

研究終了報告書

「表面弾性波を用いたオプトスピンメカニクス」

研究期間: 2020 年 11 月～2024 年 3 月

研究者: 久富 隆佑

1. 研究のねらい

現代物理学における角運動量の重要性は周知の事実である。原子分子分光や核磁気共鳴、磁性など角運動量の理解が鍵となる物理現象は枚挙にいとまがない。さらに最近では角運動量そのものの情報通信媒体としての利用や、角運動量起因の機能性に着目した研究も盛んに行われており、基礎応用両面において角運動量の理解は重要となっている。

そのような状況の中、存在こそ指摘されてきたもののこれまで実証されてこなかった角運動量が存在する。それがフォノンの持つ角運動量である。質点や剛体回転の持つ角運動量は力学で学ぶところであるが、弾性体中の変形運動にも回転や渦が存在し、それらの持つ角運動量が着目され始めている。特に物体表面に局在するレイリー型の表面弾性波(Surface Acoustic Wave: SAW)は2種類の角運動量を持つことが示唆されている。しかし、それらを明確に観測した報告例はいまだ存在しない。

その SAW の持つ角運動量の実証を目指し、本研究では、物質中で共存する電子スピンや外界から照射可能な光をプローブとして利用することを考えた。光・電子スピン・フォノンで構成されたオプトスピンメカニクス系における各種結合の様子を精密に測定することにより、「フォノン角運動量」および「異種物理系間での角運動量遷移」の実証を目指す。最終的に、本研究を通して得られる新たな知見を統合し、オプティクス・スピントロニクス・メカニクスを融合したオプトスピンメカニクス学理の創出を目指す

2. 研究成果

(1) 概要

研究開始当初、上記のように「フォノン角運動量の実証」ならびに「異種物理系間結合での角運動量遷移」にのみ研究の焦点を当てていた。しかし、進展と共に、既に理解されていると想定していた各物理系間での結合そのものに不明瞭な部分が数多く残されていることが明らかとなっていった。そこで、角運動量遷移の観測のみならず、各結合の正確な把握にも視野を広げ研究を進めていった。

その結果、以下の5つの研究テーマ

- A) SAW の定量光学測定手法(2 種)の確立[1,2]
- B) SAW 共振器を用いた SAW-スピン波結合強度の評価手法の開発(論文執筆中)
- C) 複数種ある SAW-スピン波結合の寄与の割合を特定する手法の開発(論文執筆中)
- D) マグノン誘起ブリルアン散乱における全角運動量保存則の実証(1 年延長制度で論文文化希望)
- E) 光-SAW 間での角運動量遷移の探索

において成果をあげることができた。研究の達成度としては、既に論文文化されたもの、現在論

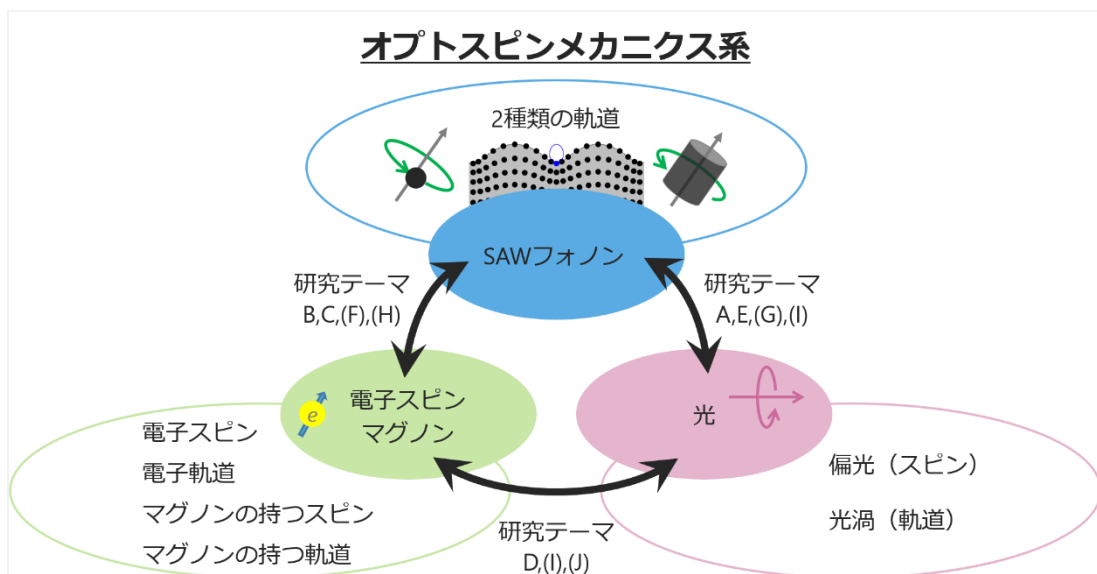


図 1、研究対象としているオプトスピンメカニクス系と角運動量。

文執筆中のもの、そして予備データの取得段階のものと各テーマでそれぞれ異なっているものの、図 1 に示すように、オプトスピンメカニクス系における各種結合について網羅的に研究を進めることができた。

さらに実験用デバイスの試作段階であることから本終了報告書に詳細は明記しないが、

- F) SAW による電子軌道流の励起
- G) フォノン結晶中の特異な SAW モードの光学観測
- H) SAW を用いたスピン波の実効伝搬距離の延伸
- I) 軟X線を用いた SAW-マグノン結合の観測(3 期生石井さんとの共同研究)
- J) マグノン誘起ブリルアン散乱の素過程(エンタングルメント生成)の実証

など、この 3 年半の期間で得た研究成果を土台に、研究が有機的に展開している。

(2) 詳細

研究テーマ A 「SAW の定量光学測定手法の確立」

SAW と他の物理系との結合強度を議論する際、SAW の空間分布を定量的に取得することが必須となる。既にいくつかの光学測定手法は提案されていたものの、どれも複雑な解析を必要としていた。そこで、光のショットノイズをうまく利用した、簡便な定量光学測定手法を 2 種類開発した。

2 種の違いは、SAW が光に与える変化の違いである。SAW が存在する基板表面に、SAW の波長より細く絞った光を照射すると、偏光変調及び光路変調が発現する(図 2(a))。それぞれフレネル反射係数と、単純な反射の法則で説明できることがわかっている。それらの異なる変調を弁別して測定し、その結果と光のショットノイズの情報を組み合わせることにより、SAW の振幅や位相などを定量的に観測することができることを示した。図 2(b)は光路変調測定によって

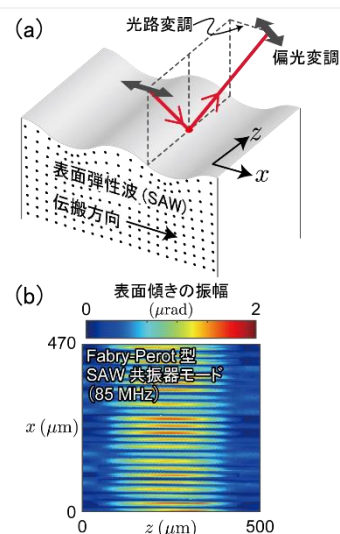


図 2、(a)測定配置図。(b)光路変調を用いたイメージング。

SAW の Fabry-Perot 型共振器を定量光学イメージングした結果である。2 種類の測定手法についてまとめた論文は、それぞれ既に出版されている[1,2]。

研究テーマ B 「SAW 共振器を用いた SAW-スピン波結合強度の評価手法の開発」

SAW と磁性 Ni 薄膜中のマグノン間の磁気弾性結合を介した角運動量遷移を研究するにあたって、まずその結合強度を定量的に評価することが必須となる。既存の手法は全て電気トランスポート測定のみを用いていたため、評価に非常に多くの労力を要していた。また SAW とマグノン間の結合は複数種あることが知られており、実際に磁気弾性結合であるという明確な証拠はこれまで得られていなかった。そこで、研究テーマ A で確立した光学測定手法を取り入れ、さらに電気測定の解析手法を改良することにより、観測された結合が磁気弾性結合であることを実証し、そしてその結合強度の評価手法も確立した。現在論文を執筆中であり、2024 年内の Physical Review B 誌への投稿を目指している。

研究テーマ C 「複数種ある SAW-スピン波結合の寄与の割合を特定する手法の開発」

SAW と磁性薄膜中のマグノン間の結合には、磁気弾性結合、スピン渦結合、そして磁気回転結合の 3 種類があると考えられている。研究テーマ B で用いた Ni 薄膜中では磁気弾性結合が支配的となるが、磁性 Py 薄膜中ではどれも同程度の結合強度となると考えられてきた。SAW と Py 薄膜中のマグノン間の結合を介した角運動量遷移を研究するにあたって、各結合種の寄与の割合を評価することは必須となる。しかし、既存の手法ではその弁別は不可能であった。

そこで、SAW を電氣的に励起するアンテナに工夫を加え、約 500 MHz から 4 GHz までの広いレンジで SAW の電気透過測定を可能にした。それによって、これまで得ることが難しかった SAW-マグノン結合の周波数依存性を一気に取得することが可能となった。さらに新たに導出したモデル関数を用いたフィッティングから、各結合種の寄与の割合が導出できることも示した。現在論文を執筆中であり、こちらも 2024 年内の Physical Review B 誌への投稿を目指している。

研究テーマ D 「マグノン誘起ブリルアン散乱における全角運動量保存則の実証」

マグノンと光の結合によって発現するマグノン誘起ブリルアン散乱において、スピン角運動量が両者の間で遷移し、さらに保存することは、私によって 2019 年に実証された (R. Hisatomi *et al.*, PRL (2019))。そこでは、光もマグノンも軌道角運動量を持たない状況で実証実験を行っていたため、軌道角運動量を考慮する必要はなかった。しかし、実際には光もマグノンも軌道角運動量を持ちうる。そこで、マグノン誘起ブリルアン散乱における全角運動量保存則の実証を目指した。

具体的には、軌道角運動量を持つマグノンモードによるマグノン誘起ブリルアン散乱過程において、入射光と散乱光間で軌道角運動量が増減するような新奇選択則の存在を予想した。そこで、散乱光のスピン角運動量 (偏光)、軌道角運動量、そして周波数をそれぞれ測定することが可能な実験系を構築し、全角運動量保存則に起因した新選択則の実証実験を行った。その結果、明確な選択則が見え始めている。そしてそれは

まさしく全角運動量保存則によって説明がつきそうであることも分かり始めている。既に系統的な実験は終了しており、現在論文執筆中である。

研究テーマ E 「光－SAW 間での角運動量遷移の探索」

SAW と光の間での角運動量遷移の探索を進めてきた。SAW は異なる 2 種類の回転運動を伴いながら伝搬するため(図 3(a))、伝搬方向に直交する z 軸を量子化軸に 2 種類の角運動量分布を持つことが予想される。1 つは各格子点の一方向回転運動であり(図 3(a)左)、この回転運動は SAW の伝搬方向に対して常に後ろ向きに一方向回転する。もう 1 つは変位ベクトル場の渦であり(図 3(a)右)、空間的な分布を持つ。これら 2 種類のフォノン角運動量の存在により、光によるフォノン励起現象に非自明な選択則が表れることと予想している。

実験系の概略図を図 3(b)に示す。LN(リチウムナイオベート)基板表面に対して斜め 45 度から中心波長 532 nm、繰り返し周波数 80 MHz のナノ秒パルスレーザーを照射することにより 80 MHz の SAW を生成させ、 $\pm x$ 方向に伝搬していく SAW フォノンの強度や位相を楕型電極を通して電氣的に検出している。既に SAW の光励起には成功している。なんらかの機構により光と SAW の間で角運動量遷移が存在する場合、入力光の左右円偏光状態に依存して $\pm x$ 方向に伝搬する SAW の励起効率が異なることが予想される。そこでそれを感度良く検出するために、2 つの電極から出力される電圧信号の差分増幅をとり、直線偏光入力時にその電圧が最小(ほぼゼロ)となる光スポット位置に光を固定した。その状況下において、入力光を円偏光状態にし、検出電圧の増加具合およびその位相を観測した。左右円偏光状態に依存して、位相が反転している兆しが見え始めており、 $\pm x$ 方向に伝搬する SAW の生成効率が円偏光状態に依存していることを示し始めている。今後、感度や検出法を改良することにより、SAW と光の間での角運動量遷移の実態に迫っていきたい。

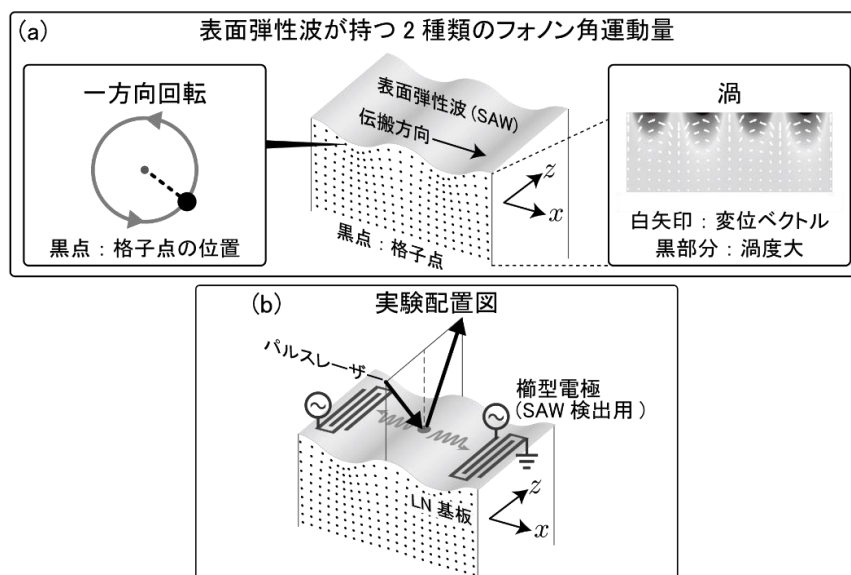


図 3 (a) 表面弾性波の持つ角運動量。(b) 実験系の概念図。

3. 今後の展開

上記のように研究は着実に進展してきたが、最大の目標である SAW フォノン角運動量の実証には至っていない。ただし、SAW そのものの状態を知るために必須となる光学測定手法を独自に開発(研究テーマA)したことにより、試作デバイスを自分たちの手で正確に評価することができ、早いペースで研究上の試行錯誤が可能になっている。その過程の中で最も実証に近いと見ているのが、研究テーマFである。向こう数年以内には、SAW フォノン角運動量が関与する新しい現象が観測にかかるのではないかと期待している。

ひとたび SAW の持つ角運動量の実証、そしてそれに起因する機能性が発見されれば、周辺の基礎研究への応用はすぐに始まると予想することができる。そして社会実装への取り組みもそう遠くない未来に始まって良いのではないかと考えている。なぜならば、これまでの長年の SAW の研究により、SAW は現代の科学技術との親和性が非常に高いことがわかっているからである。例えば、スマートフォンなどに SAW を用いた回路が実装されていることからわかるように、電気制御性が高く、周波数帯域の観点からも情報通信デバイスとの親和性が高い。そして既に設計や作製手法も成熟している。さらに量子情報科学で用いられていることからわかるように、量子極限での制御すら可能である。すなわち、高い効率で発現する角運動量起因の有用な機能性が発見されさえすれば、社会実装を目指す動きが起こることは明らかであろう。

また、オプトスピンメカニクス学理の展望についても述べておきたい。私は一連の研究を、私のバックグラウンドである量子エレクトロニクス実験技術と量子光学理論を持って進めてきている。つまり、現段階において古典的大振幅の領域で実験を行っているものの、その現象を記述するモデルは素過程の形で書き下すことができている。つまり、量子極限を観る実験にスムーズに移行することができるわけである。光はもとより SAW もマグノンも適切な物質中であれば既に量子極限での研究がなされている。それゆえ、将来的にはオプトスピンメカニクス系における異種物理系間結合の素過程の観測を目指したい。さらにそこで得られた知見を体系化することにより、「量子オプトスピンメカニクス学理」の創出を目指したい。

4. 自己評価

研究目的の達成状況

SAW の角運動量の実証にまでは至らなかったものの、それに迫るために必要な光学測定技術を確立することができた。さらに SAW の角運動量実証に向けた多面的な研究テーマを考案し、その準備を着実に進めることができた。そのどれかが近いうちに必ず花開くと楽観的に考えている。

研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

さきがけ研究開始当初から 2 名の学生さんが共に真剣に研究を進めてくれた。研究開始当初は 2 名とも修士課程に在籍していたが、現在は博士課程に進学し、さらに 2 名とも学振特別研究員となっている。また、当さきがけ一期生の長田さんと共に研究テーマ D を、三期生の石井さんと共に研究テーマ I を進めている。領域外では、理研の佐々木遼さん、ICU の山崎歴舟さん、東大の野口篤史さんらと密に連絡をとり、議論をすることにより、新しい研究展開を常に探ってきた。

研究費については、毎年色々な形で予算を増額していただけたことに深く感謝している。その時々で本さきがけ研究を遂行する上で真に必要と考えたものを購入させていただいた。

研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果

本研究では、比較的应用に向いている SAW・磁性薄膜中のスピン波・光などを対象とし、その間での角運動量遷移の実証という独創的かつ挑戦的な目標を掲げてきた。最終目標には至っていないものの、マイルストーンとなる成果を得てきた点に最も意義があると考えている。SAW の光学イメージング技術の確立、SAW-マグノン間結合の同定手法の開発、そしてマグノン誘起ブリルアン散乱における全角運動量保存則成立の兆候取得など新しい科学技術のシーズ創出が既にできつつある。さらに SAW の角運動量の実証および制御が実現した暁には、革新的技術のシーズ創出となることが見込まれる。

当初想定していなかった展開や成果、研究者としての飛躍につながるような成果

研究テーマ A 以外は全て、領域会議での議論や領域外の共同研究者との議論を経て醸成されたテーマである。私自身の飛躍につながる成果として、得られた成果から一つを選ぶことは難しい。全てのテーマ及び成果が、約 300 年間繋がれてきた現代科学の鎖を着実に延伸する有意義なものであると考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数： 2 件（他、2023年以内にPRBに投稿予定の論文が2件）

[1] Kotaro Taga, Ryusuke Hisatomi, Yuichi Ohnuma, Ryo Sasaki, Teruo Ono, Yasunobu Nakamura, Koji Usami, “Optical polarimetric measurement of surface acoustic waves”, *Applied Physics Letters*, **119**, 181106 (2021).

SAW と相互作用した光に加えられた偏光変調を用いて、SAW の定量光学イメージングを行う手法を開発した。偏光変調が発生する機構は、フレネルの反射係数及び動的な表面傾き変化で理解できることも示した。測定結果を用いて SAW の振幅を定量評価する際に、通常必要となる実験系の較正は必要なく、光のショットノイズの情報のみで良い点が他の手法にはない優れた点である。

[2] Ryusuke Hisatomi, Kotaro Taga, Ryo Sasaki, Yoichi Shiota, Takahiro Moriyama, Teruo Ono, “Quantitative optical imaging method for surface acoustic waves using optical path modulation”, *Physical Review B*, **107**, 165416 (2023).

SAW と相互作用した光には、上記の偏光変調以外に光路変調も加えられる。それを用いて、より簡便に SAW の定量光学イメージングを行う手法を開発した。光路変調が発生する機構は、単純な反射の法則で理解できる。この手法の場合も、測定結果を用いて SAW の振幅を定量評価する際に、通常必要となる実験系の較正は必要なく、光のショットノイズの情報のみで良い点が他の手法にはない優れた点である。偏光変調と光路変調を用いた手法を比較すると、表面の複素屈折率の情報を必要としない光路変調を用いた手法の方が扱いやすい。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数： 0 件(特許公開前のものも含む)

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

招待講演

- (ア) Ryusuke Hisatomi, Kotaro Taga, Ryo Sasaki, Yoichi Shiota, Takahiro Moriyama, Teruo Ono
“Quantitative optical imaging methods of surface acoustic waves using optical path modulation or polarization modulation”
Spin Caloritronics XII, Tsukuba, 22th May, 2023
- (イ) 久富隆佐
「表面弾性波を用いたオプトスピンメカニクス研究」
第3回 ナノ磁性研究会、神奈川、6月30日、2023年
- (ウ) Ryusuke Hisatomi, Alto Osada, Kotaro Taga, Haruka Komiyama, Hideki Narita, Shutaro Karube, Yoichi Shiota, Teruo Ono
“Vorticity-inversion Brillouin light scattering by magnons in yttrium iron garnet crystal”
REIMEI-GIMRT workshop, Sendai, 8th August, 2023

受賞

- (エ) 久富隆佐
井上研究奨励賞
公益財団法人 井上科学学術振興財団、2022年2月
- (オ) 多賀光太郎
日本物理学会学生優秀発表賞
日本物理学会領域3、2023年9月