2005 [Invited].
- [95] T. Miyazaki, T. Wakitani, R. Yilgin, S. Yakata, Y. Sakuraba, M. Oogane, Y. Ando, "Gilbert damping factors in Fe-Co-Ni and Co₂MnAl Alloy films" ICCE-12, Tenerife, Spain, August 2, 2005 [Invited].
- [96] H. Kubota, A. Fukushima, Y. Otani, S. Yuasa, K. Ando, H. Maehara, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe, Y. Suzuki, "Spin-transfer switching in MgO-based magnetic tunnel junctions", 1st RIEC workshop on Spintronics, 8-9, Feb. 2006, Sendai [Invited].
- [97] Y. Suzuki, A. Tulapurkar, A. Fukushima, H. Kubota, S. Yuasa, H. Maehara, K. Tsunekawa, D. D. Djayaprawira, N. Watanabe, "The diode effect in spin-transfer devices", 1st RIEC workshop on Spintronics, 8-9, Feb. 2006, Sendai [Invited].

国内会議

- [1] 鈴木義茂・湯浅新治、「単結晶強磁性トンネル接合とそのスピントロニクスへの展開」、第48回応用物理学関係連合講演会シンポジウム、明治大学駿河台キャンパス、平成13年3月29日
- [2] 湯浅新治、長浜太郎、鈴木義茂、安藤功児、「スピン偏極量子井戸準位へのトンネル電子の注入」、日本物理学会講演会2001年秋季大会、徳島市、2001/09/17
- [3] 長浜太郎、湯浅新治、鈴木義茂、田村英一、「極薄Fe(100)電極を持つ強磁性トンネル接合の量子井戸効果」、日本物理学会講演会2001年秋季大会、徳島市、2001/09/18
- [4] 湯浅新治、長浜太郎、鈴木義茂、安藤功児、「強磁性トンネル接合のTMR効果と量子サイズ効果」、日本応用磁気学会学術講演会シンポジウム、秋田大学、2001/09/26
- [5] 長浜太郎、湯浅新治、鈴木義茂、田村英一、「Fe(100)強磁性トンネル接合の量子井戸効果」、日本応用磁気学会学術講演会、秋田大学、2001/09/27
- [6] 川越毅、田村英一、鈴木義茂、小池和幸、「Fe(001)面のスピン偏極電子のステップでの散乱」、日本応用磁気学会学術講演会、秋田大学、2001/09/26
- [7] 川越毅、鈴木義茂、「Fe(001)薄膜の微分コンダクタンス像-スピンに依存するステップでの散乱現象」、応用物理学秋季講演会シンポジウム、愛知工業大学、2001/09/11
- [8] 湯浅新治・長浜太郎・安藤功児・鈴木義茂、「強磁性トンネル接合の量子サイズ効果とMRAMへの展望」、学振委員会、網走、2001/10/6
- [9] 鈴木義茂、「強磁性トンネル接合-スピントロニクスへの展望」、日本応用物理学会応電分科会スピントロニクス企画、機械振興会館、2001/10/17
- [10] 長浜太郎、湯浅新治、鈴木義茂、安藤功児、「TMRの量子サイズ効果とその応用(共鳴トンネルトランジスタに向けて)」、日本応用磁気学会第121回研究会、第10回磁性人工構造膜の物性と機能専門研究会「スピントロニクスの現状と将来展望」、機会振興会館、2001/10/23

- [11] 湯浅新治、長浜太郎、安藤功兒、鈴木義茂, 「スピン偏極量子井戸準位へのトンネル電子の注入 - TMR 効果の量子井戸振動-」, 日本応用磁気学会第 74 回マイクロ磁区専門研究会、東芝研修センター、2001/10/26
- [12] 安藤康夫, 林将光, 久保田均, 宮崎照宣, 強磁性トンネル接合の絶縁障壁とスピン依存伝導, 第 25 回日本応用磁気学会学術講演会シンポジウム, 秋田大学手形キャンパス, 平成 13 年 9 月 26 日.
- [13] 大兼幹彦, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, トンネル分光法を用いたスピン分極率測定, 第 25 回日本応用磁気学会学術講演会, 秋田大学手形キャンパス, 平成 13 年 9 月 27 日.
- [14] 林将光, 安藤康夫, 大兼幹彦, 久保田均, 宮崎照宣, 強磁性トンネル接合における絶縁層の酸化過程, 第 25 回日本応用磁気学会学術講演会, 秋田大学手形キャンパス, 平成 13 年 9 月 27 日.
- [15] 矢尾板和也, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, TMR 素子における極薄 Al プラズマ酸化膜の特性, 第 25 回日本応用磁気学会学術講演会, 秋田大学手形キャンパス, 平成 13 年 9 月 27 日.
- [16] 井浦聡則, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, 様々な酸化方法で作製した強磁性トンネル接合, 第 25 回日本応用磁気学会学術講演会, 秋田大学手形キャンパス, 平成 13 年 9 月 27 日.
- [17] 大坊忠臣, 大兼幹彦, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, 中間層を超伝導体とする二重トンネル接合の磁気抵抗効果, 第 25 回日本応用磁気学会学術講演会, 秋田大学手形キャンパス, 平成 13 年 9 月 27 日.
- [18] Andrew C. C. Yu, Chester Lo, Amanda Petford-Long, David Jiles, T. Miyazaki, Direct observation of magnetization reversal process in NiFe/Al-O/Co trilayer films using Lorents transmission electron microscopy and magnetic force microscopy, 第 25 回日本応用磁気学会学術講演会, 秋田大学手形キャンパス, 平成 13 年 9 月 27 日
- [19] H. Kubota, Y. Ando, T. Miyazaki, Magnetoresistance measurement for ultra small TMR junctions using conductive AFM, 第 25 回日本応用磁気学会学術講演会, 秋田大学手形キャンパス, 平成 13 年 9 月 27 日.
- [20] 林将光, 安藤康夫, 大兼幹彦, 久保田均, 宮崎照宣, 強磁性トンネル接合の絶縁層の初期酸化過程, 応用物理学会東北支部第 56 回学術講演会, 米沢伝国の杜, 平成 13 年 12 月 6 日.
- [21] 劉智亨, 林将光, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, スパッタ法による Si 基板上的 TMR 素子用バフファ膜の高配向成長, 応用物理学会東北支部第 56 回学術講演会, 米沢伝国の杜, 平成 13 年 12 月 7 日.
- [22] 大兼幹彦, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, Al/Al-oxide/CoFe 接合の伝導特性に対する Al 膜質の影響, 応用物理学会東北支部第 56 回学術講演会, 米沢伝国の杜, 平成 13 年 12 月 7 日.
- [23] 矢尾板和也, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, TMR 素子における極薄 Al プラズマ酸化膜の特性, 応用物理学会東北支部第 56 回学術講演会, 米沢伝国の杜, 平成 13 年 12 月 7 日.
- [24] 井浦聡則, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, 様々な酸化法で作製した強磁性トンネル接合, 応用物理学会東北支部第 56 回学術講演会, 米沢伝国の杜, 平成 13 年 12 月 7 日.
- [25] 望月直樹, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, 強磁性トンネル接合における広帯域ノイズスペクトル測定, 応用物理学会東北支部第 56 回学術講演会, 米沢伝国の杜, 平成 13 年 12 月 7 日.
- [26] 中村洋明, 安藤康夫, 久保田均, 宮崎照宣, TMR 素子における高速磁化反転の測定, 応用物理学会東北支部第 56 回学術講演会, 米沢伝国の杜, 平成 13 年 12 月 7 日.
- [27] 上田幸生, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, Ni₃₀Fe₂₀ 薄膜の反応性イオンエッチング,

- 応用物理学会東北支部第 56 回学術講演会, 米沢伝国の杜, 平成 13 年 12 月 7 日.
- [28] 新関智彦, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, 電子線リソグラフィを用いた強磁性単電子トランジスタの作製, 応用物理学会東北支部第 56 回学術講演会, 米沢伝国の杜, 平成 13 年 12 月 7 日.
- [29] 大坊忠臣, 大兼幹彦, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, 強磁性体//超伝導体//強磁性体二重トンネル接合の伝導特性, 応用物理学会東北支部第 56 回学術講演会, 米沢伝国の杜, 平成 13 年 12 月 7 日.
- [30] Y. Suzuki, T. Katayama, S. Yuasa, T. Nagahama, and K. Ando, “Spin-polarized quantum well states in the metallic multilayered systems and its manifestation in the Magneto-optical effect and TMR effect”, H13 東北大通研共同プロジェクト研究会, 仙台, 2002/03/13
- [31] 長浜太郎, 湯浅新治, 鈴木義茂, 田村英一, 「Cr 超薄膜電極を持つ強磁性トンネル接合の TMR の振動」, 日本物理学会講演会 2002 年春季大会、立命館大学(滋賀県草津)、2002/03/25
- [32] 鈴木義茂, 田村英一, 長浜太郎, 湯浅新治, 「トンネル磁気抵抗素子における量子サイズ効果の理論」, 日本物理学会講演会 2002 年春季大会、立命館大学(滋賀県草津)、2002/03/25
- [33] 川越毅, 鈴木義茂, 田村英一、小池和幸, 「Cr(001) 薄膜のスピン偏極 STM/STS 観察」, 日本物理学会講演会 2002 年春季大会、立命館大学(滋賀県草津)、2002/03/27
- [34] 鈴木義茂, 田村英一, 湯浅新治, 長浜太郎, 「トンネル磁気抵抗素子における量子サイズ効果の理論 I」, 日本応用物理学会 2002 春季学術講演会、東海大湘南校舎(平塚)、2002/03/30
- [35] 湯浅新治・長浜太郎・鈴木義茂・安藤功児, 強磁性トンネル接合の磁気抵抗と共鳴トンネル」, 日本応用物理学会 2002 春季学術講演会、東海大湘南校舎(平塚)、2002/03/30
- [36] 鈴木義茂、長浜太郎、湯浅新治、田村英一, 「強磁性金属トンネル素子における量子サイズ効果と界面効果」, 日本物理学会第 58 回年次大会, 東北大学、2003/03/29.
- [37] 伊藤博介, 井上順一郎, A. Umerski, J. Mathon, “界面非磁性層による TMR の振動の理論 II” , 日本物理学会第 2002 年秋季大会, 中部大学, 2002/09/08.
- [38] 伊藤博介, 井上順一郎, A. Umerski, J. Mathon, “界面非磁性層による TMR の量子振動の理論” , 第 26 回日本応用磁気学会学術講演会, 東京農工大学, 2002/09/17.
- [39] 柴田 絢也, 重藤 訓志, 大谷 義近, 「静磁結合したナノ磁気円盤中における渦のダイナミクス」, 日本物理学会 2002 年秋季大会, 中部大学, 2002 年 9 月.
- [40] 重藤 訓志, 柴田 絢也, 「静磁的に結合したナノ磁気渦構造のダイナミクス」, 第 26 回日本応用磁気学会学術講演会, 東京農工大学小金井キャンパス, 2002 年 9 月.
- [41] 安藤康夫, 林将光, 中村洋明, 久保田均, 宮崎照宣, MRAM に関わる TMR 素子の絶縁特性とスピン反転, 第 49 回応用物理学関係連合講演会シンポジウム, 東海大学湘南校舎, 平成 14 年 3 月 29 日.
- [42] 劉智亨, 林将光, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, スパッタ法による Si 基板上の TMR 素子用バフアー膜の高配向成長, 第 49 回応用物理学関係連合講演会, 東海大学湘南校舎, 平成 14 年 3 月 30 日.
- [43] 安藤康夫, 林将光, 中村洋明, 久保田均, 宮崎照宣, MRAM に関わる TMR 素子の絶縁特性とスピン反転, 第 49 回応用物理学関係連合講演会シンポジウム, 東海大学湘南校舎, 平成 14 年 3 月 29 日.
- [44] 劉智亨, 林将光, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, スパッタ法による Si 基板上の TMR 素子用バフアー膜の高配向成長, 第 49 回応用物理学関係連合講演会, 東海大学湘南校舎, 平成 14 年 3 月 30 日.
- [45] 安藤康夫, 林将光, 久保田均, 宮崎照宣, TMR 素子における絶縁層/強磁性層界面の評価と伝導特性, 第 26 回応用磁気学会学術講演会, 東京農工大学小金井キャンパス, 平成 14 年 9 月 17 日.

- [46] 大兼幹彦, 大坊忠臣, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, Al/Al-oxide/強磁性体接合のトンネルコンダクタンス特性, 第26回応用磁気学会学術講演会, 東京農工大学小金井キャンパス, 平成14年9月17日.
- [47] J. H. Yu, H. M. Lee, M. Hayashi, M. Oogane, H. Kubota, Y. Ando, T. Miyazaki, “Magnetic Tunnel Junctions using an Epitaxial Ni₈₀Fe₂₀ Thin Film Grown on a Single Crystal Si Substrate”, 第26回応用磁気学会学術講演会, 東京農工大学小金井キャンパス, 平成14年9月17日.
- [48] 新関智彦, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, 電子線リソグラフィを用いたナノメーターサイズ TMR 素子の作製, 第26回応用磁気学会学術講演会, 東京農工大学小金井キャンパス, 平成14年9月17日.
- [49] 井浦聡則, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, 高耐熱・高耐電圧強磁性トンネル接合の作製, 第26回応用磁気学会学術講演会, 東京農工大学小金井キャンパス, 平成14年9月17日.
- [50] 中村洋明, 安藤康夫, 久保田均, 宮崎照宣, TMR 素子の動的磁化反転過程の測定, 第26回応用磁気学会学術講演会, 東京農工大学小金井キャンパス, 平成14年9月17日.
- [51] 久保田均, 濱田致知, 安藤康夫, 宮崎照宣, FIB カーボンマスクデポジションを用いた微小強磁性トンネル接合の作製, 第63回応用物理学学術講演会, 新潟大学五十嵐キャンパス, 平成14年9月25日.
- [52] 安藤康夫, 林将光, 久保田均, 宮崎照宣, 強磁性トンネル接合における絶縁層/強磁性層界面と伝導特性, 第63回応用物理学学術講演会, 新潟大学五十嵐キャンパス, 平成14年9月26日.
- [53] 久保田均, 濱田致知, 安藤康夫, 宮崎照宣, 100nm スケールの微小強磁性トンネル接合の作製と評価, 日本応用磁気学会第126回研究会, 機械振興会館, 平成14年11月22日.
- [54] 安藤康夫, 林将光, 久保田均, 宮崎照宣, 強磁性トンネル接合における絶縁層/強磁性層界面と伝導特性, 金属材料研究所ワークショップ, 東北大学金属材料研究所, 平成14年11月25日.
- [55] 濱田致知, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, 集束イオンビームを用いた微小トンネル素子の作製, 第57回応用物理学会東北支部学術講演会, 東北大学, 平成14年12月6日.
- [56] 新関智彦, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, 電子線リソグラフィを用いたナノメーターサイズ TMR 素子の作製, 第57回応用物理学会東北支部学術講演会, 東北大学, 平成14年12月6日.
- [57] 中村洋明, 安藤康夫, 久保田均, 宮崎照宣, TMR 素子の磁化反転測定, 第57回応用物理学会東北支部学術講演会, 東北大学, 平成14年12月6日.
- [58] 安成真, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, スパッタ法により Al₂O₃(0001) 基板上に作製したエピタキシャルトンネル接合, 第57回応用物理学会東北支部学術講演会, 東北大学, 平成14年12月6日.
- [59] 花田成, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, 埋め込みコプレーナーガイドを用いた磁化反転の測定, 第57回応用物理学会東北支部学術講演会, 東北大学, 平成14年12月6日.
- [60] 上田幸生, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, CO-NH₃を用いた磁性薄膜のイオンエッチングとMRAMへの応用, 第57回応用物理学会東北支部学術講演会, 東北大学, 平成14年12月6日.
- [61] 山田昌弘, 安藤康夫, 久保田均, 宮崎照宣, 弾道電子放出顕微鏡を用いた強磁性トンネル接合絶縁膜の評価, 第57回応用物理学会東北支部学術講演会, 東北大学, 平成14年12月6日.
- [62] 井浦聡則, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, 下部強磁性層表面を酸化して作製したトンネル接合の高耐熱特性, 第57回応用物理学会東北支部学術講演会, 東北大学, 平成14年12月6日.
- [63] 大兼幹彦, 大坊忠臣, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, Al/Al-oxide/強磁性体接合の

- コンダクタンス特性, 第 57 回応用物理学会東北支部学術講演会, 東北大学, 平成 14 年 12 月 6 日.
- [64] 望月尚樹, 安藤康夫, 久保田均, 宮崎照宣, 強磁性トンネル接合における $1/f$ ノイズ特性, 第 57 回応用物理学会東北支部学術講演会, 東北大学, 平成 14 年 12 月 6 日.
- [65] 李永珉, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, CoFe/Al-O/NiFe を用いた強磁性トンネル接合の磁気抵抗効果, 第 57 回応用物理学会東北支部学術講演会, 東北大学, 平成 14 年 12 月 6 日.
- [66] 伊藤博介, 井上順一郎, A. Umerski, J. Mathon, “界面非磁性層による TMR の量子振動の理論”, 日本物理学会第 58 回年次大会, 東北大学, 2003/03/29.
- [67] 木村 崇, 大谷 義近, 八木 巖, 塚越 一仁, 青柳 克信, 「電流流注入効果による磁性細線内磁壁のドラッキング」, 日本物理学会第 58 回年次大会, 東北大学, 2003 年 3 月.
- [68] 木村 崇, 大谷 義近, 塚越 一仁, 青柳 克信, 「強磁性/非磁性微細接合におけるノンローカルホール効果」, 日本物理学会第 58 回年次大会, 東北大学, 2003 年 3 月.
- [69] 奥野 拓也, 重藤 訓志, 大谷 義近, 増野 敦信, 寺嶋 孝仁, 小野 輝男, 壬生 攻, 新庄 輝也, 「磁性体ドットにおける吹き出し磁化反転の物質依存性」, 日本物理学会第 58 回年次大会, 東北大学, 2003 年 3 月.
- [70] 柴田 絢也, 重藤 訓志, 大谷 義近, 「二次元正方格子系におけるナノ磁気渦運動の分散関係」, 日本物理学会第 58 回年次大会, 東北大学, 2003 年 3 月.
- [71] 木村 崇, 大谷 義近, 塚越 一仁, 青柳 克信, 「強磁性/非磁性微細接合におけるスピンローカルホール効果」, 日本物理学会 2003 年秋季大会, 岡山大学, 2003 年 9 月.
- [72] 柴田 絢也, 重藤 訓志, 大谷 義近, 「二次元正方格子系におけるナノ磁気渦運動の局在」, 日本物理学会 2003 年秋季大会, 岡山大学, 2003 年 9 月.
- [73] 大谷 義近, 「静磁的に結合したナノスケール磁気渦格子のダイナミクス」, 第 27 回日本応用磁気学会学術講演会, 大阪大学, 2003 年 9 月.
- [74] 木村 崇, 大谷 義近, 塚越 一仁, 青柳 克信, 「スピン偏極電流による磁性細線内ピン止め磁壁の離脱」, 第 27 回日本応用磁気学会学術講演会, 大阪大学, 2003 年 9 月.
- [75] 柴田 絢也, 重藤 訓志, 大谷 義近, 「微小磁気円盤中におけるナノ磁気渦運動の局在」, 第 27 回日本応用磁気学会学術講演会, 大阪大学, 2003 年 9 月.
- [76] 大谷 義近, 「ナノスケール磁性体のスピンドダイナミクス」, 東京大学物性研談話会, 2003 年 11 月.
- [77] 久保田均, 濱田致知, 渡辺大輔, 安藤康夫, 宮崎照宣, 100nm サイズ MRAM セルの作製プロセス, 第 50 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川大学, 平成 15 年 3 月 27 日.
- [78] 安藤康夫, 井浦聡則, 久保田均, 宮崎照宣, C. S. Yoon, J. H. Lee, D. H. Im, C. K. Kim, 高耐熱強磁性トンネル接合の作製, 第 50 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川大学, 平成 15 年 3 月 27 日.
- [79] 大兼幹彦, 大坊忠臣, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, トンネル分光法を用いた強磁性体のスピン分極率測定, 第 50 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川大学, 平成 15 年 3 月 27 日.
- [80] 水上成美, 安藤康夫, 宮崎照宣, 強磁性体/非磁性体接合におけるスピンポンピング, 第 50 回応用物理学関係連合講演会シンポジウム, 神奈川大学, 平成 15 年 3 月 28 日.
- [81] 新関智彦, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, 電子線リソグラフィを用いたナノメーターサイズ TMR 素子の作製, 第 50 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川大学, 平成 15 年 3 月 30 日.
- [82] 上田幸生, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, CO-NH₃ プラズマを用いた磁性薄膜のイオンエッチングと MRAM への応用, 第 50 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川大学, 平成 15 年 3 月 30 日.
- [83] 宮崎照宣, 安藤康夫, 久保田均, 超ギガビット磁気メモリ基盤技術の開発, 電子情報通信学会集積回路研究会, 機会振興会館, 平成 15 年 4 月 10 日.

- [84] 安藤康夫, 中村洋明, 水上成美, 花田成, 久保田均, 宮崎照宣, スピンダイナミクスの電気的および光学的アプローチ, 第 27 回応用磁気学会学術講演会, 大阪大学吹田キャンパス, 平成 15 年 9 月 17 日.
- [85] 中田淳, 大兼幹彦, 久保田均, 安藤康夫, 加藤宏朗, 宮崎照宣, ホイスラー系合金 Co_2MnAl を用いた強磁性トンネル接合, 第 27 回応用磁気学会学術講演会, 大阪大学吹田キャンパス, 平成 15 年 9 月 18 日.
- [86] 久保田均, 上田幸生, 安藤康夫, 宮崎照宣, 第 27 回応用磁気学会学術講演会, CO-NH_3 ガスを用いた磁性薄膜のドライエッチング, 大阪大学吹田キャンパス, 平成 15 年 9 月 18 日.
- [87] 渡邊大輔, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, 集束イオンビームを用いた微小強磁性トンネル接合の作製, 第 27 回応用磁気学会学術講演会, 大阪大学吹田キャンパス, 平成 15 年 9 月 18 日.
- [88] 新関智彦, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, サイドエッジ薄膜堆積法を用いた微小二重強磁性トンネル接合の作製, 第 27 回応用磁気学会学術講演会, 大阪大学吹田キャンパス, 平成 15 年 9 月 18 日.
- [89] 花田成, 中村洋明, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, 高速磁化反転測定のための埋め込みコプレナーガイドの作製, 第 27 回応用磁気学会学術講演会, 大阪大学吹田キャンパス, 平成 15 年 9 月 18 日.
- [90] 中村洋明, 水上成美, 安藤康夫, 久保田均, 宮崎照宣, 多層膜中の強磁性薄膜における動的磁化過程, 第 27 回応用磁気学会学術講演会, 大阪大学吹田キャンパス, 平成 15 年 9 月 18 日.
- [91] 李永珉, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, MTJ に用いる Synthetic Ferrimagnet フリー層の熱安定性, 第 27 回応用磁気学会学術講演会, 大阪大学吹田キャンパス, 平成 15 年 9 月 18 日.
- [92] 安成真, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, $\text{Al}_2\text{O}_3(0001)$ 基板上のエピタキシャルトンネル接合のバイアス電圧依存性, 第 27 回応用磁気学会学術講演会, 大阪大学吹田キャンパス, 平成 15 年 9 月 19 日.
- [93] 加藤丈晴, 劉智亨, 安藤康夫, 久保田均, 宮崎照宣, 下部電極をエピタキシャル成長させた強磁性トンネル接合の局所伝導特性, 第 27 回応用磁気学会学術講演会, 大阪大学吹田キャンパス, 平成 15 年 9 月 19 日.
- [94] 大兼幹彦, 大坊忠臣, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, トンネルスピン分極率の強磁性層作製条件依存性, 第 27 回応用磁気学会学術講演会, 大阪大学吹田キャンパス, 平成 15 年 9 月 19 日.
- [95] 大坊忠臣, 大兼幹彦, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, 強磁性体//超伝導体//強磁性体二重接合の磁気抵抗効果, 第 27 回応用磁気学会学術講演会, 大阪大学吹田キャンパス, 平成 15 年 9 月 19 日.
- [96] 加藤丈晴, 安成真, 劉智亨, 安藤康夫, 久保田均, 宮崎照宣, 下部電極をエピタキシャル成長させた強磁性トンネル接合の局所伝導特性, 第 58 回応用物理学会東北支部学術講演会, 岩手大学工学部テクノホール, 平成 15 年 12 月 4 日.
- [97] 中田淳, 大兼幹彦, 久保田均, 安藤康夫, 加藤宏朗, 宮崎照宣, Co_2MnAl を用いた強磁性トンネル接合, 第 58 回応用物理学会東北支部学術講演会, 岩手大学工学部テクノホール, 平成 15 年 12 月 4 日.
- [98] 渡邊大輔, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, 集束イオンビームを用いた微小強磁性トンネル接合の作製, 第 58 回応用物理学会東北支部学術講演会, 岩手大学工学部テクノホール, 平成 15 年 12 月 4 日.
- [99] 家形諭, 安藤康夫, 水上成美, 宮崎照宣, 高品位 $\text{Cu/Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}$ 薄膜における FMR 線幅, 第 58 回応用物理学会東北支部学術講演会, 岩手大学工学部テクノホール, 平成 15 年 12 月 4 日.
- [100] 伊藤博介, 井上順一郎, “Fe/MgO/Fe トンネル接合の TMR に対する乱れの効果”, 第

- 28 回日本応用磁気学会学術講演会, 沖縄コンベンションセンター, 2004/09/22.
- [101]伊藤博介, 井上順一郎, “Fe/MgO/Fe 接合における TMR に対する乱れの効果”, 日本物理学会 2004 年秋季大会, 青森大学, 2004/09/13.
- [102]伊藤博介, 井上順一郎, A. Umerski, J. Mathon, “現実的電子構造を取り入れたトンネル磁気抵抗の計算”, 日本物理学会第 59 回年次大会, 九州大学, 2004/03/28.
- [103]水口将輝, 長浜 太郎, 鈴木 義茂, 湯浅 新治, Al₂O₃ を障壁層に用いたトンネル磁気抵抗薄膜における各層成長過程の STM 観察, 第 28 回日本応用磁気学会学術講演会, 沖縄県, 2004/09/21 .
- [104]黒崎義成, 長浜 太郎, 湯浅 新治, 鈴木 義茂, 超薄 Fe(001)電極層を持つ TMR 素子の磁気抵抗効果, 第 28 回日本応用磁気学会学術講演会, 沖縄県, 2004/09/21 .
- [105]小瀬木淳一, 大澤友克, 伊藤博介, 井上順一郎, “Mn 酸化物を用いたトンネル接合の TMR に対するスピン揺らぎの効果”, 第 28 回日本応用磁気学会学術講演会, 沖縄コンベンションセンター, 2004 年 9 月 22 日.
- [106]伊藤博介, 井上順一郎, “強磁性トンネル接合における TMR の理論”, 科学技術交流財団 第 5 回 「アドバンスド・マグネティックス研究会」, 名古屋大学, 2004 年 12 月 10 日.
- [107]大谷 義近, 木村 崇, J. Hamrle, 「ノンローカル手法を用いたスピン蓄積の測定」, 日本応用磁気学会第 134 回研究会, 第 22 回磁性人工構造膜の物性と機能専門研究会共催 「スピントロニクス」の現状と将来」, 東京農工大学, 2004 年 1 月(招待講演).
- [108]大谷 義近, 「非局所手法を用いたスピン蓄積の測定」, IFCAM 研究会 「Nanoscience Based on Transition Metals」, 東北大学, 2004 年 3 月(招待講演).
- [109]柴田 絢也, 多々良 源, 河野 浩, 大谷 義近, 「Spin wave dissipation on current-driven domain wall motion」, 日本物理学会第 59 回年次大会, 九州大学, 2004 年 3 月.
- [110]大谷義近, 「ノンローカル手法を用いたスピントロニクス効果の測定」, 日本物理学会第 59 回年次大会, 九州大学, 2004 年 3 月.
- [111]A. Moskalenko, T. Kimura, and Y. Otani, 「Fabrication and magneto-transport properties in spin-injection switching devices」, 日本物理学会第 59 回年次大会, 九州大学, 2004 年 3 月.
- [112]木村 崇, J. Hamrle, 大谷 義近, 塚越 一仁, 青柳 克信, 「面内スピンバルブ素子におけるスピン蓄積とスピンフリップ抵抗」, 日本物理学会 2004 年秋季大会, 青森大学, 2004 年 9 月.
- [113]柴田 絢也, 多々良 源, 大谷 義近, 河野 浩, 「Modified LLG equation in the presence of a spin polarized current」, 日本物理学会 2004 年秋季大会, 青森大学, 2004 年 9 月.
- [114]楊 涛, 木村 崇, 大谷 義近, 「Magnetic switching behaviors of nano-pillar structure induced by spin polarized current」, 第 28 回日本応用磁気学会学術講演会, 宜野湾, 2004 年 9 月..
- [115]大谷 義近, 「ナノ構造磁性体の作製と物性」, 応用物理学会スピントロニクス研究会主催 第 3 回スピントロニクス入門セミナー 磁性の初歩からスピントロニクス材料, デバイスまで, 阪大中ノ島センター, 2004 年 12 月.
- [116]安藤康夫, 家形諭, 水上成美, 中村洋明, 久保田均, 宮崎照宣, 強磁性体/非磁性体接合におけるスピンポンピング, 日本物理学会第 59 回年次大会シンポジウム, 九州大学, 平成 16 年 3 月 27 日.
- [117]李永珉, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, NiFe/Ru/NiFe 積層フェリフリー層を用いた MTJ の磁化過程, 第 51 回応用物理学関係連合講演会, 東京工科大学, 平成 16 年 3 月 28 日.
- [118]安成真, 加藤丈晴, 久保田均, 安藤康夫, 宮崎照宣, Al₂O₃(0001) 基板上にエピタキシャルに成長した強磁性トンネル接合のバイアス電圧依存性, 第 51 回応用物理学関係連

- 合講演会，東京工科大学，平成 16 年 3 月 28 日。
- [119]中田淳，大兼幹彦，久保田均，安藤康夫，加藤宏朗，佐久間昭正，宮崎照宣， $\text{Co}_2\text{MnAl}/\text{Al-O}/\text{CoFe}$ 強磁性トンネル接合の磁気抵抗効果，第 51 回応用物理学関係連合講演会，東京工科大学，平成 16 年 3 月 28 日。
- [120]大兼幹彦，中田淳，久保田均，安藤康夫，加藤宏朗，佐久間昭正，宮崎照宣， $\text{Co}_2\text{MnAl}/\text{Al-O}/\text{CoFe}$ 強磁性トンネル接合における磁気抵抗効果の温度依存性，第 51 回応用物理学関係連合講演会，東京工科大学，平成 16 年 3 月 28 日。
- [121]濱田致知，久保田均，安藤康夫，宮崎照宣，Conductive AFM を用いたサブミクロン MTJ の磁気抵抗測定，第 51 回応用物理学関係連合講演会，東京工科大学，平成 16 年 3 月 28 日。
- [122]家形諭，安藤康夫，水上成美，宮崎照宣， $\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{N}$ ($\text{N}=\text{Cu}, \text{Cu}/\text{Pt}$) 薄膜における FMR 線幅の温度依存性，第 51 回応用物理学関係連合講演会，東京工科大学，平成 16 年 3 月 28 日。
- [123]安藤康夫，中村洋明，水上成美，久保田均，宮崎照宣，ポンププローブ法によるスピン才差運動の測定とスピンプンピング，第 51 回応用物理学関係連合講演会，東京工科大学，平成 16 年 3 月 28 日。
- [124]久保田均，宮越健史，上田幸生，安藤康夫，宮崎照宣，磁性薄膜反応性エッチング用の CO-NH_3 プラズマの分析，第 51 回応用物理学関係連合講演会，東京工科大学，平成 16 年 3 月 28 日。
- [125]新関智彦，久保田均，安藤康夫，宮崎照宣，ステップエッジ薄膜堆積法を用いた強磁性単一電子トランジスタの作製，第 51 回応用物理学関係連合講演会，東京工科大学，平成 16 年 3 月 28 日。
- [126]渡邊大輔，久保田均，安藤康夫，宮崎照宣，” 集束イオンビームを利用したサブミクロン MTJ の加工プロセス”，第 65 回応用物理学会学術講演会，仙台，平成 16 年 9 月 4 日。
- [127]渡邊大輔，久保田均，安藤康夫，宮崎照宣，” FIB によるサブミクロン MTJ の作製プロセス”，第 28 回日本応用磁気学会学術講演会，宜野湾，平成 16 年 9 月 21 日。
- [128]新関智彦，久保田均，安藤康夫，宮崎照宣，” 金属ナノ細線をハードマスクに用いた強磁性単一電子素子の作製と特性評価”，第 28 回日本応用磁気学会学術講演会，宜野湾，平成 16 年 9 月 21 日。
- [129]大坊忠臣，大兼幹彦，安藤康夫，宮崎照宣，” 強磁性体二重トンネル接合による超伝導体へのスピン注入”，第 28 回日本応用磁気学会学術講演会，宜野湾，平成 16 年 9 月 21 日。
- [130]家形諭，安藤康夫，水上成美，宮崎照宣，” $\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{N}$ ($\text{N}=\text{Cu}, \text{Cu}/\text{Pt}$) 薄膜における FMR 線幅とスピン拡散長”，第 28 回日本応用磁気学会学術講演会，宜野湾，平成 16 年 9 月 21 日。
- [131]安藤康夫，中村洋明，劉智亨，久保田均，宮崎照宣，” TMR 素子の高速磁化反転測定”，第 28 回日本応用磁気学会学術講演会，宜野湾，平成 16 年 9 月 22 日。
- [132]安藤康夫，家形諭，中村洋明，水上成美，宮崎照宣，” 強磁性体/非磁性体接合におけるスピンプンピングとスピン拡散長”，日本金属学会 2004 年秋期大会シンポジウム，秋田，平成 16 年 9 月 29 日。
- [133]安藤康夫，水上成美，中村洋明，家形諭，大坊忠臣，宮崎照宣，” スピン緩和とスピンデバイスへの展開”，日本応用磁気学会第 8 回ナノマグネティクス専門研究会，国分寺，平成 16 年 10 月 22 日。
- [134]家形諭，安藤康夫，水上成美，宮崎照宣，” $\text{Cu}/\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{N}$ ($\text{N}=\text{Cu}, \text{Cu}/\text{Pt}$) 薄膜における FMR 線幅とスピン拡散長の温度依存性”，第 59 回応用物理学会東北支部学術講演会，仙台，平成 16 年 12 月 10 日。
- [135]R. Yilgin, M. Oogane, S. Yakata, Y. Ando, and T. Miyazaki, ” Investigation of intrinsic α -Gilbert-Damping Term in Co_2MnAl Heusler Alloy Films”，第 59 回応

- 用物理学会東北支部学術講演会，仙台，平成 16 年 12 月 10 日。
- [136] 劉智亨，中村洋明，渡辺大輔，安藤康夫，宮崎照宣，” コプレーナ路線からのパルス磁界による高速磁化反転信号のプローブ検出”，第 59 回応用物理学会東北支部学術講演会，仙台，平成 16 年 12 月 10 日。
- [137] 渡邊大輔，久保田均，安藤康夫，宮崎照宣，” 集束イオンビームを用いたサブミクロン強磁性トンネル接合の作製プロセス”，第 59 回応用物理学会東北支部学術講演会，仙台，平成 16 年 12 月 10 日。
- [138] 加藤丈晴，安成真，安藤康夫，宮崎照宣，” 下部エピタキシャル強磁性トンネル接合における局所伝導特性”，第 59 回応用物理学会東北支部学術講演会，仙台，平成 16 年 12 月 10 日。
- [139] 黒崎義成，長浜 太郎，湯浅 新治，鈴木 義茂，超薄 Fe(100)電極層を持つ TMR 素子の低温における TMR 効果の異常，日本物理学会第 60 回年次大会，東京理科大学野田キャンパス，2005/03/24。
- [140] 水口将輝，鈴木 義茂，長浜 太郎，湯浅 新治，酸化アルミニウムを用いたトンネル磁気抵抗素子の STM 観察，春季第 52 回応用物理関係連合講演会，埼玉大学，2005/03/31。
- [141] 浜田祐介，松本 利映，水口将輝，白石誠司，鈴木 義茂，湯浅 新治，黒崎義成，福島 章雄，久保田 均，長浜 太郎，前原 大樹，恒川 孝仁，David Djayaprawira，渡辺直樹，FeCoB/MgO/FeCoB トンネル磁気抵抗素子の微分コンダクタンス測定，春季第 52 回応用物理関係連合講演会，埼玉大学，2005/03/31。
- [142] 長浜 太郎，湯浅 新治，前原大樹，長井基将，恒川孝二，鈴木 義茂，強磁性二重トンネル接合を用いた三端子素子の作製，春季第 52 回応用物理学関係連合講演会，埼玉大学，2005/03/31。
- [143] 伊藤博介，小瀬木淳一，井上順一郎，” Fe/MgO/Fe 接合の TMR に対する酸素欠損，界面共鳴状態の効果”，日本物理学会第 60 回年次大会，東京理科大学野田キャンパス，2005 年 3 月 24 日。
- [144] 伊藤博介，井上順一郎，” 乱れを含む Fe/MgO/Fe トンネル接合における TMR のタイト・バインディング計算”，超高速コンピュータ網形成プロジェクト・ナノサイエンス実証研究第 3 回公開シンポジウム，岡崎コンファレンスセンター（自然科学研究機構分子科学研究所）2005 年 2 月 15 日。
- [145] 小瀬木淳一，大澤友克，伊藤博介，井上順一郎，” Mn 酸化物を用いた接合系のスピン依存伝導に対する数値シミュレーション”，超高速コンピュータ網形成プロジェクト・ナノサイエンス実証研究第 3 回公開シンポジウム，岡崎コンファレンスセンター（自然科学研究機構分子科学研究所）2005 年 2 月 14 日。
- [146] 大谷 義近，「ノンローカル手法を用いたスピン蓄積の測定」，東京大学物性研談話会，2005 年 1 月。
- [147] 柴田 絢也，「スピン偏極電流による磁壁生成」，東京大学物性研ミニワークショップ「磁性体における伝導」，2005 年 2 月。
- [148] 原 正大，「半導体二次元電子系による微小磁性体の磁化測定」，東京大学物性研ミニワークショップ「磁性体における伝導」，2005 年 2 月。
- [149] 木村 崇，「非局所スピン注入によるスピン分極の制御」，東京大学物性研ミニワークショップ「磁性体における伝導」，2005 年 2 月。
- [150] 柴田 絢也，多々良 源，河野 浩，大谷 義近，「スピン偏極電流における強磁性不安定化と磁壁生成」，第 60 回日本応用磁気学会スピントロニクス専門研究会「強磁性半導体およびスピン依存伝導に関する最近の話題」，東京大学本郷キャンパス，2005 年 2 月。
- [151] 原 正大，木村 崇，柴田 絢也，大谷 義近，「半導体二次元電子系を用いた微小磁性体リングにおける磁化過程の検出」，日本物理学会第 60 回年次大会，東京理科大学野田キャンパス，2005 年 3 月。

- [152]木村 崇, J. Hamrle, 大谷 義近, 塚越 一仁, 青柳 克信, 「面内スピバルブ素子におけるスピン信号の増大」, 日本物理学会第 60 回年次大会, 東京理科大学野田キャンパス, 2005 年 3 月.
- [153]柴田 絢也, 「スピン流による強磁性不安定化と磁壁生成 (理論)」, 日本物理学会第 60 回年次大会, 東京理科大学野田キャンパス, 2005 年 3 月.
- [154]大谷 義近, 「Manipulating magnetic state of nano-scale ferromagnetic particle by means of non-local spin injection technique」, 日立スピントロニクスワークショップ, 日立製作所中央研究所 (国分寺), 2005 年 4 月.
- [155]木村 崇, 大谷 義近, J. Hamrle, 楊 涛, 「非局所スピン注入によるスピン蓄積の制御と磁化反転」, 日本応用磁気学会「第 11 回ナノマグネティックス専門研究会」, 東京, 2005 年 5 月.
- [156]原 正大, 柴田 絢也, 木村 崇, 大谷 義近, 「マグネティックゲートを用いた磁壁ピン止めスイッチング」, 日本物理学会 2005 年秋季大会, 同志社大学京田辺キャンパス, 2005 年 9 月.
- [157]柴田 絢也, 多々良源, 河野 浩, 仲谷 栄伸, 大谷 義近, 「スピン流による磁気渦の運動」, 日本物理学会 2005 年秋季大会, 同志社大学京田辺キャンパス, 2005 年 9 月.
- [158]河野 浩, 多々良源, 柴田 絢也, 「LLG 方程式におけるスピントルクの微視的計算」, 日本物理学会 2005 年秋季大会, 同志社大学京田辺キャンパス, 2005 年 9 月.
- [159]木村 崇, J. Hamrle, 大谷 義近, 「面内スピバルブにおけるスピン蓄積信号の端子配置依存性」, 日本物理学会 2005 年秋季大会, 同志社大学京田辺キャンパス, 2005 年 9 月.
- [160]T. Yang, J. Hamrle, T. Kimura, and Y. Otani, 「Magnetization Switching Dominated by the Spin-polarized Current」, 第 29 回日本応用磁気学会学術講演会, 信州大学, 2005 年 9 月.
- [161]木村 崇, 大谷 義近, 「ナノスケール磁性体のスピндаイナミクス」, PF 研究会・ナノテクノロジー総合支援プロジェクトワークショップ「LEEM/PEEM を用いた表面研究の新しい展開」, 高エネルギー加速器研究機構, つくば, 2005 年 10 月.
- [162]大坊忠臣, 大兼幹彦, 安藤康夫, 宮崎照宣, 「強磁性体二重トンネル接合を利用した超伝導体中へのスピン注入とその磁気抵抗効果」, 日本物理学会第 60 回年次大会, 野田, 平成 17 年 3 月 24 日.
- [163]R. Yilgin, M. Oogane, S. Yakata, Y. Ando, T. Miyazaki, 「Investigation of Intrinsic Gilbert Damping Constant in Co₂MnAl Heusler Alloy Films」 第 52 回応用物理学関係連合講演会, さいたま, 平成 17 年 3 月 29 日～4 月 1 日.
- [164]家形諭, 安藤康夫, 水上成美, 宮崎照宣, 「Cu/Ni₈₀Fe₂₀/N(N=Cu, Cu/Pt) 薄膜における FMR 線幅とスピン拡散長の温度依存性」, 第 52 回応用物理学関係連合講演会, さいたま, 平成 17 年 3 月 29 日～4 月 1 日.
- [165]安成真, 安藤康夫, 宮崎照宣, 「強磁性電極/絶縁層の界面状態と IET スペクトルの関係」, 第 52 回応用物理学関係連合講演会, さいたま, 平成 17 年 3 月 29 日～4 月 1 日.
- [166]木村崇, 大谷義近, 「二重スピン注入による非磁性層スピン蓄積状態の制御」, 日本物理学会第 61 回年次大会, 愛媛大学・松山大学, 2006 年 3 月.
- [167]廣畑貴文, 楊涛, 木村崇, 大谷義近, 「Cu ナノリングにおけるスピン偏極電流の量子干渉効果」, 日本物理学会第 61 回年次大会, 愛媛大学・松山大学, 2006 年 3 月.
- [168]原正大, 柴田絢也, 木村崇, 大谷義近, 「楕円強磁性体リングにおける対ナノ磁壁の回転運動」, 日本物理学会第 61 回年次大会, 愛媛大学・松山大学, 2006 年 3 月.
- [169]柴田絢也, 多々良源, 河野浩, 大谷義近, 「電流駆動磁壁運動に対するスピン波の効果」, 日本物理学会第 61 回年次大会, 愛媛大学・松山大学, 2006 年 3 月.
- [170]石田俊樹, 木村崇, 大谷義近, 「スピン偏極電流による連結磁気円盤の磁区構造制御」, 日本物理学会第 61 回年次大会, 愛媛大学・松山大学, 2006 年 3 月.

②ポスター発表 (国際学会 29 件、国内学会 3 件)

国際会議

- [1] Y. Suzuki and S. Yuasa, H. Miyauchi, T. Sekine, T. Shidara, and T. Koide, T. Ikeda, T. Tamura, T. Nagahama, and T. Kawagoe, "X-RAY ABSORPTION AND X-MCD STUDIES ON THE Fe(100) MONATOMIC LAYER AT THE INTERFACE WITH Al₂O₃ TUNNELING BARRIER", Symposium on Metallic Multilayers, Aachen, 2001/06/25
- [2] Y. Otani, T. Kimura, K. Tsukagoshi, and Y. Aoyagi, "Spin accumulation detected in nonmagnetic metal using spin hall resistance measurement", The 18th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces(ICMFS2003), Madrid, July 2003.
- [3] T. Kimura, J. Hamrle and Y. Otani, "Influence of Au capping layer on spin accumulation lateral spin-valve structure", Intermag2005, Nagoya, April 2005.
- [4] T. Kimura, Y. Otani, K. Tsukagoshi, and Y. Aoyagi, "Domain wall displacement due to spin-current injections in submicron confined structures", The 18th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces(ICMFS2003), Madrid, July 2003.
- [5] T. Kimura, Y. Otani, K. Tsukagoshi, and Y. Aoyagi, "Non-local hall resistance measured in submicro-scale Nonmagnetic/ferromagnetic junctions", International Conference on Magnetism (ICM2003), Rome, July-Aug. 2003.
- [6] T. Kimura, Y. Otani, Y. Yagi, K. Tsukagoshi, and Y. Aoyagi, "Domain wall drag due to dc current injection into ferromagnetic nano-wires", International Conference on Magnetism(ICM2003), Rome, July-Aug 2003.
- [7] J. Shibata, K. Shigeto, and Y. Otani, "Dynamics of nano-scale magnetic vortices in ferromagnetic dot arrays", International Conference on Magnetism(ICM2003), Rome, July-Aug 2003.
- [8] T. Kimura, J. Hamrle, Y. Otani, K. Tsukagoshi, and Y. Aoyagi, "Effect of probe configuration on spin accumulation in lateral spin valve structure", 5th International Symposium on Metallic Multilayers (MML '04), Boulder, USA, June 2004.
- [9] J. Hamrle, T. Kimura, and Y. Otani, "4x4 matrix formalism to calculate a spin accumulation in an electrical network", 5th International Symposium on Metallic Multilayers (MML '04), Boulder, USA, June 2004.
- [10] J. Hamrle, T. Kimura, and Y. Otani, "Non-local voltage signal for non-collinear magnetization", Intermag2005, Nagoya, April 2005.
- [11] J. Shibata, G. Tatara, H. Kohno, and Y. Otani, "Current-induced domain nucleation in ferromagnet", Intermag2005, Nagoya, April 2005.
- [12] J. Shibata, G. Tatara, H. Kohno, and Y. Otani, "Current-induced domain nucleation in ferromagnet", The third international school and conference on spintronics and quantum information technology (SPINTECH III), Awaji Island, Hyogo, August 2005.
- [13] Andrew C. C. Yu and T. Miyazaki, Magnetoresistive Characteristics of Tunnel Junctions with Different Aspect Ratios and Junction Areas, 4th International Symposium on Metallic Multilayers, Aachen, Germany, 6/24-29/2001.
- [14] Andrew C. C. Yu, X. F. Han, J. Murai, Y. Ando, T. Miyazaki and K. Hiraga, Microstructural and Magnetic Characteristics of IrMn Exchange-Biased Tunnel Junctions, 4th International Symposium on Metallic Multilayers, Aachen, Germany, 6/24-29/2001.
- [15] H. Kubota, H. Brückel, G. Reiss, G. Gieres, J. Wecker, Switching of Sub- μ m MTJs Probed by Conducting AFM, 4th International Symposium on Metallic Multilayers, Aachen, Germany, 6/24-29/2001.
- [16] Y. Ando, S. Mizukami and T. Miyazaki, Magnetic Relaxation of Normal-Metal(NM)/80NiFe/NM Films, 4th International Symposium on Metallic Multilayers, Aachen, Germany, 6/24-29/2001.
- [17] A.C.C. Yu, H. Kondo, X. F. Han, J. Murai, T. Miyazaki, K. Hiraga, Neel Coupling and Exchange Biasing Characteristics in Patterned Magnetic Tunnel Junctions,

- 17th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces, Kyoto, Japan, 3/4-8/2002.
- [18] J. H. Yu, M. Hayashi, H. Kubota, Y. Ando, T. Miyazaki, Epitaxial growth of Ag/Cu thin films on Si substrate for magnetic tunnel junctions, 17th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces, Kyoto, Japan, 3/4-8/2002.
- [19] S. Mizukami, Y. Ando, T. Miyazaki, Effect of spin diffusion on Gilbert damping for a very thin Ni₈₀Fe₂₀ layer in Cu/ Ni₈₀Fe₂₀/Cu/Pt films, 17th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces, Kyoto, Japan, 3/4-8/2002.
- [20] H. Kubota, Y. Ando, T. Miyazaki, G. Reiss, H. Brukl, W. Schepper, J. Wecker, G. Gieres, Tunnel Magnetoresistance Measurement for Ultra-Small Junctions using Conductive Atomic Force Microscopy, 17th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces, Kyoto, Japan, 3/4-8/2002.
- [21] M. Hayashi, Y. Ando, M. Oogane, H. Kubota, T. Miyazaki, STM Observation of Growth Progress and Surface Structures of Insulating Film in Magnetic Tunnel Junctions, 17th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces, Kyoto, Japan, 3/4-8/2002.
- [22] S. Mizukami, H. Nakamura, Y. Ando, H. Kubota, T. Miyazaki, “Effect of spin PUMPING on Gilbert damping for a thin permalloy FILM detected by using time resolved kerr effect”, XVIII International colloquium on Magnetic films and surfaces, Madrid, Spain, July 22, 2003.
- [23] Y. Ando, H. Nakamura, S. Mizukami, H. Kubota, T. Miyazaki, “TIME-RESOLVED MAGNETIZATION REVERSAL INVESTIGATED USING TUNNEL CURRENT AND KERR EFFECT”, International conference on Magnetism 2003, Roma, Italy, July 27, 2003.
- [24] Y. Ando, S. Iura, H. Kubota, T. Miyazaki, C.S. Yoon, J.H. Lee, D.H. Im, C.K. Kim, “Ferromagnetic tunnel junctions with high thermal stability”, International conference on Magnetism 2003, Roma, Italy, July 27, 2003.
- [25] H. Kubota, K. Ueda, Y. Ando, T. Miyazaki, “CO+NH₃ plasma etching for magnetic thin films”, International conference on Magnetism 2003, Roma, Italy, July 27, 2003.
- [26] T. Niizeki, H. Kubota, Y. Ando and T. Miyazaki, “Nanofabrication of magnetic tunnel junctions using electron beam lithography”, International conference on Magnetism 2003, Roma, Italy, July 27, 2003.
- [27] M. Oogane, T. Daibou, H. Kubota, Y. Ando, T. Miyazaki, “Tunnel spectra for Al/Al-oxide/Ni₈₀Fe₂₀ junctions under the superconducting transition temperature of Al films”, International conference on Magnetism 2003, Roma, Italy, July 27, 2003.
- [28] S.J. Ahn, T. Kato, H. Kubota, Y. Ando, T. Miyazaki, “Bias-voltage dependence of tunnel magnetoresistance depending on the crystal structure of bottom ferromagnetic electrode”, International Magnetism Conference 2005, Nagoya, April 8, 2005.
- [29] A. F. Md Nor, Y. Ando, N. Mochizuki, T. Miyazaki, “Noise properties of magnetic tunnel junctions”, International Magnetism Conference 2005, Nagoya, April 8, 2005.

国内会議

- [1] Hamrle, 木村 崇, 大谷 義近, 「4x4 matrix formalism to calculate spin accumulation – variation of non-local spin voltage in lateral spin-valve structure」, 日本物理学会第 59 回年次大会, 九州大学, 2004 年 3 月.
- [2] 楊 涛, 木村 崇, 大谷 義近, 「Switching behaviors caused by spin polarized current in nanopillar structure」, 日本物理学会 2004 年秋季大会, 青森大学, 2004 年 9 月.
- [3] 石田 俊樹, 木村 崇, 大谷 義近, 「スピンの偏極電流バイアス下での磁気円盤磁化過程」, 日本物理学会 2005 年秋季大会, 同志社大学京田辺キャンパス, 2005 年 9 月.

(3)特許出願

- 1)長濱 太郎, 湯浅 新治, 鈴木 義茂, 「強磁性トンネル磁気抵抗素子」, 科学技術振興機構, 産業技術総合研究所, 特願 2001-163757(2001.5.3, A111P23), 特開 2002-359413(2002.12.13)
- 2)湯浅 新治, 長濱 太郎, 鈴木 義茂, 「トンネル磁気抵抗素子」, 科学技術振興機構, 産業技術総合研究所, 特願 2001-279289(2001.9.14, A111P33), 特開 2003-86863(2003.3.20)
- 3)湯浅 新治, 長濱 太郎, 鈴木 義茂, 「平坦化トンネル磁気抵抗素子」, 科学技術振興機構, 産業技術総合研究所, 特願 2002-121121(2002.4.23, A111P53), 特開 2003-318465(2003.11.7)

以上の3件を束ねPCT出願(PCT/JP02/05049,2002.5.24,A111-20PCT), 米国, EP(独・仏・英), 韓国へ移行。

- 4)鈴木 義茂, 湯浅 新治, 福島 章雄, 「マイクロ波伝送回路一体型マイクロ波発生素子及びマイクロ波伝送回路一体型マイクロ波検出素子」, 科学技術振興機構, 産総研, 特願 2005-80043 (05.3.18, K020P58), PCT 出願 K02016US(PCT)

(4)受賞等

①受賞

宮崎照宣、第5回山崎貞一賞、“トンネル磁気抵抗素子の応用に関する研究”、平成17年11月18日

②新聞報道

- ・「新型高性能トンネル磁気抵抗素子を開発-超 Gbit 級 MRAM の実現に向けて道筋-」(2002.4.25) 日刊工業、日経産業新聞他
- ・「スピン偏極共鳴トンネル効果を発見-新機能素子(スピン・トランジスタ)の実現に向けて道筋-」(2002.7.11) 日刊工業、日経産業新聞他
- ・「スピン注入磁気共鳴を利用したスピントルクダイオードを開発-高感度マイクロ波検波器としての応用が期待される-」(2005.11.14) 朝日、読売、日刊工業、日経産業新聞

③その他 なし

(5)その他特記事項 なし

6 研究期間中の主な活動

(1)ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2003年 11月 25～27日	“International Workshop on Nano-Scale Magnetoelectronics”	名古屋大学 (名古屋市)	83人	井上教授(名古屋大学)を代表とする NEDO 国際共同プロジェクト、猪股教授(東北大学)を代表とする CREST、および本 CREST プロジェクトが一同に会し、ナノスケールの磁性体およびスピン制御の物理と技術について議論した。

(2)招聘した研究者等

氏名(所属、役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間
Silva Joseph Thomas (National Institute of Standards and Technology, Researcher)	高速磁化反転の光計測についての議論. CREST のワークショップ” International Workshop on Nano-Scale Magnetoelectronics”での招待講演.	東北大学	2003. 11. 17 ～11. 28
Sun Zanhong Jonathan (IBM T. J. Watson Research Center, Researcher)	スピン注入磁化反転についての議論. CREST のワークショップ” International Workshop on Nano-Scale Magnetoelectronics”での招待講演.	産総研	2003. 11. 23 ～12. 2
José Carlos Martínez-Boubeta (Instituto de Microelectrónica de Madrid (IMM)/CSIC Isaac Newton 8 (P. T. M.), Researcher)	Fe/MgO/Fe 単結晶トンネル接合の素子への加工と伝導評価. MgO バリヤ作製.	産総研	2003. 11. 6 ～12. 26

7 結び

以上、5年間の研究成果についてまとめました。それぞれの研究グループではCRESTで無ければ購入不可能な素子製作用と素子評価用の大型設備の設置が可能となり、それら設備の戦力化により研究の多大な進捗を図ることが出来ました。3グループが密接に連携を取りそれぞれの任務に邁進した事が成功につながったと考えていますが、その間、研究代表者が阪大へ転出し(産総研では客員研究員の任務)CREST 研究を継続する案の了解を頂き感謝しています。ここに阪大の研究メンバーも連携を密に鋭意努力したことをご報告致します。

最後に本研究の採択、実施、評価全般に亘ってご指導頂きました研究総括の菅野卓雄先生ならびに領域アドバイザーの先生方に深く感謝致します。また、研究の実施にあたり多大な協力を惜しまなかった JST 本部及び担当者の皆様、研究事務所の皆様に謝意を表します。