OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	磁気トンネル接合(MTJs)素子における低温でのスピントルクダイオード測定
Author(s)	石橋, 翔太; 鈴木, 義茂
Citation	大阪大学低温センターだより. 2010, 149, p. 9-14
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/6169
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

大阪大学GCOEプログラム

「物質の量子機能解明と未来型機能材料創出」

拠点リーダー：北岡　良雄（基礎工学研究科）

事業推進者

氏　名	所属・役職	GCOEでの役割
北岡　良雄	基礎工学研究科（物質創成専攻）・教授	全体総括、革新的多元環境下 **NMR** を用いた新物理現象の発見と解明
三宅　和正	基礎工学研究科（物質創成専攻）・教授	強相関電子物理の探求と新しい超伝導機構の理論的探索
井元　信之	基礎工学研究科（物質創成専攻）・教授	量子情報処理に向けた光と物質の相互作用の解明量子情報理論および実験
鈴木　義茂※	基礎工学研究科（物質創成専攻）・教授	ナノ構造磁性体の作製とそれらを用いた新物理現象の発見と解明
夛田　博一	基礎工学研究科（物質創成専攻）・教授	分子スケールエレクトロニクス素子の構築と基礎特性解明
木村　　剛	基礎工学研究科（物質創成専攻）・教授	新しい電磁応答物質の創製
吉田　　博	基礎工学研究科（物質創成専攻）・教授	計算機ナノマテリアル・デバイスデザイン
関山　　明	基礎工学研究科（物質創成専攻）・教授	先端的広エネルギー励起光電子分光の開発と強相関電子系の物性解明
草部　浩一	基礎工学研究科（物質創成専攻）・准教授	世界最高精度をもつ第一原理電子状態計算理論の開発と機能性新物質の設計
芦田　昌明	基礎工学研究科（物質創成専攻）・准教授	超広帯域時間領域分光法による超高速光学応答の解明とナノ構造物質の新奇創成・制御技術の開発
白石　誠司	基礎工学研究科（物質創成専攻）・准教授	分子系へのスピン注入現象を用いた新規素子の構築と単一スピン操作の実現
宮坂　　博	基礎工学研究科（物質創成専攻）・教授	単一分子レベルの光化学反応に対するコヒーレント及びインコヒーレント制御手法の開発
清水　克哉	極限量子科学研究センター（量子基礎科学大部門）・教授	超高圧発生を中心とした極限物性研究
萩原　政幸	極限量子科学研究センター（量子基礎科学大部門）・教授	超強磁場を利用した極限物性研究と生体物質研究
岡本　博明	基礎工学研究科（システム創成専攻）・教授	アモルファス・ナノ半導体の電子物性解明と新光電変換材料・デバイスの創成
占部　伸二	基礎工学研究科（システム創成専攻）・教授	レーザー冷却イオンを用いた量子情報処理
北川　勝浩	基礎工学研究科（システム創成専攻）・教授	スピンを用いた量子情報処理実験および理論
大貫　惇睦	理学研究科（物理学専攻）・教授	量子物質の創製、重い電子系の実験的研究
野末　泰夫	理学研究科（物理学専攻）・教授	ナノ構造量子物質の作製と新物性の発見と解明
田島　節子	理学研究科（物理学専攻）・教授	エキゾチック超伝導をはじめとする新奇量子現象の発見と解明
川村　　光	理学研究科（宇宙地球科学専攻）・教授	フラストレート系の新奇秩序化現象の理論的研究
廣田　和馬	理学研究科（宇宙地球科学専攻）・教授	中性子・X線散乱を用いて、極限環境下での強相関系および磁性体・誘電体の構造物性の研究
齋藤　伸吾	（独）情報通信研究機構（新世代ネットワーク研究センター）・主任研究員	テラヘルツ波を用いた半導体ナノ構造の微視的測定の開発
湯浅　新治	（独）産業技術総合研究所（エレクトロニクス研究部門）・スピントロニクスグループグループ長	エピタキシャルナノ構造磁性体の作製

※印：本号で紹介する研究者及び研究グループ関係者
太字：低温センターから支援を受けている事業推進者

MTJs 素子における
低温でのスピントルクダイオード測定

基礎工学研究科　石橋　翔太
鈴木　義茂

スピン角運動量移行（スピントランスファー）を利用した磁化制御技術はスピントロニクスデバイスの低電力駆動化において重要な技術であり、現在活発な研究が進められている。最も重要な基本構造は強磁性層 / 非磁性絶縁層 / 強磁性層からなる強磁性トンネル接合素子である。伝導電子が片方の強磁性層からもう一方の強磁性層へスピンを保存したままトンネル伝導する場合を考えると、**s-d**交換相互作用によってもう一方の強磁性体中の局在スピンの向きを中心に歳差運動し、やがて局在スピンの向きに向く。このとき、角運動量を保存するために伝導電子のスピンの向きの変化分が局在磁化にトルクとして働く。これをスピントランスファートルクと呼ぶ。この効果により、応用上重要であるナノレベルの磁性構造の磁化反転や発振[1]が引き起こされる。しかし、磁化反転や発振を引き起こすのに必要な電流密度は非常に大きいために（10^7 **A cm**$^{-2}$）、スピントルクの大きさや向きの正確な測定は困難であった。スピントルクへ影響を与える要因やスピントルクを説明できる理論の理解には、そのようなスピントルクの大きさや向きの定量的な評価が必要である。そこで、本稿ではスピントルクの定量的な測定が可能である磁気トンネル接合（**MTJs**）素子におけるスピントルクダイオード測定を紹介し[2]、さらに低温に冷やすことでスピントルクの温度変化についても触れる。

図 **1** に我々が用いた**MTJs**の構模式図を示す。絶縁層に**MgO**を用いており、非常に大きな磁気抵抗（**MR**）効果が得られる。この**MTJs**は磁気ランダムアクセスメモリー（**M-RAM**）の記憶媒体や磁気ハードディスクドライブの磁場センサーとして、現在使われている。

IrMn/CoFe/Ru/CoFeB/MgO/CoFeBという構造をもつ**MTJs**を**Si**基板上にスパッタリング装置を用いて作製した。**3 nm**の下部の**CoFeB**層が磁化固定層（磁化の向きが磁化容易軸方向に固定されている）であり、伝導電子のスピンの向きをスピン編極する働きをする。一方、**1.5 nm**の上部の**CoFeB**層は磁化自由層（保磁力

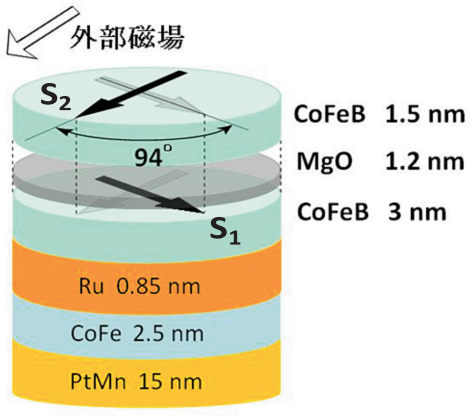

図 **1**　トンネル接合素子構造模式図

が小さく磁化の向きを自由に変化できる）であり、スピントルクにより、磁化の向きが変化する。**MTJs**は微細加工により**50**×**150 nm**^{2}の楕円形に切り出されている。

本研究では磁場は容易軸方向（楕円形の長軸方向）から膜面**90** °方向に印加し、室温（**300 K**）、低温（**30 K**）での抵抗-磁場曲線を測定した（図 **2**）。また、S_1とS_2の磁化相対角が**94** °である。磁気抵抗（**MR**）比とは（$R_{AP}-R_P$）/ R_Pと定義され、ここでR_{AP}、R_PはそれぞれS_1とS_2の磁化配列が反平行状態、平行状態での抵抗値を示す。今回用いた素子では、**MR**比、R_Pはそれぞれ**80**%、**341**Ωである。

今回の測定ではバイアス電圧印加下でのスピントルクの直接的な評価が可能であるスピントルクダイオード効果を用いた[3, 4]。微小な高周波電流を**MTJ**素子に印加すると、S_2にトルクが働く。この高周波トルクのために、S_2は同じ周波数で振動し、抵抗値はS_1とS_2の磁化相対角に依存するために、印加した交流は一部整流される。この測定より、ゼロバイアス電圧において、二つのトルクが存在することが分かっている。**1** つ目がスピントランスファトルク（**STT**）と呼ばれ、S_2を膜面方向に回転する方向に働き、**2** つ目がフィールドライクトルク（**FLT**）と呼ばれ、S_2を膜面垂直方向に回転する方向に働く。

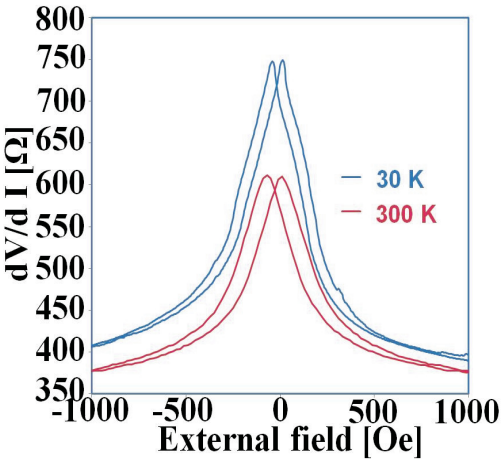

図 **2**　**TMR**曲線の測定例

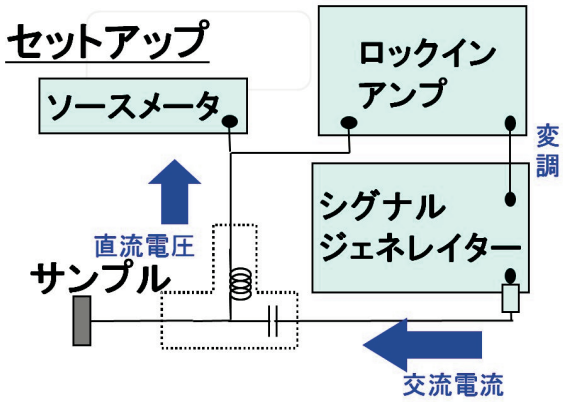

図 **3**　測定セットアップ模式図

測定は－**330 mV**から**330 mV**の電圧下で、**H=280 Oe**で磁化容易軸から**90** °方向の磁場下で室温、低温（**30 K**）において図 **3** のようなセットアップを用いて行われた。

図 **4** に室温における**V=**－**330**、**0**、**330 mV**の電圧下での測定されたスピントルクダイオードスペクトルを示した。ピークの大きさはバイアス電圧により変化しており、ゼロバイアス電圧下ではピークの形が対称であるのに対して、高バイアス電圧下では反対称である。スペクトルの対称性（反対称性）は、**STT**（**FLT**）に由来している。スペ

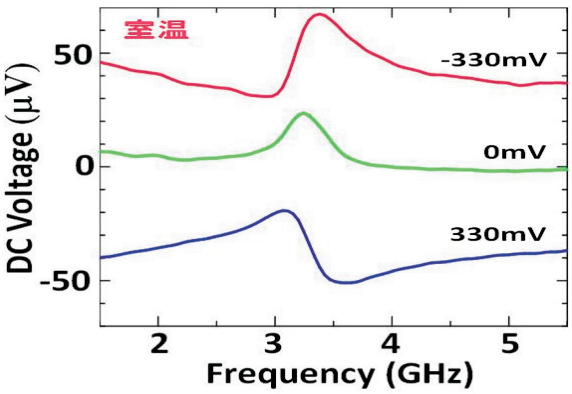

図 **4**　スピントルクダイオードスペクトルの例

クトルへの**STT**と**FLT**の寄与を評価するために、磁区構造中の局在磁化の影響を無視したマクロスピンモデルをもとにスペクトルの解析を行った。$\mathbf{S}_2$の運動はスピントルクの項を含んだランダウ-リフシッツ-ギルバード方程式により以下のように描写される。

$$\frac{d\hat{s}_2}{dt} = \gamma \hat{s}_2 \times H_{eff} - \alpha \hat{s}_2 \times \frac{d\hat{s}_2}{dt} + \beta_{ST} I_b \hat{s}_2 \times (\hat{s}_1 \times \hat{s}_2) + \beta_{FT} I_b \hat{s}_1 \times \hat{s}_2$$

γは磁気回転比、$\hat{s}_1$, $\hat{s}_2$はそれぞれ自由層、固定層の平均のスピンの向きに平行な単位ベクトルを示す。第**1**項は磁場によるトルクを、第**2**項はダンピングトルクを示している。さらに第**3**項、第**4**項はスピントルクを示している。β_{ST}、β_{FT}はそれぞれ**STT**、**FLT**に由来するトルクの係数を示している。さらに、αはダンピング因子、H_{eff}は**S2**の歳差運動の中心方向である有効磁場の向きを示している。I_bは直流電流と交流電流の和であり、この方程式に基づくと、スピントルクダイオードスペクトルは以下のように書ける。

$$V_{diode}(\omega) = \frac{1}{4}\eta \frac{R_{AP} - R_P}{R_{AP} R_P} R_0 Z_0 I_\omega \sin^2 \theta_{12} \times f[\omega; \beta_{ST}, \beta_{FT}, \omega_0, \Delta, I_b, H, H_d, \theta_{12}]$$

ここでR_0は磁化相対角度θ_{12}かつバイアス電圧V_b下での**MTJs**の抵抗、ηは高周波電流の減衰の補正項を示している。Z_0はケーブルの特性インピーダンスを示している。最後の項**f**はスペクトルの形を表している。H_dとωはそれぞれ面直方向の反磁場、印加した電流の各周波数を示している。この式を用いて、β_{ST}、β_{FT}、共鳴各周波数ω_0、スペクトルの線幅Δをフィッティングパラメータとして実験結果を解析した。

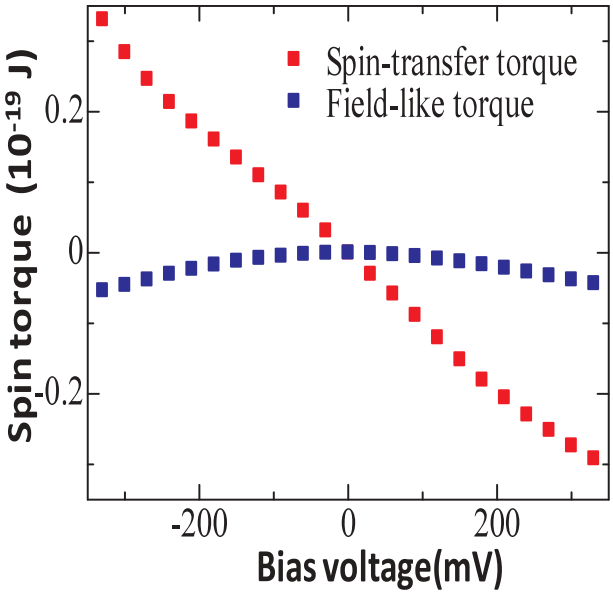

図 **5**　**STT, FLT**のバイアス電圧依存性（室温）

図 **5** に、**STT**と**FLT**のバイアス電圧依存性を示している。スピントランスファ効率が一定であるという物理的描像から示唆されるように**STT**はバイアス電圧に比例している。

理論的には$\mathbf{S}_2$に働く**STT**は注入されるスピン流の横成分に等しいとする理論が存在し、以下のようにスピントルクを表される。

$$spin\ \ torque = \frac{\hbar}{4e}(G_{+,+} + G_{+,-} - G_{-,+} - G_{-,-}) \sin\theta_{12} V_b$$

ここで、$G_{\sigma 1, \sigma 2}$は$\mathbf{S}_1$と$\mathbf{S}_2$のスピンのサブチャネルのコンダクタンスを示す（＋マジョリティスピン、－マイノリティスピン）。素子の抵抗値は$\mathbf{R_P}^{-1}=(\mathbf{G_{+,+}}+\mathbf{G_{-,-}})$、$\mathbf{R_{AP}}^{-1}=(\mathbf{G_{+,-}}+\mathbf{G_{-,+}})$と表わされる。同じ電極材料で対称なポテンシャルをもつ**MTJs**では$(\mathbf{G_{+,+}}-\mathbf{G_{-,-}})\mathbf{V_b}$からの寄与は反対称なバイアス電圧

依存性を示し、$(G_{+,-}-G_{-,+})V_b$からの寄与は対称なバイアス依存性を示すことが推測される。実験結果は反対称性を保っており、$(G_{+,+}-G_{-,-})V_b$の項が支配的であることが分かる。一方、**FLT**は−**200 mV**から**200 mV**の範囲では、バイアス電圧に対して **2** 次関数的に変化し、それ以上のバイアス電圧では **1** 次関数的に変化している。**FLT**が **2** 次関数的に変化することを主張する理論が存在するが、**1** 次関数的に変化については理論では説明できない。

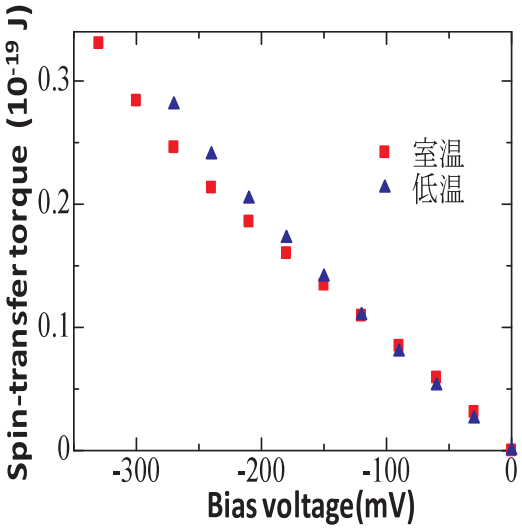

図 **6**　**STT**のバイアス電圧依存性（室温、低温）

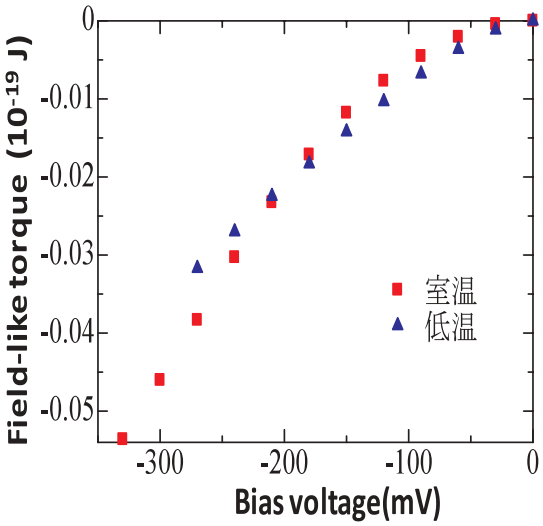

図 **7**　**FLT**のバイアス電圧依存性（室温、低温）

図 **6, 7** はそれぞれ負バイアス電圧下での**STT**、**FLT**の室温、低温（**30 K**）におけるバイアス電圧依存性を示している。**MR**比は室温→低温で、**80**%→**120**%に変化しているのに対して、**STT**の大きさは変化していないことが分かる。一方、**FLT**に関しては、大きさ自身は**STT**同様ほとんど変化はないが、低温では−**100 mV**から**100 mV**の電圧下で **2** 次関数的に変化しており、それ以上の高バイアスで **1** 次関数的に変化しており、低温に冷やすことでバイアス電圧に対する傾向が変化していることがわかる。マグノン励起により**FLT**を説明する理論が存在し、この変化の原因は低温に冷やすことでマグノン励起が起きにくくなることが関連している可能性がある。

最後に**M-RAM**の記憶媒体のスピン注入磁化反転の原理について述べる。たくさんの研究グループで**MgO**をスペーサー層に用いた**MTJs**において、スピン注入磁化反転が報告されている。低温（**30 K**）に冷やすことで、**MR**比が上がり、スピン編極率が大きくなっているはずであるが、**STT**の大きさは変化せず、**MR**比を上げることがスピントルクを大きくするのに有効な方法ではないことが分かる。また、**FLT**に関しては、低温に冷やすことでバイアス電圧による傾向の変化が観測され、マグノン励起などの物理的現象が関連している可能性があり、さらなる詳細な温度依存性の評価が必要である。

参考文献

［1］ **A. M. Deac** *et al., Nature Phys*., 4. **803**（**2008**）.

［2］ **A. A. Tulapurkar** *et al., Nature*, 438, **339**（**2005**）.

［3］ **H. Kubota** *et al., Nature Phys*., 4, **37**（**2008**）.

［4］ **J. C. Sankey** *et al., Nature Phys*., 4. **67**（**2008**）.