

博士論文 (要約)

光学的に励起されたスピン波の
伝播の制御とイメージング

吉峯 功

近年,電子の電荷に加えてスピンの物理量を利用することによりエレクトロニクスの限界を超える機能や性能を持ったデバイスを創出しようとするスピントロニクスと呼ばれる分野の研究が盛んである.局在スピンの集団的歳差運動であるスピン波は,電子散乱によるジュール熱の発生がないことから,スピントロニクスにおける情報伝送を担う現象として消費エネルギーや発熱の少ない情報処理デバイスへの応用が期待されている.

過去において,実験的なスピン波の発生には局所磁場やスピントランスファートルクと言った電氣的な手段が用いられてきたが,近年では電極やアンテナなどの加工を必要とせず,スポット形状や偏光など多くの量を変更できる光パルスによるスピン波励起が注目されている.特に,逆磁気光学効果の 1 つである逆ファラデー効果を用いたスピン波励起は,非熱的にスピン波を誘起でき,さらに偏光依存性を持つことからより自由度の高いスピン波空間波形制御が期待できる.

過去に行われた逆ファラデー効果を用いたスピン波の励起とその観測の研究においては,励起光スポットの形状により励起されるスピン波の波数ベクトル分布が制御可能であることが示されている.しかしながら,スピン波 2 次元伝播の時間発展を実験的に測定すること,スピン波の初期位相を制御することは行われていなかった.

本研究では,波数と位相を組み合わせた自由度の高いスピン波波形制御に向け,スピン波 2 次元伝播の時間発展を測定する手法として画像取込によるスピン波 2 次元同時測定的手法を開発し,この手法を利用して Air gap を越えるスピン波の観測と解析を行った.また光励起されたスピン波の初期位相を制御する方法を開発し,初期位相の異なるスピン波を干渉させることにより波数ベクトルの制御だけでは実現できないスピン波の一方向伝播が行えることを実験的に示した.

画像取込によるスピン波の 2 次元同時測定

スピン波空間伝播の時間発展を観測するため,スピンの状態を 2 次元的に同時測定する方法を開発した.光励起されたスピン波の観測はポンプ・プローブ法によりプローブ光のファラデー回転を測定することで行われる.これまで行われてきた方法では,プローブ光を 1 点に集光して各点におけるファラデー回転量を測定し,プローブ光をスキャンすることによりスピン波伝播の空間波形を測定していた.しかしこの方法では 1 回の空間波形測定に 10 時間以上を要し,現実的な時間でスピン波伝播の時間発展を観測することができないという問題点があった.

そこで,本研究では CCD カメラを用いてプローブ光のファラデー回転を 2 次元同時測定することで,スピン波空間波形を高速に測定する方法を開発した.本研究で開発した測定法を用い測定したスピン波の空間波形の例を図 1 に示す.図 1 の空間波形を測定するのに要した時間は 3 分程度であり,ポンプ光とプローブ光の間の時間差を変えながら測定を行うことによりスピン波伝播の時間発展を観測することが十分可能となる.本研究では実際にスピン

波伝播の時間発展の観測も行った。

この測定法では、サンプルを透過したプローブ光を検光子に通し、検光子を通過したプローブ光強度の空間分布を CCD カメラで測定した。得られた強度分布の検光子方位に対する依存性から精度よくファラデー回転量を得るための解析法を開発し、1 mdeg オーダーの微小な偏光回転も測定可能であることを示した。

Air gap を越えるスピン波の観測・解析

磁気双極子相互作用によりスピン波が Air gap を越えて伝播することが報告されている。過去の研究では単一波長のスピン波を対象に振幅絶対値空間分布の時間発展と位相シフトが測定されているが、サンプル全体で位相まで含めた複素振幅波形の測定は行われていなかった。本論文の 1. に示した画像取込による 2 次元同時測定を用いれば、複素振幅波形の時間発展を測定することができ、複雑な形状のデバイス中で多くの波長成分が重なったスピン波の伝播を測定することも可能になる。そこで、画像取込による 2 次元同時測定を用い、光励起されたスピン波波束のサンプル端面での反射、及び Air gap を越えての伝播を観測した。

まず、外部磁場によりモノドメインとした希土類鉄ガーネット結晶の端面から 400 μm の位置でスピン波を励起し、伝播したスピン波がサンプル端面で反射する様子を観測した。励起光は結晶上にライン状に集光し、結晶端面の法線方向に伝播するスピン波平面波を励起した。このスピン波の伝播を観測し、励起されたスピン波が端面で反射したスピン波と干渉する様子を確認した。また、スピン波の分散関係と境界条件をもとに伝搬波と反射波の干渉をシミュレートし、実験結果をよく再現することを確認した。

続けて、Air gap を越えてスピン波が伝播する様子の観測を行った。2 つの希土類鉄ガーネット結晶を 40-350 μm の間隔を開けて配置し、一方の結晶の端面から 200 μm の位置でスピン波を励起した。このスピン波の伝播を観測し、スピン波が Air gap を越えて伝播することを確認した。さらに、スピン波の振幅透過率と位相ずれの Air gap 幅依存性を測定し、これらの結果を磁気双極子相互作用を元にしたモデルにより説明した。

スピン波初期位相制御

逆ファラデー効果を用いたスピン波励起では、励起されるスピン波の初期位相は互いに π 異なる 2 通りに限られる。これは、逆ファラデー効果が光パルスの円偏光成分にのみよって生じ、発生する有効磁場の方向が円偏光のヘリシティにより光の \mathbf{k} ベクトルに対し $+\mathbf{k}$ 方向か $-\mathbf{k}$ 方向かの 2 通りに限られており、この有効磁場の方向がスピン波の初期位相を決定しているためである。その一方で、逆ファラデー効果と同じ逆磁気光学効果の一つである逆コットン・ムートン効果を用いれば、光パルスの直線偏光成分が寄与し、生じる有効磁場も理論上偏光方向によりあらゆる方向に生じうる。そこで、直線偏光パルスによるスピ 7 ン波の励起と、偏光方向による初期位相の制御を行った。

直線偏光パルスを希土類鉄ガーネット結晶中に照射してスピン波を励起し、その振幅と

初期位相の偏光方向依存性を調べた。結果、図2のような振幅と初期位相の偏光方向依存性が得られた。初期位相は光パルス偏光方向により約 180 deg の範囲で連続的に変化しており、連続的なスピン波初期位相の制御が実現した。

加えて、実験的に得られたスピン波振幅及び初期位相の偏光依存性の物理的な説明を行った。逆コットン・ムートン効果により生じる有効磁場からスピン変調と、生じるスピン波の振幅と初期位相の理論式を求め、実験結果と比較した。結果、逆コットン・ムートン効果だけでは実験結果を説明することが出来なかった。しかし、磁気異方性変調の寄与を加えることで、実験結果を説明することができた。磁気異方性変調は光励起により磁気異方性に起因する有効磁場が変化する現象で、緩和時間が逆磁気光学効果と比べて長いという特徴がある。結論として、実験的に得られたスピン波振幅と初期位相の偏光依存性は逆コットン・ムートン効果と磁気異方性変調の2つの効果によるものであった。また、逆コットン・ムートン効果と磁気異方性変調の寄与は同程度であった。

干渉によるスピン波の一方向伝播

初期位相の異なるスピン波を干渉させることにより、励起光スポット形状による波数ベクトルの制御だけでは実現できないスピン波の空間波形制御が可能になる。これを示すために、位相の異なる2つのスピン波を干渉させスピン波を一方向に伝播させる実験を行った。

初期位相が $\pi/2$ 異なる2つの波を、波長の1/4の間隔を開けて励起すると、干渉により一方に伝播する波は強め合い、もう一方に伝播する波は打ち消し合うため、一方向に伝播する波を発生させることができる。また、初期位相の差を $+\pi/2$ から $-\pi/2$ に変えると、伝播する方向を反転させることができる。本研究ではこれをスピン波に応用した。

希土類鉄ガーネット結晶上にライン状の励起スポットを2点作り、それぞれに照射された光パルスからスピン波を発生させた。励起光は高いスピン波強度を得るため円偏光とし、初期位相差 $\pi/2$ を得るために一方のスポットに集光される光パルスをもう一方のスポットに集光される光パルスに対して時間差をつけて照射されるようにした。また、一方のスポットに集光される励起光パルスの円偏光ヘリシティを反転させることでスピン波の初期位相を π 変化させ、位相差 $\pi/2$ と $-\pi/2$ の両方を実現できるようにした。そうして発生させたスピン波を干渉させることにより、スピン波を一方向に偏って伝播させることができた。また、励起光の円偏光ヘリシティにより伝播方向を反転させられることを示した。

さらにスポット間隔を変えながら左右に伝播したスピン波強度の比を調べたところ、左に偏って伝播させた時と右に偏って伝播させた時とで強度比が2倍程度異なっていた。これは初期位相差 $\pi/2$ を得るために2つの励起光パルスの照射時間に時間差をつけたため、励起光の左側で干渉する場合と右側で干渉する場合とでそれぞれの波源からのスピン波の強度が異なることが原因であり、そのことを考慮した理論計算により強度比のスポット間隔依存性、および右方向に伝播する場合と左方向に伝播する場合とでの強度比の違いを説明した。

以上により,本研究は光励起されたスピン波の位相制御と干渉,およびスピン波の2次元空間伝播の時間発展を光学的に測定する手段の開発により,スピン波の空間制御とそれを応用した新たな情報デバイスの開拓に向け大きな貢献を果たした.さらに,光磁気相互作用とそれを通じたスピン波発生の物理に対しても,新たな知見を与えた.

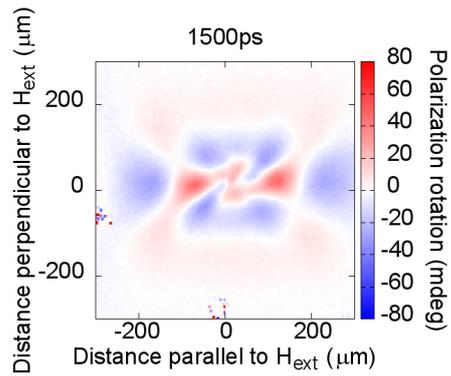


図 1: 画像取込による 2 次元同時測定により測定されたスピン波空間波形.

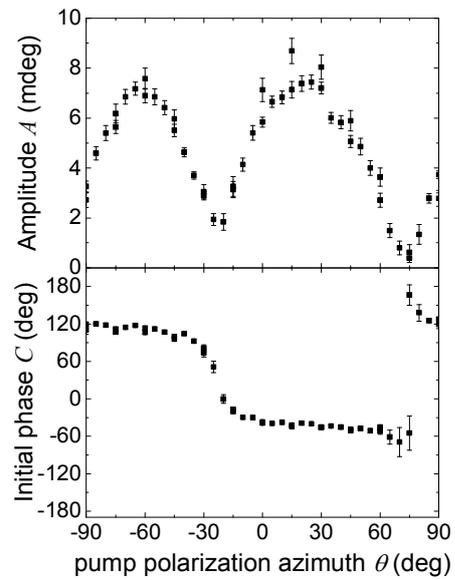


図 2:直線偏光により発生したスピン波の振幅 A (上)及び初期位相 C (下)の励起光偏光方位角 θ に対する依存性.偏光電場が外部磁場の向きと平行なとき $\theta=0$ とした.