

令和 5 年 5 月 22 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K03817

研究課題名（和文）量子ホール系における巨大熱電応答の探索

研究課題名（英文）Exploration of huge thermoelectric response in the quantum Hall systems

研究代表者

遠藤 彰 (Endo, Akira)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：20260515

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：量子ホール系の巨大な熱電応答を探索するための測定法を開拓した。磁場中での熱伝導率の測定に応用し、電気伝導率との予測される関係を確認した。高磁場領域では、エッジ状態による熱流失の効果を明らかにした。コルビノ型の試料の無次元熱電性能指数 ZT の解析的表式を導出し、100を超える大きな値を取り得ることを明確にした。1次元平面超格子の熱電テンソル、熱伝導率テンソルの解析的表式を導出し、磁場により温度勾配が曲げられる効果によりこれまでの実験結果の解釈を改める必要があることを明らかにした。熱電効果の理解に深く関わるホール抵抗の整合性磁気振動の初の観測に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開拓した磁場中2次元電子系の熱伝導率測定手法は電気抵抗の測定に通常用いられる測定装置のみを使用するため、比較的容易に測定を行うことが可能で、今後の量子ホール系の熱電変換や熱輸送現象の発展に大きく寄与することが出来ると考えている。人工的に異方性を導入した2次元平面超格子の研究は、従来あまり考慮されてこなかった、磁場により温度勾配方位が曲げられる効果の探索の有力な研究手段となる。コルビノ型試料の量子ホール系のもつ高い熱電変換効率は、将来的には効率的な廃熱利用に応用され、エネルギー問題・環境への負荷軽減に資する可能性を秘めているものである。

研究成果の概要（英文）：We have developed experimental methods for investigating the huge thermoelectric response of the quantum Hall systems. With the methods, we measured the thermal conductivity and confirmed the expected relation to the electrical conductivity. In a high magnetic-field regime, we experimentally identified the thermal dissipation through the edge states. We deduced analytic formulas for the thermoelectric figure of merit ZT for a Corbino sample, which revealed the possibility of having a large value exceeding 100. We also deduced analytic formulas for the thermoelectric and thermal conductivity tensors in unidirectional lateral superlattices, which required the previous interpretation of the experimentally observed commensurability oscillations (CO) to be altered owing to the tilting of the temperature gradient by the magnetic field. We have also succeeded in the first observation of the CO in the Hall resistivity, which is closely related to the thermoelectricity of the system.

研究分野：低次元電子物性

キーワード：熱電効果 量子ホール系 熱電性能指数 コルビノ型試料 3オメガ法 2次元電子系 1次元平面超格子 整合性磁気振動

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

量子ホール系(磁場中の2次元電子系)の熱電現象および熱輸送現象の研究は、電気的性質や光学的性質の研究と比較すると比較的未開拓の分野であった。熱起電力の測定結果の報告例の多くは、熱流はフォノン(格子)が運び、電子-フォノン相互作用により起電力を生じる“フォノンドラッグ”に因るもので、電子系の性質に敏感な電子の“拡散”に因る熱起電力の観測例は、筆者らの研究を含めごく少数であった。特にコルビノ型試料にて理論的に予言されていた非常に大きな拡散熱起電力の観測に成功していたのは筆者らのみであった。量子ホール系、特にコルビノ型試料の高い熱電変換効率に着目した研究は無かった。また、2次元電子系の熱伝導率測定の報告例も無磁場のもののみで、磁場中のは筆者の知る限りまだ無かった。

2. 研究の目的

量子ホール系にて大きな熱電応答が得られる機構への理解を深めることが本研究の目的である。そのために、量子ホール系の熱伝導率測定法を確立し、熱電変換効率の指標である無次元熱電性能指数を求め、2次元電子系の電子温度の被測定対象に影響を与えない測定法を開拓し、また、熱電現象に対する量子ホールエッジ状態の効果を明らかにする。

3. 研究の方法

熱伝導率測定法の開拓は、抵抗の3倍高調波を利用する 3ω 法と呼ばれるバルク試料について用いられてきた手法を量子ホール系へ応用することにより行う。無次元熱電性能指数 ZT は熱伝導率と電気伝導率・熱起電力の測定結果から求めることができる。また、電気的応答と熱電的応答の応答時間の差を巧みに利用して電気的な測定のみで直接 ZT を求めるハーマン法と呼ばれる、やはりバルクで用いられる手法の量子ホール系への応用も試みる。理論的に大きな ZT 値が得られる機構を理解するために、試料や測定パラメータに対する依存性が明確になる ZT の解析的表式を導出する。2次元電子系とは静電的にのみ結合する表面ゲートを用い、電子系の加熱・電子温度の測定を行う手法を開拓する。ホールバー型とコルビノ型との試料形状の違いに依存する熱電現象の差異を調べ、前者にのみ見られる量子ホールエッジ状態の寄与を抽出する。

2次元電子系面内での温度勾配や熱流の方位に関する知見を得るため、2次元電子系に人工的な異方性を導入した系である1次元平面超格子の熱起電力、熱伝導率に着目し、整合性磁気抵抗振動を利用した探索法を開拓する。

4. 研究成果

(1) 抵抗の3倍高調波を利用した電子温度・熱伝導率測定法の開拓

通常の抵抗測定ではノイズ低減のためにロックインアンプを用いる。試料に低周波の交流電流 $I(\omega) = I_0 \sin(\omega t)$ を流し、同周波数の電圧 $V(\omega)$ を検出することにより抵抗 $R(\omega) = V(\omega)/I(\omega)$ を求める。電流値 I_0 がある程度大きいと、ジュール加熱 $\propto I_0^2$ により電子系の温度 T_e は上昇し 2ω で振動する。電圧の3倍高調波成分 $V(3\omega)$ を検出することによって得られる抵抗 $R(3\omega) = V(3\omega)/I(\omega)$ は、温度振動に因る抵抗の変化分を反映する。抵抗の温度依存性がわかっているならば $R(3\omega)$ からジュール加熱に応じた温度変化を知ることが出来る。これを用い熱伝導率を測定する手法が 3ω 法としてバルク試料では用いられているが、本研究ではその手法の量子ホール系への適用を試みた。温度依存性が明確にわかっている Shubnikov-de Haas 振動の振幅を用い、 I_0 に応じた温

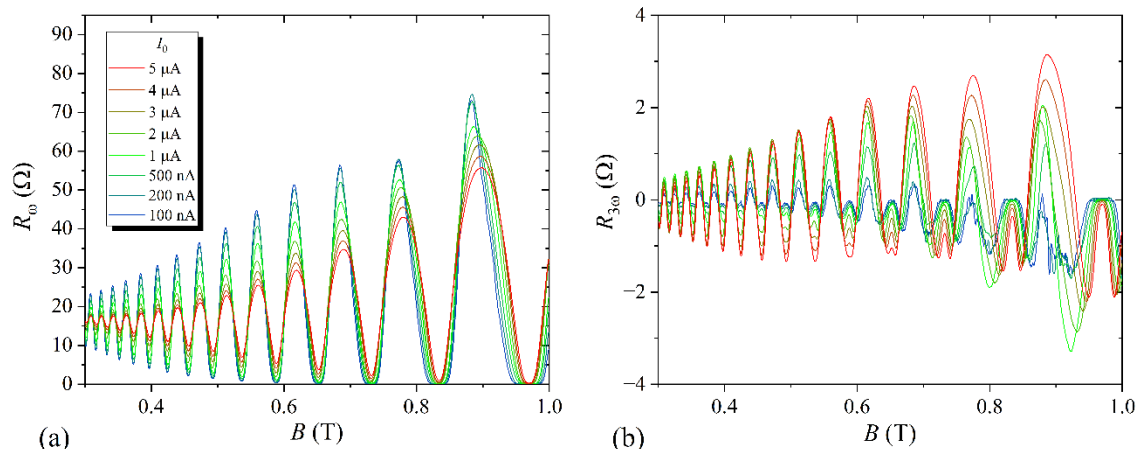


図1. ロックインアンプで測定した通常の抵抗(a)と3倍高調波成分(b)

度変化を求めた。さらに、ジュール熱による熱流入と、電極への拡散による熱流失および電子-フォノン相互作用による格子系への熱流失のエネルギー収支を考慮することにより、熱伝導率を導出した。別途求めた電気伝導率から Wiedemann-Franz 則で求めた熱伝導率と良い一致を示すことを明らかにした。磁場下の2次元電子系の熱伝導率を求めた筆者の知る限り初の例である。通常の抵抗測定に用いる測定装置のみを使用し簡便に測定出来るので、今後も幅広い応用が見込まれる。

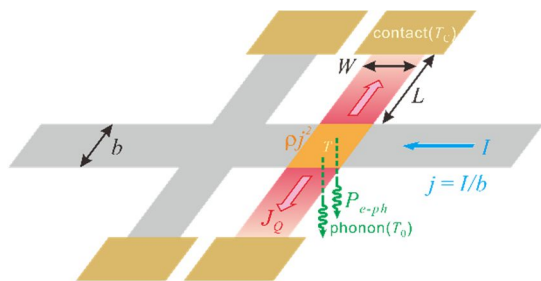


図2. ホールバー型試料でのエネルギー収支の概略

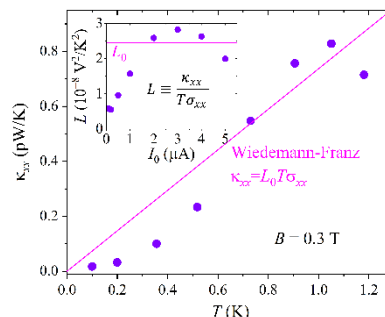


図3. 測定した熱伝導率の温度依存性

(2) 量子ホール領域でのエッジ状態経路の熱流失の観測

上記(1)の手法を、Shubnikov-de Haas 振動が見られる低磁場領域から、量子ホールプラトーが明瞭となる高磁場領域へと拡張した。抵抗から温度への変換には、別途加熱が無視できるような小電流で測定した抵抗値の温度依存性を利用した。低磁場領域と比較すると高磁場領域ではジュール熱に応じた温度上昇が抑制されることが判明した。高磁場領域では試料端付近に無散逸のエッジ状態が明瞭に形成されるようになる。このエッジ状態は熱流の伝播性にも優れていると考えられる。温度上昇の抑制はエッジ状態を経由した熱流失の効果であると解釈することが出来る。

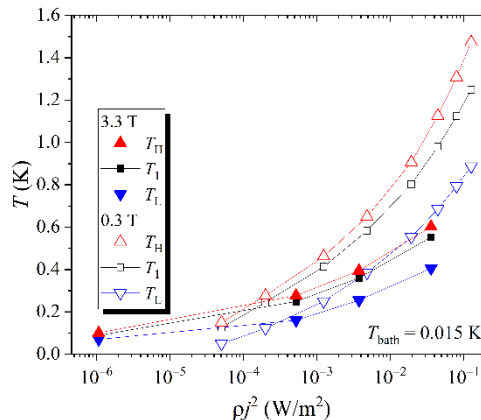


図4. ジュール熱に対する温度上昇

(3) 量子ホール系コルビノ型試料の熱電性能指数

無次元熱電性能 ZT は、熱電変換効率を表す代表的な指標である。熱起電力が大きいほど、また熱伝導率が小さいほど ZT は大きくなる。ホール電圧が短絡され効力をなくし、エッジ状態の効果を排除出来るコルビノ型試料では、大きな ZT 値をもつことが期待出来る。本研究では、コルビノ型の量子ホール系試料の ZT を、自己無撞着ボルン近似で得られた絶対零度での電気伝導率を出発点として計算し、多重対数関数を用いた解析的表式を得ることが出来た。典型的な2次元電子系試料のパラメータを代入すると、量子ホールプラトー領域にて100を超える大きな ZT 値が得られることを明らかにした。

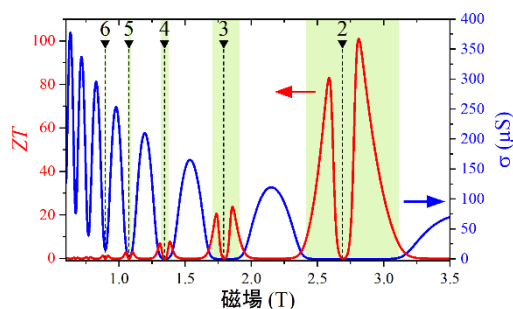


図5. ZT と ZT の計算結果

(4) 熱電効果測定に適したコルビノ型試料の開発

コルビノ型試料の熱電効果測定にこれまで筆者らは円状試料の外周近くに円周状のコプレーナ型導波路を配し、高周波を用いて2次元電子系を局所的に加熱することにより同心円状の温度勾配を導入するという手法をとってきた。高周波は電子系の電気伝導率が大きいほど良く吸収されるので、電気伝導率がゼロとなる量子ホールプラトー領域では加熱は困難となる。そこで導波路の代わりに表面ゲートを配し、このゲートに交流電圧を加えることで電子系を加熱する試料を作製し、熱起電力が測定出来ることを確認した。また、この表面ゲートと2次元

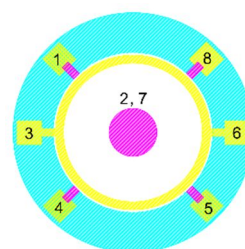


図6. 外周近くに表面ゲート(黄色)を配したコルビノ型試料

電子間の静電容量の温度依存性を利用することにより、2次元電子系の電子温度測定が可能なことも確認した。表面ゲートは通常のオーミック電極や量子ポイントコンタクト・量子ドットを用いた手法と異なり、拡散による熱流失を伴わないため、被測定対象への影響を抑えた温度測定が可能となる。

また、中心部と外周外にオーミック電極を配しただけの標準的なコルビノ型試料を用い、交流電流-電圧応答の周波数依存性を詳細に調べ、ハーマン法を量子ホール系へ応用する試みも行っている。

(5) 1次元平面超格子の熱電テンソル・熱伝導率テンソルの異方性

2次元電子系に弱い1次元周期的ポテンシャルを導入した1次元平面超格子は、人工的な異方性を電子系に導入した典型的な系である。磁場を印加すると電子はサイクロトロン運動をするが、サイクロトロン直径とポテンシャル周期との整合性により、様々な物理量が磁場に対して振動する。本研究では、熱起電力と熱伝導率の整合性磁気振動に注目した。これまでに考慮されてこなかった小角散乱の効果を取り込み、絶対零度での電気伝導率を出発点として、整合性磁気振動の振動成分の解析的表式を導出した。典型的な試料パラメータを代入すると、熱起電力テンソルの振動成分 δS_{ij} ($i, j = x, y$)は、これまでの理論と異なり大きな異方的な対角 (Seebeck) 成分を持つこと ($\delta S_{xx} \neq \delta S_{yy}$)、2つの非対角 (Nernst) 成分は大きく異なり ($\delta S_{xy} \neq -\delta S_{yx}$)、 δS_{xy} が突出して他の成分よりも大きい ($|\delta S_{xy}| \gg |\delta S_{xx}|, |\delta S_{yy}|, |\delta S_{yx}|$) ことが明らかになった。ここで、 x 方向は1次元周期の主軸方向、 xy 平面は2次元電子系がある平面と定義した。

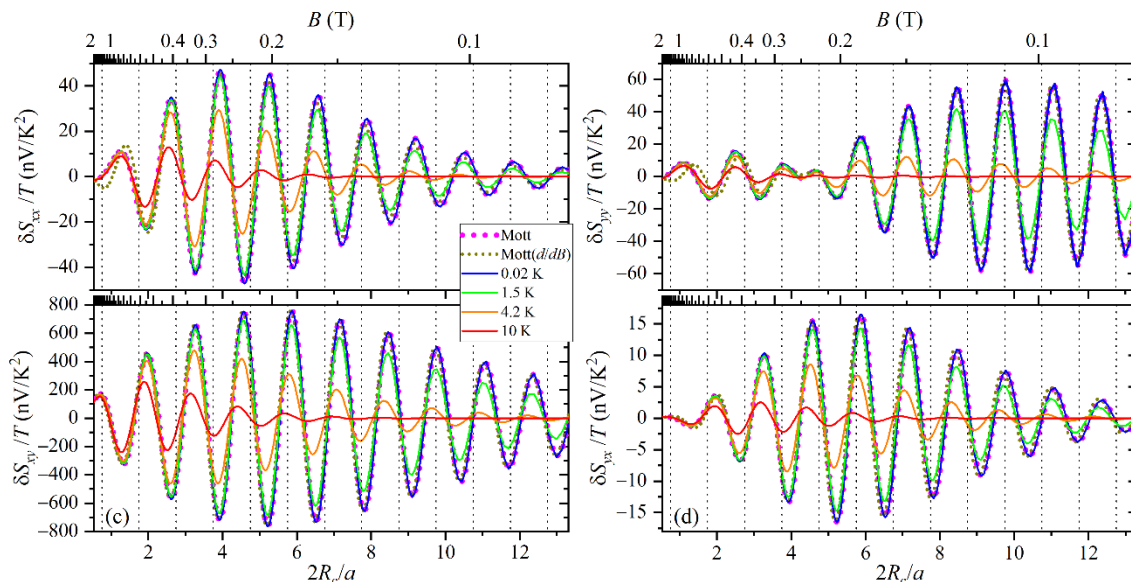


図7. 熱電テンソル各成分の整合性磁気振動

以上の結果からこれまでに報告された熱起電力の整合性磁気振動の測定結果の解釈は修正が必要であることが判明した。すなわち、実験で報告されているのは x 方向の熱起電力なので、観測された振動は δS_{xx} であると解釈されていたが、上記大小関係と磁場中では温度勾配が方位を変えることを考慮すると、実際に観測されているのはほとんどが δS_{xy} であると解釈すべきであることが明らかになった。

また、1次元平面超格子の整合性磁気振動は2次元電子系内での電子温度分布の方位を調べ、また電子の散乱機構に関するより精密な情報をもたらす有力な実験手段となり得ることを明らかにした。

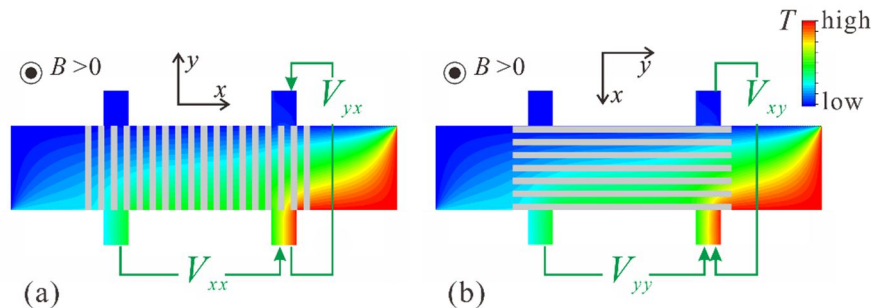


図8. 磁場中温度勾配と1次元平面超格子：主軸方向 (x 方向) がホールバーと平行の場合(a)と直交した場合(b)

(6) 1次元平面超格子におけるホール抵抗の整合性磁気振動の観測

対角抵抗に対する整合性磁気振動(ワイス振動)は30年程度前に実験的に発見され、直ちに理論的解釈が与えられた。初期の理論で既に抵抗の対角成分のみならず非対角成分(ホール抵抗)にも整合性振動が現れることが予言されていたが、その振幅が非常に小さいことからこれまで実験的に報告されることは無かった。本研究では、微小振動を効率良く抽出する手法を考案し、ホール抵抗の整合性磁気振動の初の観測に成功した。小角散乱が振動振幅を減衰させる効果は対角成分よりもさらに強く、従って振動振幅はこれまでの理論的予言と比較してもさらに非常に小さくなることも明らかにした。

ホール抵抗の整合性磁気振動は、熱電テンソル対角成分の整合性磁気振動と密接に関連し、上述の異方性($\delta S_{xx} \neq \delta S_{yy}$)の出現は、これまでの理論よりはるかに小さなホール抵抗の振動振幅に帰することが出来ることが判明した。

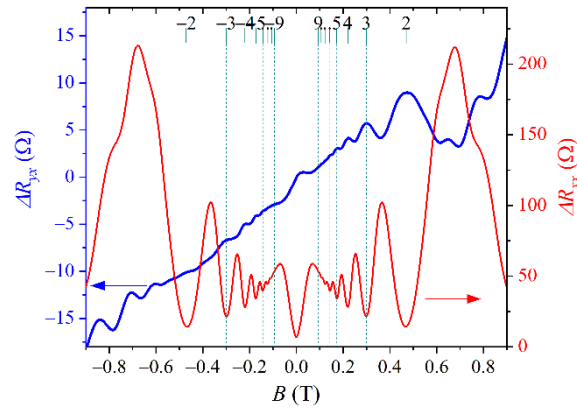


図9. 振動成分を抽出した対角抵抗及びホール抵抗の磁気振動

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

| | |
|---|----------------------------|
| 1. 著者名 Endo Akira, Katsumoto Shingo, Iye Yasuhiro | 4. 巻 103 |
| 2. 論文標題 Commensurability oscillations in the Hall resistance of unidirectional lateral superlattices | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Physical Review B | 6. 最初と最後の頁 235303-(1-8) |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.103.235303 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名 Endo Akira, Katsumoto Shingo, Iye Yasuhiro | 4. 巻 132 |
| 2. 論文標題 Joule heating and the thermal conductivity of a two-dimensional electron gas at cryogenic temperatures studied by modified 3 method | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Applied Physics | 6. 最初と最後の頁 104302-(1-10) |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0104518 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名 Endo Akira, Katsumoto Shingo, Iye Yasuhiro | 4. 巻 92 |
| 2. 論文標題 Anisotropic Behavior of the Thermoelectric Power and the Thermal Conductivity in a Unidirectional Lateral Superlattice: A Typical Anisotropic System Exhibiting Two Distinct Nernst Coefficients | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan | 6. 最初と最後の頁 044705-(1-12) |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.92.044705 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------|
| 1. 著者名 Endo Akira, Katsumoto Shingo, Iye Yasuhiro | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Effect of Joule heating in the quantum Hall systems probed by the third harmonics of the ac resistance | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Accepted for publication in JPS Conference Proceedings | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 遠藤彰, 勝本信吾, 家泰弘 |
| 2. 発表標題 温度に依存する現象の抵抗3倍高調波を利用した高感度測定 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Akira Endo, Shigo Katsumoto, Yasuhiro Iye |
| 2. 発表標題 Detection of the heating of a two-dimensional electron gas by the third harmonics of the resistance |
| 3. 学会等名 24th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (online) (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 遠藤彰、勝本信吾、家泰弘 |
| 2. 発表標題 1次元平面超格子における熱起電力整合性磁気振動の異方性：ホール抵抗整合性振動振幅との関係 |
| 3. 学会等名 日本物理学会 2022年 第77回年次大会（オンライン） |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Endo Akira, Katsumoto Shingo, Iye Yasuhiro |
| 2. 発表標題 Effect of Joule heating in the quantum Hall systems probed by the third harmonics of the ac resistance |
| 3. 学会等名 29-th Int. Conf. Low Temperature Physics (LT29), Sapporo 2022 (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 遠藤彰、橋本義昭、勝本信吾 |
| 2. 発表標題 量子ホール系コルビノ型試料の熱電性能指数 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会（東京工業大学） |
| 4. 発表年 2022年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
| | | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
| | |