

研究終了報告書

「トポロジカル半金属を用いたテラヘルツ高速エレクトロニクス・スピントロニクス素子開拓」

研究期間: 2020 年 10 月～2024 年 3 月

研究者: 松永隆佑

1. 研究のねらい

テラヘルツ周波数帯($\text{THz}=10^{12}/\text{sec}$)は、可視光($\sim\text{PHz}=10^{15}/\text{sec}$)とエレクトロニクス($\sim\text{GHz}=10^9/\text{sec}$)のちょうど中間に位置しており、この周波数帯で機能する材料の開発は光科学だけでなく次世代エレクトロニクスの情報処理・情報通信技術において非常に重要である。このエネルギー帯では金属におけるフェルミ面近傍の電子状態や、反強磁性秩序におけるスピン波などの低エネルギーモードが特徴的な素励起となる。そのため従来の半導体ベースの非線形光学では扱われなかった物質群が材料として重要である。

そこで本研究では、ディラック半金属およびワイル半金属に代表されるトポロジカル半金属に注目し、線形のエネルギー分散関係やベリー曲率に由来する非線形応答や異常応答をテラヘルツ周波数帯で解明及び制御することを目指す。具体的には、線形のエネルギー分散に由来する非線形光学応答とテラヘルツ周波数変換や、非平衡状態におけるテラヘルツ誘導放出に挑戦する。これらは2次元ディラック電子系である単層グラフェンでも期待されてきた応答であるが、3次元ディラック半金属は単層グラフェンと類似した応答をバルクとして示すため、光との相互作用体積を大きく確保することが可能である。さらに線形のエネルギー分散特有の後方散乱禁制則が強く働くために散乱時間が非常に長いキャリアが現れるため、理想的なディラック電子による機能性を最大限引き出すことが期待される。さらに並行して、ワイル半金属における磁気秩序にも注目する。特に反強磁性体は1 THz 近い周波数でスピンを駆動することが原理的には可能であるため、現在の強磁性体ベースの GHz 帯情報処理よりも2-3桁速い高速スピントロニクスの材料として期待される。しかし磁化が非常に小さいため外場に対する応答も小さく、磁気秩序を情報として読み出すことが困難であった。本研究では、磁化がほぼゼロであるにも関わらず強磁性体並みに巨大な異常ホール効果を室温で示すワイル反強磁性金属 Mn_3Sn に注目する。この異常ホール効果をテラヘルツパルスで高速に検出するとともに、反強磁性磁気秩序を高速に制御することを目指して非平衡ダイナミクスを明らかにする。

これらの研究を通して、室温動作することを前提に、3次元トポロジカル半金属の性質を最大限活用したテラヘルツ帯非線形デバイス材料としての機能性を開拓することを最終的なねらいとする。

2. 研究成果

(1) 概要

ディラック半金属 Cd_3As_2 におけるテラヘルツ高速応答を調べるため、10-45 THz 帯において複

素光学伝導度スペクトルを精密に計測できる広帯域分光システムを構築し、さらにこの帯域で周波数可変かつ位相安定の狭帯域高強度パルス光源を開発した。30 THz の周期的な光外場によって励起すると、31 THz 帯で負の伝導度が現れて誘導放出による利得が発生し、一方で 28 THz 付近では吸収が増大する鋭い分散構造を示すことを発見した。これは周期的外場によって作られたフロッケサブバンド間で共鳴する誘導レイリー散乱と呼ばれる非線形光学効果が、プラズマ振動のシフトに伴って巨大な応答として現れたものであることを明らかにした。またこの特性によって、室温の半金属に赤外光を照射するだけで無散逸なスローライトを広帯域に生成できるという可能性を提示した。

さらに励起光を円偏光に変えることで、時間反転対称性の破れによる異常ホール効果をテラヘルツパルスのファラデー回転を通して調べる実験に成功した。理論的には 3 次元ディラック半金属がフロッケ・ワイル半金属状態を作ることによる異常ホール効果の発現が予測されてきたが、本研究で異常ホール伝導度の符号にまで注目して解析した結果、フロッケ・ワイル半金属状態のベリー曲率によって生じる異常ホール効果よりも、バイアス電圧の下で光電流が発生する「電場誘起インжекション電流」と呼ぶべき現象の寄与の方が支配的になることを明らかにした。さらにこの円偏光誘起異常ホール効果の実験を半導体スピントロニクス研究へ適用させることで、GaAs においてスピン偏極したキャリアが示す逆スピンホール効果をテラヘルツパルスの偏光回転として観測した。実験で得られたスピンホール伝導度スペクトルは理論計算と定量的にも定性的にもよく一致し、スピンホール伝導度の周波数特性を初めて計測する実験に世界に先駆けて成功した。

またワイル反強磁性体 Mn_3Sn が示す巨大な異常ホール効果に注目し、テラヘルツパルスを利用して異常ホール伝導度を 40 fs の時間分解能で超高速ダイナミクスを調べる実験を行った。これは従来の磁性体の異常ホール効果ダイナミクスの研究の分解能を 3 桁上回る、初めての超高速時間分解測定である。この時間スケールでは電子系のみを 700 K ほどまで急加熱して異常ホール伝導を計測することが可能である。こうして超高速ダイナミクスを調べることで、 Mn_3Sn の異常ホール効果が外因性では説明できず内因的機構であることを示した。この手法はほかの磁性体にも広く適用できる可能性が期待される。

(2) 詳細

研究テーマ A 「ディラック半金属のテラヘルツ非線形応答とフロッケエンジニアリング」

3 次元ディラック半金属 Cd_3As_2 薄膜が示す赤外域の機能性に注目し、テラヘルツ帯及びマルチテラヘルツ帯における超高速ダイナミクスを調べた。バンド内遷移とバンド間遷移のクロスオーバーが生じるマルチテラヘルツ帯(10-45 THz)において 28 fs の時間分解能で複素光学伝導度スペクトルを精密に計測できる時間領域分光システムを構築し、近赤外光でキャリアを光励起した際の非平衡ダイナミクスを調べた。横波電場及び縦波電場の吸収を表す光学伝導度スペクトル及び損失関数スペクトルを詳細に観測したことで、光励起キャリアがもともとドープされているキャリアと散乱しあって約 0.5 ps の時間をかけて熱平衡化すること、強励起すると散乱確率の上昇に伴って熱平衡化が促進されること、緩和過程において強励起のみ Auger 再結合がわずかに現れることなど、これまでにない精度でキャリアダイナミクスの詳細を明らかにすることに成

功した。

さらに光励起によるプラズマ振動数の上昇に伴って、20 THz 付近の屈折率が 80%以上もの巨大な減少を示すことを明らかにした。このような巨大な屈折率変化そのものは半導体においてこの低い周波数帯で普遍的に生じるものであるが、このような帯域でバンド間遷移が生じることがギャップレスなディラック半金属の特徴である。この特性を活用して、以下のようにフロッケエンジニアリングに関連する巨大誘導レイリー散乱が生じることを明らかにした。

フロッケ理論に基づいて周期的な光外場によって物質の状態を制御するフロッケエンジニアリングの研究が現在盛んに行われているが、そのほとんどが理論研究である。実験としては角度分解光電子分光でフロッケ状態が直接観測されているが、フロッケ状態を形成した時に応答関数がどのように変化するかといった基本的なことから理解されていないのが現状である。そこで本研究では、周期 30 THz の強い光電場によって Cd_3As_2 を励起した際の光学伝導度の変化を 12-45 THz 帯で広帯域に観測する実験を行った。その結果を図 1(左)及び(中央)に示す。励起周波数 30 THz のわずかに高周波側ではブリーチングにより吸収が減少し、そのまま負の値をとって利得が発生することがわかった。一方、励起周波数 30 THz のわずかに低周波側では吸収ピークが出現し、全体として鋭い分散型のスペクトルが現れることを見出した。このような振る舞いはこれまでの理論計算では予測されていなかったが、我々は非線形光学分野で知られる現象論的なモデル計算と、現実的なバンド構造に基づいた微視的な理論計算の双方から、この実験結果を再現することに成功した。その結果を図 1(右)に示す。この応答は、フロッケ状態間で共鳴する誘導レイリー散乱に対応している。誘導レイリー散乱は 3 次の非線形光学応答であり、通常は応答関数に与える影響は大きくないが、この帯域ではプラズマ周波数の上昇に伴って巨大な屈折率変化が生じるため、それに比例して巨大な応答として現れることを明らかにした。

さらにこのような巨大な誘導レイリー散乱が生じた結果、屈折率が非常に急峻に変化して群屈折率が 300 近い大きな値をとるため、この応答に注目すると、フォトニクス分野で盛んに研究されているスローライト生成へ応用できる可能性を提示した。従来のスローライト研究では、冷却原子系や絶縁体の不純物準位などによる電磁誘導透明化を利用する研究が多く、試料を極低温まで冷却してコヒーレンスの高い環境を用意する必要があった。しかし本研究では、半金属を用いて室温で無散逸なスローライト生成が広帯域に実現できる可能性があるという興味深い成果が得られた。

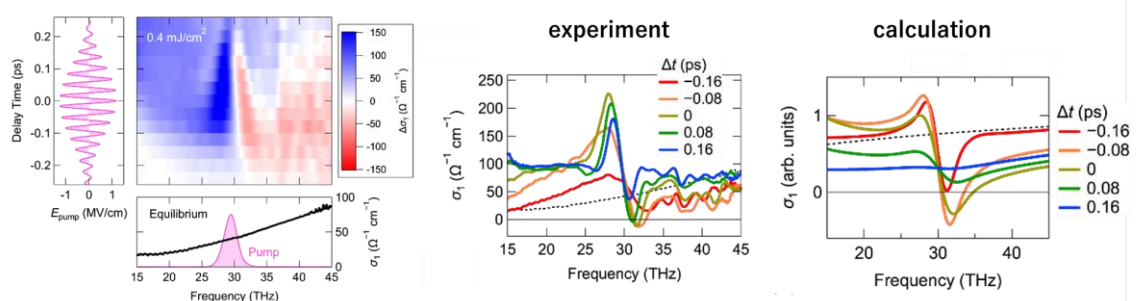


図 1 弱励起($25 \mu\text{J}/\text{cm}^2$)及び強励起($250 \mu\text{J}/\text{cm}^2$)したときの差分光学伝導度スペクトル及び損失関数スペクトルの時間発展。光励起中の時間帯のデータは緑色の背景で示した。

さらにこの周期的な光を円偏光にした時に生じる異常ホール効果に注目して実験を行った。時間変化する外場の影響を解析するフロケエンジニアリングの研究からは、ディラック半金属を円偏光下に置くと、波動関数のトポロジーが変化してフロケ・ワイル半金属と呼ばれる状態になり(図 2(b))、磁場なしで電流の軌道が曲がる異常ホール効果を発現することが予想されている。しかし円偏光下で異常ホール効果を引き起こすメカニズムはほかにも多数存在する。本研究ではディラック半金属 Cd_3As_2 を対象に、パルス円偏光を照射した際の異常ホール伝導度をテラヘルツ時間領域分光によって計測した。その結果、従来予想されていたフロケ・ワイル半金属の寄与よりも、バイアス電圧の下で光電流が発生する「電場誘起インJECTION電流」と呼ぶべき現象の寄与が支配的になることを明らかにした(図 2(c), (d))。この現象は光を吸収する物質では普遍的に起こるにも限らず、これまではほとんどよく理解されておらず、精密な実験と理論を組み合わせる異常ホール伝導度の符号という点からはっきりと実証したのは本研究が最初である。異常ホール効果の形でフロケ・ワイル半金属を観測するには、光吸収を抑制できる系や実験条件を用意しなければならないことが強く示唆される。

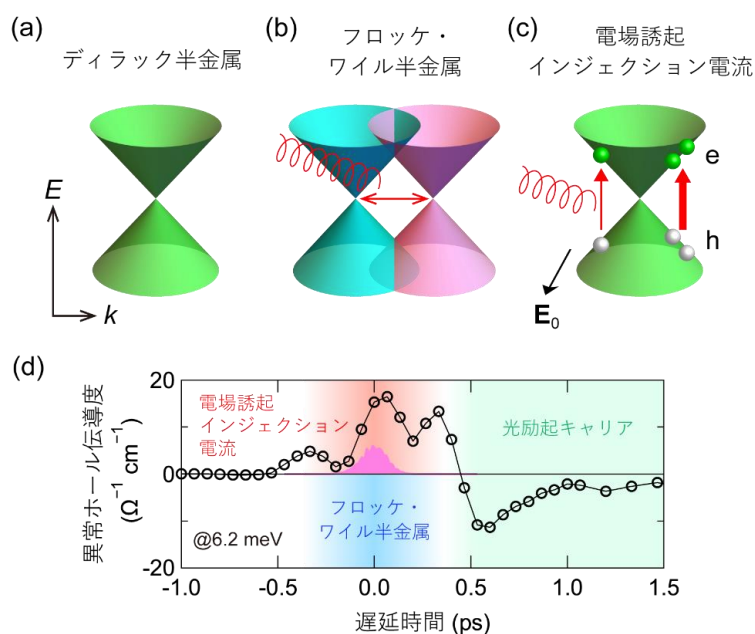


図 2 (a)ディラック半金属のバンド構造。(b)フロケ・ワイル半金属。円偏光下でディラック点が二個のフロケ・ワイル点に分裂する。(c)電場誘起インJECTION電流。電場の下で円偏光を照射すると電場と直交する向きに偏った運動量分布の電子と正孔が励起される。(d)異常ホール伝導度の遅延時間依存性。

研究テーマ B 「テラヘルツ高速スピントロニクス」

前項で説明した円偏光誘起異常ホール効果の研究をさらに拡張し、代表的な直接遷移型半導体 GaAs におけるスピントロニクス研究に適用させる実験を行った。円偏光パルスによってスピン

偏極したキャリアを注入し、テラヘルツパルス電場で駆動することで、スピン流から横電流へと変換される逆スピンホール効果が生じる。その横電流による電場放射によって試料を透過したテラヘルツパルス電場の偏光が回転するため、その偏光回転角と楕円率を計測することで、スピンホール伝導度スペクトルを計測することが可能になると考えられる。

室温でバルク GaAs に対して円偏光ポンプ-テラヘルツ偏光回転プローブ分光測定を行うことで、正孔と電子のスピン緩和時間(それぞれ 200 fs と 80 ps)を反映した偏光回転信号を観測した。正孔が緩和した後で電子のスピンホール伝導度スペクトルを定量的に評価することが可能になり、実験結果は理論計算と定量的にも定性的にも非常によく一致することが分かった。これはスピンホール伝導度の周波数特性を初めて計測した研究であると考えられ、内因性、サイドジャンプ、スキュー散乱のそれぞれによるスピンホール伝導度の周波数特性を定量的に評価することに成功した。

研究テーマ C 「ワイル反強磁性体の異常ホール効果と超高速応答」

磁性を持つ金属に対して電場をかけると、電場と垂直な方向に電流が流れる、つまり異常ホール効果が生じる。かつては大きな磁化を持つ強磁性体ほど大きな異常ホール効果が生じると現象論的に理解されてきたが、近年では物質が持つトポロジカルな性質と異常ホール効果が深く関連することが明らかになった。波数空間で実効的な磁場として働くベリー曲率によって駆動される異常ホール効果は、散乱とは無関係に起こり、バンド構造から一意的に決定されるため、内因性異常ホール効果と呼ばれている。一方で、不純物との散乱によって生じる異常ホール効果も存在し、こちらは外因性異常ホール効果と呼ばれる。

本研究で注目するワイル反強磁性体 Mn_3Sn は、磁化がほぼゼロの反強磁性体であるにも関わらず、特異な磁気秩序により強磁性体並みに巨大な異常ホール効果を室温で示すという特徴がある。この異常ホール効果の振る舞いを調べ、テラヘルツ周波数帯での非平衡応答を理解するために、我々は異常ホール伝導度をテラヘルツパルスのファラデー回転によって観測し、40 fs の時間分解能で超高速ダイナミクスを調べる実験を行った。これは従来の磁性体の異常ホール効果ダイナミクスの研究の分解能を 3 桁上回る、初めての超高速時間分解測定である。

一般に光パルスを物質に照射すると電子が励起され、電子が高速に散乱しあつて高温電子状態が作られて、その後で電子格子相互作用によって電子系から格子系へとエネルギーが移動し格子温度が上昇する。電子系と格子系が相互作用するまでの 1 ピコ秒以下の僅かな時間に異常ホール伝導を測定すれば、格子系はネール温度(430 K)より十分低温に抑えたままで電子系のみを 700 K ほどまで急加熱して異常ホール伝導を計測することが可能である。異常ホール伝導の起源が内因性であれば、その DC 極限の値はベリー曲率を電子占有状態で積分した量で決まるため、高温電子状態においては電子分布の変化によって異常ホール伝導度が大きく変化すると考えられる。実際に実験を行うと、光励起後 100fs 以下の時間スケールで超高速に異常ホール伝導度が 40%もの減少を示し、内因的機構の理論から予測される値とよく整合した。一方でそのとき縦伝導度はほとんど変化しないこともわかった(図 3(a)(b))。これらの結果は、散乱によるドルーデ応答で記述される縦伝導と、トポロジカルなベリー曲率で決まる異常ホール伝導が互いにほぼ独立であることを意味しており、 Mn_3Sn の異常ホール効果が外因性では

説明できず内因的機構であることを明確に示している。

2 温度モデルによるシミュレーションから、本研究の実験条件では、 Mn_3Sn では光照射直後に電子温度が 700 K 近く上昇する一方、格子温度はほぼ変化していないと考えられる。すなわち超短光パルス照射後 0.1 ps ほどの超高速時間領域では、バンド構造そのものは変化せず、電子分布関数のみが増加しているものと考えられる。その場合内因性異常ホール伝導度の電子温度依存性は久保公式に基づく微視的理論に基づいて比較的簡単に計算することが可能であり、実験結果と計算結果が良い一致を示すことが分かった。これは光パルス照射による異常ホール効果の超高速変化が内因性機構でよく説明できることを意味している。このことから異常ホール効果の起源を明らかにするうえで超高速ダイナミクスを調べるのが有効であるという新たな手法を開拓することに成功した。

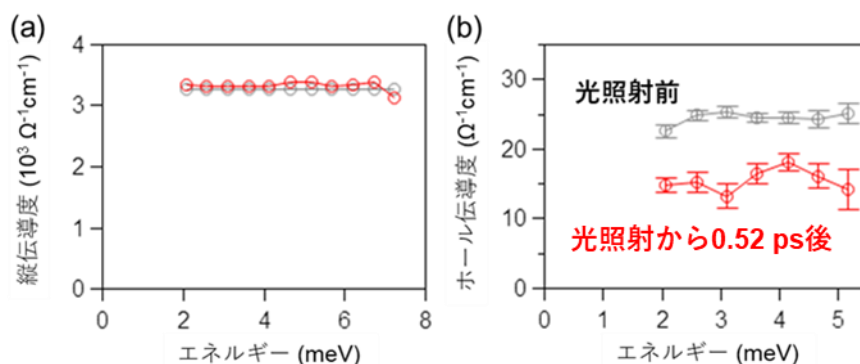


図 3 光励起(フルーエンス $500 \mu\text{J}/\text{cm}^2$)してから 0.52 ps 後の縦伝導度(a)及びホール伝導度(b)のスペクトル(実部)。

3. 今後の展開

本研究によってディラック半金属が示すテラヘルツ周波数帯の非線形応答やワイル反強磁性体が示す異常ホール効果の高速テラヘルツ応答が明らかになった。特に円偏光誘起異常ホール効果の起源を調べる手法としてテラヘルツパルスを使った実験手法が本研究によって確立されたことは非常に大きな意義がある。円偏光によって非接触にスピン偏極したキャリアを注入し、そのキャリアが示すホール伝導を測定することによって、スピン角運動量を電流に変換する逆スピンホール効果が表れる。円偏光パルス励起とともにテラヘルツパルスを使うことでスピンホール伝導度の周波数特性やダイナミクスを詳細に調べることが実現したため、ベリー曲率に由来する内因的機構やサイドジャンプ、スキュー散乱といった外因的機構を区別することができる。同様の手法はスピントロニクス材料として期待される様々な物質に対して適用可能であると考えられ、スピン輸送現象に関わる様々な物性パラメーターをこの手法によって定量的に決定することが期待される。ほかにもバレー自由度や軌道角運動量の自由度を使っても同様の実験が可能であると考えられ、キャリアが持つ様々な自由度とエレクトロニクスを組み合わせるスピントロニクス、バレートロニクス、オービトロニクス研究のいずれにおいても本実験手法が波及することが期待される。スピントロニク

ス研究は基礎研究の発展が実社会応用に直結する研究分野であり、逆スピンホール効果はスピン流検出の基本的手段であるため、その物性パラメーターを明らかにできる本研究の成果はスピントロニクス研究を介して社会実装に大きく関与する可能性が期待される。

4. 自己評価

・研究目的の達成状況

当初掲げた研究目的の中では、トポロジカル半金属を用いたテラヘルツ高次高調波発生の効率化や反強磁性体の磁化反転について研究途上のものも含まれるが、当初の計画になかった観点の研究も含めてトポロジカル物質が示すテラヘルツ帯の非線形応答や異常応答について幅広く研究を進めた。結果的に上記の研究成果欄に書ききれないほどの多くの研究成果を上げることができ、トップジャーナルに多くの論文を掲載することができた。国内外からの反響も大きく、多くの学会やシンポジウムで招待講演の依頼を受けた。さらにさがけ研究期間内に知り合った領域関係者と今後に向けた共同研究計画がいくつも進行している。

・研究の進め方(研究実施体制及び研究費執行状況)

研究代表者が主宰する研究室においてスタッフや学生の協力を得て研究を推進した。その結果、スタッフ3名(助教1名、研究員2名)がそれぞれ本研究に関連した論文を主著で発表し、それぞれ次のアカデミックキャリアへと栄転したほか、多くの学生が国内外の学会発表において賞を受賞するなど大いに活躍の場を与えることができた。研究費のほとんどを当初の計画通りYb型再生増幅レーザーの購入に充てたことで、非常に高安定な分光計測システムを開発することに成功したほか、増額申請によって光学クライオスタートやレーザービーム安定化機構を増設し、研究を加速させることができた。これらは研究代表者が所属する東京大学物性研究所の共同利用及び共同研究にも活用されている。

・研究成果の科学技術及び社会・経済への波及効果

「今後の成果」欄にも記述したとおり、円偏光誘起異常ホール効果をテラヘルツ周波数帯で観測する実験手法を確立できたことが今後の科学技術や社会・経済への波及効果という点で最も大きなものになったと考えている。物質中のキャリアは電荷以外にもスピン、軌道、バレーといった自由度を持ち得るため、その自由度を生かしてエレクトロニクス技術を飛躍的に発展させることが期待されており、本研究はその自由度の輸送現象とそれに関わる物性パラメーターを定量的に評価する手法を確立した重要な成果となったと考えている。

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: 9件

1. Yuta Murotani*, Natsuki Kanda*, Tatsuhiko N. Ikeda, Takuya Matsuda, Manik Goyal, Jun Yoshinobu, Yohei Kobayashi, Susanne Stemmer, and Ryusuke Matsunaga, "Stimulated Rayleigh Scattering Enhanced by a Longitudinal Plasma Mode in a Periodically	1.
---	----

Driven Dirac Semimetal Cd_3As_2 ", Physical Review Letters 129, 207402 (2022).	
ディラック半金属に対して 30 THz の一定周期で振動する外場を与えながら、12-45 THz の非常に広い帯域で複素応答関数を精密に時間分解計測する実験を行った。31 THz 付近で負の吸収(利得)が生じるとともに、28 THz 付近で吸収ピークが現れるという鋭い分散型構造を示すことを発見した。これはプラズマ振動数の変化によって赤外域の屈折率が巨大に変化することに伴った誘導レイリー散乱として説明できることを見出した。	
2. Takuya Matsuda, Tomoya Higo, Takashi Koretsune, Natsuki Kanda, Yoshua Hirai, Hanyi Peng, Takumi Matsuo, Naotaka Yoshikawa, Ryo Shimano, Satoru Nakatsuji, and Ryusuke Matsunaga, "Ultrafast Dynamics of Intrinsic Anomalous Hall Effect in the Topological Antiferromagnet Mn_3Sn ", Physical Review Letters 130, 126302 (2023).	2.
テラヘルツパルスのファラデー回転を利用して、磁性体の異常ホール効果を 40 fs の分解能で時間分解計測する実験を実現した。これを用いて光励起した反強磁性体 Mn_3Sn のダイナミクスを調べたところ、異常ホール伝導度の高速変化を観測した。これは光励起直後に格子系やスピン系がほぼ変化しないまま電子温度だけが急上昇したことによるものであり、異常ホール効果の微視的起源を超高速ダイナミクスの観点から明らかにできることを示した。	
3. Yuta Murotani, Natsuki Kanda, Tomohiro Fujimoto, Takuya Matsuda, Manik Goyal, Jun Yoshinobu, Yohei Kobayashi, Takashi Oka, Susanne Stemmer, and Ryusuke Matsunaga, "Disentangling the Competing Mechanisms of Light-Induced Anomalous Hall Conductivity in Three-Dimensional Dirac Semimetal", Physical Review Letters 131, 096901 (2023).	3.
3 次元ディラック半金属に円偏光を当てた時に生じる光誘起異常ホール効果をテラヘルツパルスによって観測することに成功し、円偏光照射中と照射後に質的に異なる異常ホール伝導度が生じることを発見した。特に円偏光照射中の信号について、その符号にまで注目して理論的な解析を行い、異常ホール効果の起源が理論的に予測されたフロック-ワイル状態によるものではなく、電場誘起インжекション電流が支配的であることを示した。	

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 0 件(特許公開前のものは件数にのみ含む)

(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)

1. **松永隆佑**, 神田夏輝, 松田拓也, “ワイル反強磁性体 Mn_3Sn の室温テラヘルツ異常ホール効果”, 日本磁気学会第 229 回研究会「テラヘルツ領域におけるスピントロニクス研究の現状と展望」、オンライン開催、2020 年 11 月 11 日
2. **Ryusuke Matsunaga**, Natsuki Kanda, and Takuya Matsuda, "Efficient terahertz frequency conversion in a Dirac semimetal Cd_3As_2 and terahertz anomalous Hall effect in a Weyl antiferromagnet Mn_3Sn ", The 44th Annual Conference on MAGNETICS in Japan,

Symposium "Electromagnetic responses in wideband from GHz to visible light region" (Online), Dec. 14th 2020

3. **Ryusuke Matsunaga**, "Terahertz nonlinear responses and harmonic generation in topological semimetals", CATS workshop on Nonlinear Electromagnetic Dynamics of Topological Semimetals (Online), Jan. 21th, 2021
4. **Ryusuke Matsunaga**, "Efficient terahertz harmonic generation in Dirac and Weyl semimetals", CEMS Topical Meeting Online "Topology in photon-matter interaction" (Online), Feb. 19th, 2021
5. **松永隆佑**, 神田夏輝, 松田拓也, "トポロジカル半金属を用いたテラヘルツ高速エレクトロニクス・スピントロニクス", 令和3年度テラヘルツ応用システム研究会、オンライン開催、2021年8月5日
6. **松永隆佑**, "テラヘルツ光で引き出す・創る物質のトポロジーと機能性", CREST/さきがけ「トポロジー」領域連携公開シンポジウム「トポロジカル科学の現在と未来」、オンライン開催、2021年9月28日
7. **Ryusuke Matsunaga**, Natsuki Kanda, Yuta Murotani, and Takuya Matsuda, "Terahertz and multiterahertz nonlinear responses in 3D Dirac semimetal Cd₃As₂", 9th Russia-Japan-USA-Europe Symposium on Fundamental & Applied Problems of Terahertz Devices & Technologies (RJUSE-TeraTech 2021) (Online-Sendai hybrid), Nov. 2nd, 2021
8. **Ryusuke Matsunaga**, Natsuki Kanda, Yuta Murotani, and Takuya Matsuda, "Nonequilibrium dynamics of broadband response functions in Dirac semimetal Cd₃As₂ studied by multiterahertz spectroscopy", VIII Ultrafast Dynamics and Ultrafast Bandgap Photonics (Online), Nov. 17th, 2021
9. **松永隆佑**, 神田夏輝, 松田拓也, 室谷悠太, "3次元トポロジカル半金属によるテラヘルツ高速エレクトロニクス・スピントロニクス", シンポジウム「テラヘルツ科学の最先端 VIII」、講演番号 Inv-4、オンライン開催、2021年11月24日
10. **松永隆佑**, 第13回放射光学会若手研究会「先端的レーザー分光測定技術の進化とその応用」, "3次元トポロジカル半金属におけるテラヘルツ高速エレクトロニクス・スピントロニクス" オンライン開催、2021年12月15日
11. **松永隆佑**, "3次元トポロジカル半金属によるテラヘルツ高速エレクトロニクス・スピントロニクス", 日本学術振興会光電相互変換第125委員会第257回研究会「光とトポロジー」、オンライン開催、2021年12月17日
12. **Ryusuke Matsunaga**, "Ultrafast terahertz and multiterahertz spectroscopy for a nonequilibrium Dirac semimetal Cd₃As₂ with periodic driving by light", Max Planck Quantum Matter Seminar (Online), Mar. 10th, 2022
13. **松永隆佑**, 松田拓也, "トポロジカル Weyl 反強磁性体 Mn₃Sn におけるテラヘルツ高速スピントロニクス", 電気学会調査専門委員会第11回「光・熱・電気との相互作用を活用した高機能磁気デバイス技術調査専門委員会」、オンライン開催、2022年6月10日
14. **Ryusuke Matsunaga**, Natsuki Kanda, Yuta Murotani, "Ultrafast terahertz spectroscopy for Floquet engineering of 3D Dirac semimetal Cd₃As₂", The 15th Asia Pacific Physics

Conference (APPC15) (Online), Aug. 22nd, 2022

15. **Ryusuke Matsunaga**, "Terahertz anomalous Hall effect dynamics in Weyl antiferromagnet", 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science (Tokyo-Online), Nov. 8-11, 2022
16. **松永隆佑**, “トポロジカル半金属におけるテラヘルツ非線形輸送と非平衡現象”, 日本物理学会 2023 年春季大会、講演番号 23pE2-1、オンライン、2023 年 3 月 23 日
17. **Ryusuke Matsunaga** and Takuya Matsuda, "Terahertz anomalous Hall effect dynamics in Weyl antiferromagnet", Summit of Materials Science 2023 and GIMRT User Meeting 2023 (Sendai, Japan), Nov. 20-22, 2023
18. **松永隆佑**, “テラヘルツ分光の基礎と固体の高速ダイナミクス研究”, 表面界面スペクトロスコピー2023 研究会、東大物性研、2023 年 12 月 20 日
19. **松永隆佑**, 室谷悠太, “偏光分解テラヘルツ分光で調べる光誘起 Hall 電流の起源”, シンポジウム「テラヘルツ科学の最先端 X」、東北電通研、2023 年 12 月 21 日
20. **松永隆佑**, “テラヘルツ偏光計測で調べるトポロジカル半金属の非線形・非平衡現象”, 学会創立 50 周年記念レーザー学会学術講演会第 44 回年次大会、日本科学未来館、2024 年 1 月 19 日
21. **Ryusuke Matsunaga**, "Dynamical aspect of Hall conductivity studied by terahertz spectroscopy", Workshop "Japan-Germany Workshop on Trends in Quantum Materials and beyond" (Würzburg, Germany), Feb. 26-28, 2024
22. **松永隆佑**, “トポロジカル半金属におけるテラヘルツ高速輸送と非平衡現象”, 日本物理学会 2024 年春季大会、講演番号 19pD1-11、オンライン、2024 年 3 月 19 日
23. **松永隆佑**, “テラヘルツ光で調べる高速電荷輸送と機能性開拓”, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会 量子エレクトロニクス研究会 50 周年記念シンポジウム、東京都市大学、講演番号 24p-71A-8、2024 年 3 月 24 日

【受賞】

1. 藤本知宏, 「バルク GaAs のスピン選択光励起によるテラヘルツ異常ホール伝導ダイナミクスの観測」、日本物理学会 (領域 5) 学生優秀発表賞、2022 年 9 月 13 日
2. Takuya Matsuda, "Extreme nonequilibrium states in strongly-correlated Weyl antiferromagnet studied by terahertz spectroscopy", 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science Poster Award, 2022 年 11 月 11 日
3. Yuta Murotani, "Light-induced anomalous Hall effect in 3D Dirac semimetal Cd₃As₂ revealed by THz spectroscopy", 2nd International Symposium on Trans-Scale Quantum Science Poster Award, 2022 年 11 月 11 日
4. 中川真由莉, 「フリーランニングパルスレーザーに適用可能な非同期サンプリング法におけるジッター補正法の開発」、シンポジウム テラヘルツ科学の最先端 IX 最優秀若手研究者賞 2022 年 12 月 6 日
5. Tomohiro Fujimoto, "Observation of Terahertz Spin Hall Conductivity Spectrum in Bulk GaAs at Room Temperature", IRMMW-THz Best Student Presentation Award Finalist, 2023 年 9 月 20 日

6. 白井亜美、「直線偏光及び円偏光の光励起による 室温シリコンの異方伝導ダイナミクスと Hall 伝導の研究」、第 34 回光物性研究会奨励賞、2023 年 12 月 16 日
7. 小川宏太郎。「2 色逆回り円偏光マルチテラヘルツパルス発生技術の開発」、シンポジウム テラヘルツ科学の最先端 X 優秀学生発表賞、2023 年 12 月 21 日

【プレスリリース】

1. 「東大、「赤外光を照射した半金属における巨大屈折率分散の発見と機構解明」について発表」日本経済新聞 2022 年 11 月 11 日
2. 「東大ら、異常ホール効果の変化を 0.1ps 以下で観察」オプトロニクスオンライン 2023 年 3 月 22 日