

令和 2 年 4 月 30 日

海外特別研究員最終報告書

独立行政法人日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成 30 年度

受付番号 201860428

氏 名

谷口卓也

(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地： ミュンヘン （国名： ドイツ ）
2. 研究課題名（和文）※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。
スピン波を用いた磁壁移動型メモリーの研究
3. 派遣期間：平成 30 年 4 月 1 日 ～ 令和 2 年 3 月 31 日
4. 受入機関名及び部局名
ミュンヘン工科大学 物理学科

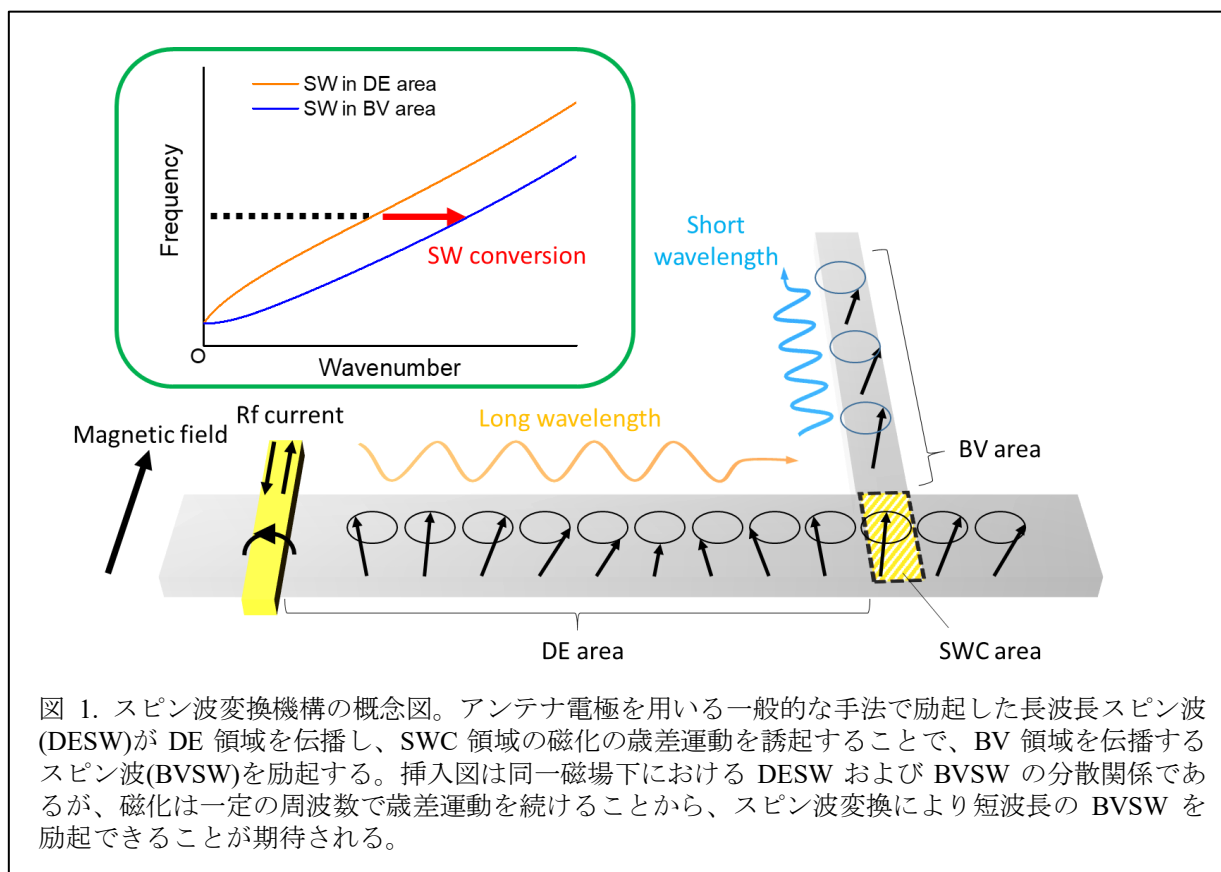
5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 **書式任意 (A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入可)**

(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)

(注)「6. 研究発表」以降については様式 10-別紙 1~4 に記入の上、併せて提出すること。

磁性体における集団励起であるスピン波は、伝播することで“スピン”を輸送することできる。この輸送にはジュール損失が伴わないことから、スピン波のデバイス応用は注目を集め近年盛んに研究されている。また、次世代不揮発性メモリーとして提案された磁壁移動型メモリーは、従来のハードディスクと比べて、機械的な安定性と大容量化が可能であることが大きな利点として挙げられるが、磁壁移動に必要なエネルギーをどのように低減するかが課題となっていた。本研究課題では、スピン波が角運動量を輸送することに着目して、スピン波駆動による磁壁移動現象の研究に取り組んだ。スピン波駆動磁壁移動現象の実現には、磁壁幅と同程度の波長をもつスピン波を励起する必要がある。しかし一般的なスピン波励起手法では、作製されたアンテナ電極の大きさによって励起されるスピン波の波長が決定されるため、面内磁化膜における一般的な磁壁幅である 100 nm 程度に到達することが技術的に困難であった。そこで、まず、スピン波変換機構を利用した短波長スピン波励起手法の確立を目指した。

具体的な短波長スピン波励起手法は次の通りである(図 1)。丁字状の磁性細線においてスピン波を細線の一端でアンテナ電極を用いた一般的な手法によって励起する。すると、励起されたスピン波(DESW)は磁性細線内を伝播するが、丁字の交差点(SWC 領域)における磁化の歳差運動によって、二つの方向に伝播するスピン波(DESW と BVSW)が誘起される。このとき、分岐後のスピン波は共に同じ共鳴周波数を有する。しかし、図中の通りに磁場を印加していると、DESW と BVSW は異なる分散関係を持つことになる。その結果、BVSW は DESW よりも短い波長を有することになり、スピン波変換を利用した短波長スピン波の励起が期待される。



まず、スピン波変換による短波長スピン波励起機構を理解するために、Mumax³[1]を用いたマイクロマグネティックシミュレーションを行ったので、その成果を報告する。シミュレーションでは、スピン波伝播長が長い磁性金属として知られている、FeNi 合金(パーマロイ: Py)を想定した。丁字状の試料を用意し、スピン波が伝播の様子を観測したところ、想定通り、励起した DESW よりも短波長の BVSW が励起されていることを確認した。さらに、励起された BVSW の分散関係を調査し、短波長領域のスピン波にも適応できる理論式[2]と照らし合わせたところ、それらが合致することが判った。従って、試料中で励起される BVSW について、一般的なスピン波の分散関係を用いて議論できる。次に、BV 領域の細線幅(w_{BV})を変化させたところ、DESW の波長(λ_{DESW})が一定である一方で、BVSW の細線幅方向の節の数が系統的に変化することが判った。また、DESW の励起周波数を変化させたところ、DESW の波長の変化に伴って BVSW の節の数が系統的に変化

した。これらのことから、誘起される BVSW の節の数(n)は、 $n \lesssim 2w_{BV}/\lambda_{DESW}$ の関係にあることが明らかになった(図 2)。さらに、スピン波の変換効率を見積もったところ、SWC 領域を通過した後の DESW 励起効率は周波数にほとんど依存しない一方で、 $n=0$ のモードの BVSW が励起される効率は励起周波数の増加に伴って単調に減少することがわかった。これは、 $n=1$ のモードの BVSW も励起されるようになり、BVSW 励起に用いられるエネルギーが各モードの励起に分配されることを示唆する。これらのシミュレーション結果により、スピン波駆動磁壁移動現象に適切なスピン波を励起するための知見が得られた。本成果は Magnonics 2019 で発表した。

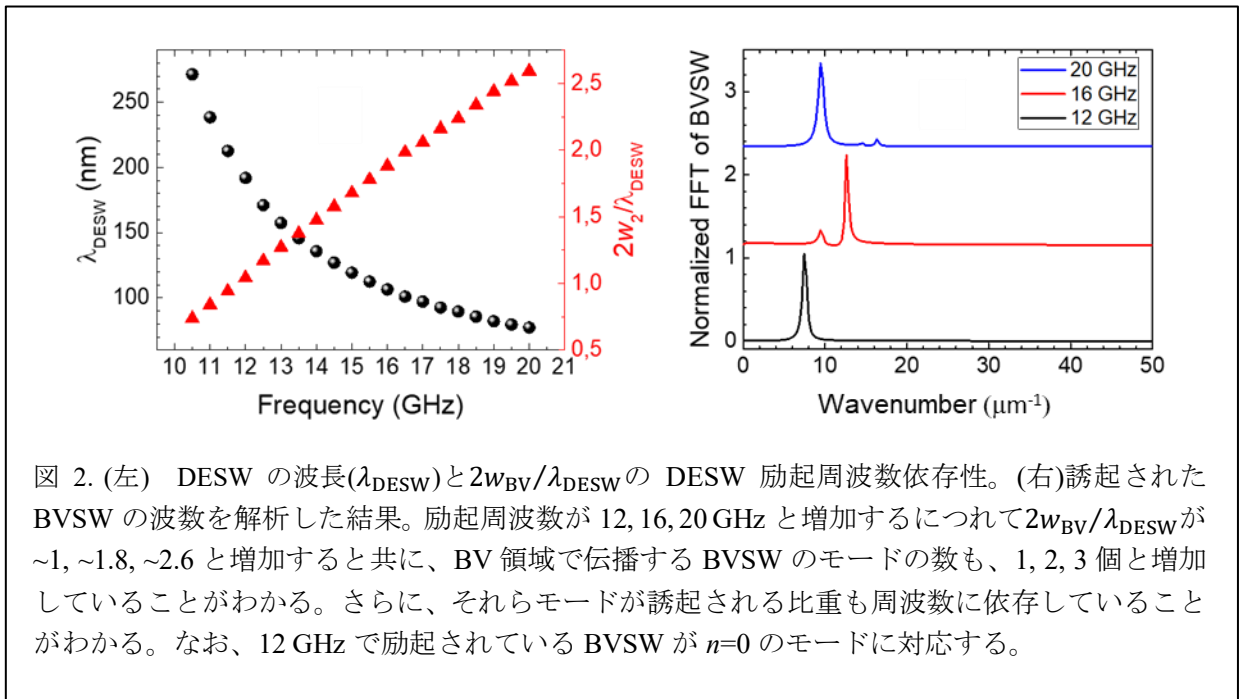


図 2. (左) DESW の波長(λ_{DESW})と $2w_{BV}/\lambda_{DESW}$ の DESW 励起周波数依存性。(右)誘起された BVSW の波数を解析した結果。励起周波数が 12, 16, 20 GHz と増加するにつれて $2w_{BV}/\lambda_{DESW}$ が ~ 1 , ~ 1.8 , ~ 2.6 と増加すると共に、BV 領域で伝播する BVSW のモードの数も、1, 2, 3 個と増加していることがわかる。さらに、それらモードが誘起される比重も周波数に依存していることがわかる。なお、12 GHz で励起されている BVSW が $n=0$ のモードに対応する。

次に、実験による研究遂行状況を報告する。派遣先の研究室では微細加工技術が確立されていなかったため、まず、電子線蒸着装置による試料成膜の評価や、電子線フォトリソグラフィーやフォトリソグラフィーの条件出し、Ar イオンエッチングの条件出しなどを行った。装置の不具合や電子線描画装置が多数の利用者によって頻繁に使用されていたことなどにも起因し、微細加工に必要な条件出しに当初の予定以上の時間を要した。

試料には、シミュレーションと同様に Py 薄膜を用いた。試料を丁字状に製作し、スピン波伝播の様子をブリュリアン光散乱(BLS)を利用した光学装置によって観測した[3]。すると、スピン波が試料中を伝播する様子を観測することに成功したが、スピン波の伝播長が短く、スピン波変換過程を観測するに至らなかった(図 3)。原因としては、装置における高周波電流の損失が大きく十分にスピン波を励起できなかったためだと考えられ、改良を重ねている最中である。

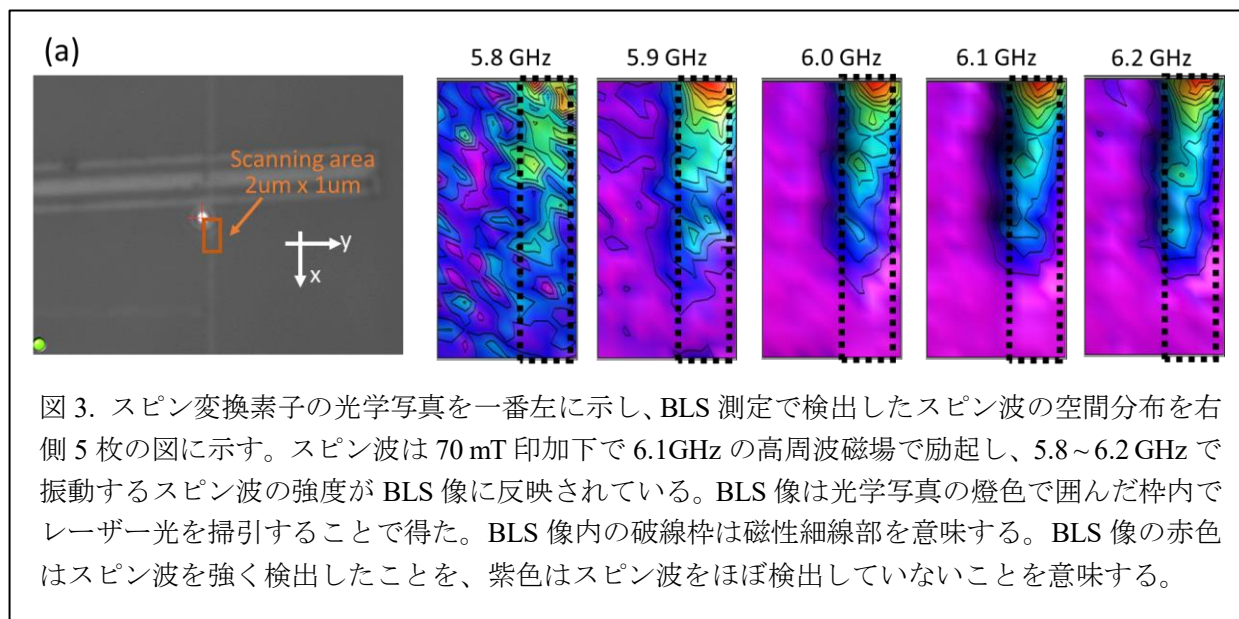


図 3. スピン変換素子の光学写真を一番左に示し、BLS 測定で検出したスピン波の空間分布を右側 5 枚の図に示す。スピン波は 70 mT 印加下で 6.1GHz の高周波磁場で励起し、5.8~6.2 GHz で振動するスピン波の強度が BLS 像に反映されている。BLS 像は光学写真の橙色で囲んだ枠内でレーザー光を掃引することで得た。BLS 像内の破線枠は磁性細線部を意味する。BLS 像の赤色はスピン波を強く検出したことを、紫色はスピン波をほぼ検出していないことを意味する。

次に、派遣先研究室では分子線エピタキシー法(MBE)によって FeCo 薄膜を成膜でき、同手法によって成膜した FeCo 薄膜ではスピン波の緩和が Py と比べてはるかに抑制されることがすでに分かっている[4]。そのため、Py で観測できなかったスピン波変換の観測を期待し、FeCo 薄膜を用いた試料も作製し、BLS によってスピン波伝播の観測を試みた。しかし、原因は未だ明らかになっていないが、スピン波由来の信号を観測できなかった。そこで、派遣先研究室で稼働し始めた時間分解磁気光学 Kerr 顕微鏡(TR-MOKE)を用いてスピン波の観測を試みた。その結果、図 4 のように長波長スピン波によって短波長スピン波が励起される様子を観測することに成功した。しかし、スピン波変換効率の見積もりや、SWC 領域でのスピン波の振る舞いの解析等には未だ至っていないため、今後は、BLS 測定も織り交ぜながら調査し、磁壁駆動が見込まれる程度の短波長のスピン波の励起を観測する予定である。

以上のことから、派遣期間内に、当初予定していたスピン波駆動磁壁移動現象の観測には至らなかったが、スピン波変換による短波長スピン波の励起に成功し、スピン波変換過程の知見も得られたため、本派遣によってスピン波を用いた磁壁移動型メモリーの実現へ貢献できたと考える。

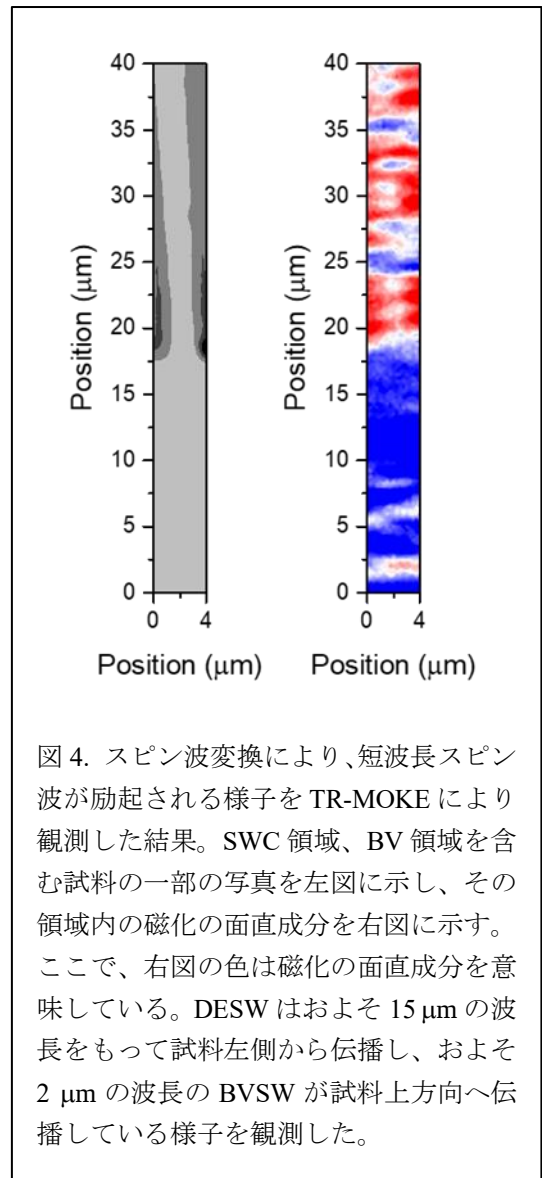


図 4. スピン波変換により、短波長スピン波が励起される様子を TR-MOKE により観測した結果。SWC 領域、BV 領域を含む試料の一部の写真を左図に示し、その領域内の磁化の面直成分を右図に示す。ここで、右図の色は磁化の面直成分を意味している。DESW はおよそ $15\ \mu\text{m}$ の波長をもって試料左側から伝播し、およそ $2\ \mu\text{m}$ の波長の BVSW が試料上方向へ伝播している様子を観測した。

【参考文献】

[1] A. Vansteenkiste, *et al.*, AIP Advances **4**, 107133 (2014). [2]. B.A. Kalikov and A. N. Slavin, J. Phys. C: Solid State Phys. **19**, 7013 (1986). [3] T. Sebastian, *et al.*, Front. Phys. **3**:35 (2015). [4] M. Schoen, *et al.*, Phys. Rev. B **95**, 134411 (2017).