

## 核スピンを用いたスピン流の生成およびスピン流生成物質の評価

日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター

今井 正樹

### 要旨

本研究は核スピンを用いた新たなスピン流生成方法の実現、および NMR を用いたスピン流生成材料の評価を通して材料選択の指針を与えることを目的として行った。強磁性共鳴(FMR)法を用いたスピン流生成(スピンプンプ)の実験系を参考とし、磁性体/白金薄膜試料を用いた。CW NMR によって核スピン系を励起し、電子スピンの超微細結合を利用して白金層にスピン流を注入することを目指した。また、スピン流を材料に注入した状態で、NMR 測定法による核スピン-格子緩和時間( $T_1$ )、核スピン-スピン緩和時間( $T_2$ )測定を行い、スピン流注入下における電子状態のダイナミクスの測定も試みた。

### 核スピンを用いたスピン流生成

スピントロニクスでは電子のもつスピン自由度の流れである“スピン流”を情報、エネルギー媒体とした素子開発研究が精力的に行われており、スピン流の生成・制御法に注目が集まっている。スピン流の発生方法は 電磁気的方法(スピン注入[1]・スピンプンプ[2])、熱的方法(スピンゼーベック効果[3])、力学的手法(スピン流体発電[4]、表面弾性波[5])等様々な手法が確立されている。本研究では固体内で未だスピン流生成に用いられていない自由度である核スピンを用いたスピン流生成手法の開拓を目指した。

強磁性体の NMR では“強磁性増強”により NMR 信号が増幅されることが古くから知られている[6]。この増強は核スピンに対して歳差運動の周波数が大きな電子スピンの断熱的に追従することで引き起こされる。強磁性増強を利用することで、FMR で行われるスピンプンプと同様に電子スピンの歳差運動する状況を作り出すことができると考えた。

まず、実験対象として強磁性金属の Co を用いた Co/Pt ヘテロ薄膜試料を用意し NMR 測定を行った。ゼロ磁場で  $^{59}\text{Co}$  核の NMR 測定を行ったところ、強磁性増強効果により薄膜にもかかわらず強い信号が確認された(ピーク 220MHz, 半値幅 20MHz)。図 1 に示す実験系で、定常波のラジオ波(RF)を印加した状態で磁場強度を掃引しながら、白金の電圧信号を測定した。以下の二つの問題により信号観測が困難であった。一つは強磁性増強効果が磁場の印加と共に減少してしまう問題、もう一つは磁場により試料の

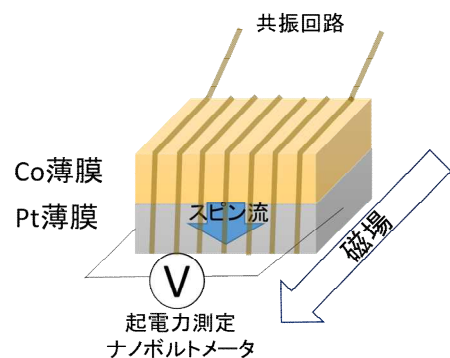


図 1 実験系の模式図

磁化が変化することでコイルのインダクタンスが変わってしまい NMR タンク回路のチューン・マッチングがずれてしまう問題である。

次に Co よりも NMR スペクトルの線幅の狭いホイスラー合金  $\text{Co}_2\text{MnSi}$  を用いて周波数掃引による起電力信号の測定を行った。しかしながら、電圧信号を測定するナノボルトメーターに RF 周波数に依存するオフセットが乗ってしまう問題のためスピン流による信号を観測することが困難であった。RF に依存する電力信号は、起電力測定のための信号線に NMR 用コイルからの RF が流入することによって引き起こされていることがわかった。

線幅の狭いフェリ磁性絶縁体  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  試料でも実験を試みたが、信号線への RF の流入、試料への RF の入力強度が NMR タンク回路のインピーダンスの周波数依存により変化してしまうため測定は困難であった。現在、信号線にローパスフィルターを取り付けて RF をカットしたり、RF の入力強度を一定にするためにタンク回路からコプレーナ線路を用いた NMR をおこなったりするなど対策を講じているところである。

### スピン流注入下における NMR 測定

NMR は  $T_1$  や  $T_2$  を測定することにより、電子のダイナミクスの観測が可能なプローブである。そのため、スピン流を物質中に注入した状態での  $T_1$  や  $T_2$  に対する変調からスピン流注入下での非平衡状態を直接観測することが可能である。 $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Pt}$  薄膜に対して図 1 のナノボルトメーターを電流源に変えたセットアップを組んだ。Pt に電流を流し、Pt のスピンホール効果を用いたスピン流の注入を行ながら  $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  の  $^{57}\text{Fe}$  核 NMR 測定を行った。 $T_1$  は反転法、 $T_2$  はスピンエコー減衰測定から求めた。

白金に電流を印加すると  $T_1$  が早くなる現象が見られたが、スピン流に由来する変調と電流印加による発熱を区別する事が困難であった。一方で、スピンエコー減衰は電流 0 ではローレンツ関数型、電流印加でガウス関数型に変化した。通常の変調ではこのような関数系の違いが現れないため、スピン流注入により緩和過程が変化すると期待される。この緩和過程変化がスピン流中によるものか明らかにするため、別のセットアップでの実験を構築し検討を行っているところである。

### 参考文献

- [1] F. J. Jedema, A. T. Filip, and B. J. van Wees, *Nature (London)* **410**, 345 (2001).
- [2] E. Saitoh, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 182509 (2006).
- [3] K. Uchida, *et al.* *Nature (London)* **455**, 778 (2008).
- [4] R. Takahashi, *et al.* *Nature Physics* **12**, 52. (2016).
- [5] D. Kobayashi, *et al.* *Physical Review Letters* **119**, 077202 (2017).
- [6] P. G. de Gennes, *et al.* *Phys. Rev.* **129**, 1105 (1963).