

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01698

研究課題名(和文) ナノ加工を用いた1次元量子ナノワイヤー熱電変換素子の巨大ゼーベック効果機構解明

研究課題名(英文) Study for giant Seebeck coefficient using one-dimensional single crystal bismuth quantum nanowire by nano-fabrication

研究代表者

長谷川 靖洋 (Hasegawa, Yasuhiro)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：60334158

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：大きなアスペクト比を持つ光ファイバー作製技術にヒントを得て、石英ガラステンプレート中に封入された単結晶Bi製ナノワイヤー熱電変換素子の開発を進めている。また本研究グループによって開発されたナノ加工技術によって、Biナノワイヤー熱電変換素子側面など任意の場所に数～数十nm角の局所ナノ加工電極を取り付けることが可能となり、4端子測定など精密な電気物性測定が可能となった。これを受け、その物性値のワイヤー直径依存性測定ならびにモデル計算より、巨大ゼーベック効果の実証とそのメカニズムを物理的な見地から解明していく。

研究成果の学術的意義や社会的意義

有効質量が小さなBi材料を採用したナノワイヤーでは、ワイヤー直径100nm以下で量子効果の導入が確実視されている。しかし精度の高いゼーベック係数測定のためには、ミリスケール長さを実現する必要があり、巨大ゼーベック効果を実証する1次元量子ナノワイヤー熱電変換素子の作製ならびにその物性測定の困難さに直面している。また量子効果を基にした理論モデル提唱から25年経過した現在、実験的なアプローチから巨大ゼーベック効果実証が学術的に問われている。

研究成果の概要(英文)：We have successfully fabricated a single-crystal bismuth nanowire with several-ten- to several-hundred-nm diameter and more than 1mm-length embedded in a quartz template. And a technique using nano-fabrication has also been developed to make local electrodes at the side and edge of the nanowire. So, we can measure the transport coefficients of the nanowire like resistivity, Seebeck coefficient, and Hall coefficient. We will indicate the giant Seebeck coefficient from experimental results using the four-probe method.

研究分野：熱電変換

キーワード：ナノワイヤー 1次元量子 ナノ加工 輸送係数測定

1. 研究開始当初の背景

超低炭素社会・省資源社会を目指したクリーンエネルギー需要が高まっている中、熱(温度差)から電気への直接エネルギー変換を可能にする熱電変換現象に着目している。そのエネルギー変換効率は、ゼーベック係数 S [V/K], 抵抗率 ρ [Ωm], 熱伝導率 κ [W/mK] の3つ物性値(熱電パラメータ)を用いた性能指数 $z=S^2/(\rho\kappa)$ [K^{-1}] に、絶対温度 T [K] を乗じた無次元性能指数 zT を用いて見積もられている。現状では、 $zT\sim 1$ 程度、エネルギー変換効率は約 10% であり、日本のエネルギー事情を考える上で ZT 向上の実証研究は特段の推進が求められている。ゼーベック係数 S は状態密度 $g(E)$ とエネルギー E の傾きに比例することから、 zT を飛躍的に向上させるため熱電変換素子の構造を変える、つまり超格子やナノワイヤー構造などを採用し量子効果を取り入れ低次元状態密度を導入することで、飛躍的なゼーベック係数の向上が達成できるという理論的な指針が得られている。量子効果の導入は zT 向上の戦略手法として国内外で広く展開されている。ここで、2次元材料よりも1次元材料で大きな改善が期待されており、従来よりも2桁大きな -1mV/K 以上の巨大ゼーベック効果の発現が理論モデルより示唆されている。

有効質量が小さな Bi 材料を採用したナノワイヤーでは、ワイヤー直径 100nm 以下で量子効果の導入が確実視されている。しかし確度の高いゼーベック係数測定のためには、ミリスケール長さを実現する必要があるため、巨大ゼーベック効果を実証する1次元量子ナノワイヤー熱電変換素子の作製ならびにその物性測定に直面している。また量子効果を基にした理論モデル提唱から25年経過した現在、実験的なアプローチから巨大ゼーベック効果実証が学術的に問われている。

2. 研究の目的

大きなアスペクト比を持つ光ファイバー作製技術にヒントを得て、石英ガラステンプレート中に封入された単結晶 Bi 製ナノワイヤー熱電変換素子の開発を進めている。また本研究グループによって開発されたナノ加工技術にとって、Bi ナノワイヤー熱電変換素子側面など任意の場所に数~数十 nm 角の局所ナノ加工電極を取り付けることが可能となり、4端子測定など精密な電気物性測定が可能となった。これを受け、その物性値のワイヤー直径依存性測定ならびにモデル計算より、巨大ゼーベック効果の実証とそのメカニズムを物理的な見地から解明していくことが本研究の目的である。

3. 研究の方法

3次元から1次元状態へのワイヤー直径依存性の連続性の観点から、ワイヤー直径の違いによる輸送係数の挙動の違いに着目し、以下の項目・手法で研究を遂行した。

■ 1次元量子 Bi ナノワイヤー熱電変換素子の開発

適切な作製条件(ガラス軟化炉温度、印加圧力など)の下、ナノ空孔直径を 500nm ~ 20nm まで連続的に変化させた石英ガラステンプレート作製技術を確立した。この石英ガラステンプレートを利用した高圧圧入法による1次元量子 Bi ナノワイヤー熱電変換素子の作製を行った。さらに、ワイヤー端部を研磨し、高分解能電子顕微鏡で観察することでワイヤー直径を、X線回折を用いて長さ方向の結晶方向を決定した。

■ ナノ加工による局所電極形成

ワイヤー直径が 20nm、ワイヤー長さが 1mm であると単純に内部インピーダンスが 10M Ω を越え、適切な物性測定は極めて困難となる。そこで、これまでビーム精度 $\pm 10\text{nm}$ のデュアル FIB で培った独自のナノ加工技術を用いて、測定するワイヤー直径に合わせて電極間インピーダンスが 10k Ω 以下になるよう、電極間距離を決定し、FIB を用いた局所ナノ加工電極を形成する。

■ 1次元量子 Bi ナノワイヤー熱電変換素子の物性値ワイヤー直径依存性測定

ナノ加工を施した測定サンプルを用い、ワイヤー直径・結晶方向などに着目しながら 4.2~300K の温度領域で交流4端子法による物性測定を行い、そのワイヤー直径依存性から巨大ゼーベック効果の実証を行っていく。ワイヤー片端面に取り付けたヒーターに熱拡散率の観点から数 mHz 程度の非常に遅い熱振動を発生させ、石英ガラステンプレ

レート(S)の長さ方向に沿った一様な温度勾配(dT/dL)を発生させる。差動熱電対により測定したワイヤー両端面間($L \sim 1\text{mm}$)の温度差 ($\Delta T \sim$ 最大 1K) から、電極間距離 L_s ($\sim 100\ \mu\text{m}$)に発生する温度差 ΔT_s を比例関係から見積もる($\Delta T_s = dT/dL \times L_s \sim$ 最大 0.1K)。温度差と同位相で電極間 L_s に発生する熱起電力 V_s を、入力抵抗 $10\text{G}\Omega$ 以上のデジタルマルチメータを用いて実時間計測する交流ゼーベック係数 ($S = V_s / \Delta T_s$) 測定を採用することで、高抵抗・低電圧計測に対処していく。複数本の電極が側面に取り付けられていることから、キャリア密度・移動度を評価するためにホール係数の物性評価も可能となる。

■キャリアの散乱プロセスを考慮したモデル計算

ゼーベック係数をはじめとする物性値のワイヤー直径依存性を、理論モデルから検証していく。Biはバンド構造、フェルミ面構造が分かっているので、有効質量方程式を数値的に解くことでバンド構造の離散化や半金属-半導体転移の影響を知ることができる。また、1次元状態密度導入や実験から得られる抵抗率・移動度などを用いて、より実験に即したモデル計算が可能となる。特に3次元状態であっても、それぞれのキャリアの散乱プロセスによってバルク材料とは異なる輸送係数の挙動を示す可能性があることから、ボルツマン方程式によるモデル構築を行った。

4. 研究成果

3次元モデルで記述できるワイヤー直径 500nm 以上のナノワイヤー熱電変換素子を用いて、これまで主に2端子法やナノ加工を用いた4端子法による抵抗率・磁気抵抗・ホール係数をはじめとする物性測定に加えて、4端子法によるゼーベック係数測定に世界で初めて成功している。また本研究グループが提案した平均自由行程制限モデルやキャリア散乱プロセスが音響フォノン散乱からの移行を考慮に入れ、輸送係数の温度依存性の定性的・定量的な解釈を行ってきた。

現在、3次元状態から1次元状態の遷移を確認するため、量子化が期待されるワイヤー直径

216nm の1次元量子ナノワイヤー熱電変換素子にFIBによるナノ加工を施し(図1)、抵抗率・磁気抵抗・ホール係数・ゼーベック係数の同時測定に成功している。そのゼーベック係数温度依存性を図2に示す。

Biは半金属であり、同数の電子・ホールキャリアが存在し、電子有効質量がより小さいため、電子移動度(μ_n)はホール移動度(μ_p)よりも大きい($\mu_n > \mu_p$)。2つの極性のバランスによって、3次元状態のワイヤー直径 1.9 μm のBiマイクロワイヤーでは、図2に示すように全ての温度領

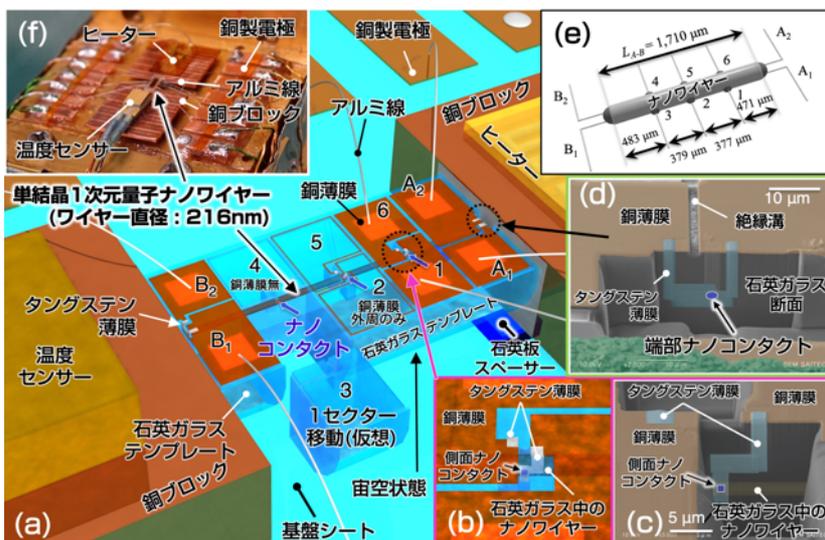


図1：1次元量子ナノワイヤー熱電変換素子の (a)測定配位全体像の模式図、側面の電極接合の(b)模式図、(c)電子顕微鏡写真、(d)ワイヤー端部への電極接合、(e)電極の配置図、(f)測定サンプルの外観図

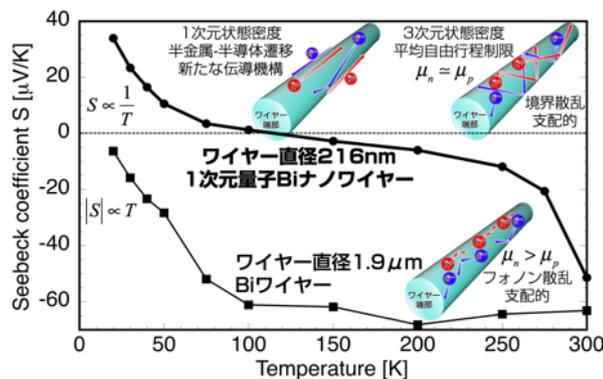


図2：Biワイヤーのゼーベック係数温度依存性とその物理メカニズムの概念図

域で負のゼーベック係数温度依存性を示し、バルク Bi と同様の温度依存性を示す。一方、ワイヤー直径 216nm の場合、ワイヤー直径方向長さ(d)よりもキャリア平均自由行程(λ)が大きくなり($\lambda > d$)、ワイヤー中の電子・ホール移動度はワイヤー直径によって制限・決定される($\mu_n \propto d, \mu_p \propto d$)。300K ではバルク Bi のゼーベック係数の絶対値より小さな値を示し、温度低下と共に両移動度は同程度となり($\mu_n \cong \mu_p$)、結果としてゼーベック係数が 0 に漸近することが従来モデルより理解できる。しかし、100K 以下になると $S \propto 1/T$ の温度依存性が得られ、フォノンドラック効果が作用しにくいナノワイヤー系で、20K において +33.9[$\mu\text{V}/\text{K}$] と従来の数倍以上の巨大ゼーベック係数を示し、3次元モデルと比較して、その符号・大きさなど全く異なる実験結果を得ており、1次元モデルへ展開した理論・実験研究が今後の課題となる。

この巨大ゼーベック効果の挙動は、1次元状態密度導入のみならずサブバンド形成による半金属-半導体転移、2次元薄膜系で報告されているような新しいフェルミ面形成によるフェルミエネルギー変化に加えて、正の値を取ることからナノワイヤー特有の特異な表面チャネルなど新たな伝導機構が示唆されている。さらに、体積に対して表面の割合が大きなナノワイヤー形状を考慮し、トポロジカルに非自明な電子状態を考慮した展開も想定している。

本研究に合わせて、非定常熱伝導方程式を適切な境界条件の元に解くことで、電流と共に輸送されるペルチェ熱をプローブとして用い、熱電変換材料のインピーダンス $Z(\omega)$ より、電気物性測定のみで zT が測定可能であるインピーダンススペクトロスコピー法の開拓を進めていた。さらに一般的な4端子法による $Z(\omega)$ より zT が測定可能であることや、測定時間を短縮するために2つの周波数領域のみで zT を決定する手法の提案と実証を進めてきた(担当博士課程学生が日本熱電学会若手奨励賞・応用物理学会若手奨励賞受賞)。これらの結果を元に、周波数軸 $Z(\omega)$ のみならず過渡応答の抵抗値時間変化 $R(t)$ 、つまり時間軸を用いて5分程度で正確に zT を決定できることを示した。熱電変換特有の現象を利用し、理論・実験の見地から周波数軸・時間軸に着目した新しい測定手法を開拓した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Otsuka Mioko, Morita Hiroyuki, Arisaka Taichi, Hasegawa Yasuhiro	4. 巻 131
2. 論文標題 Analysis of temperature dependencies of transport coefficients for a single-crystal bismuth wire with a 1.90- μm diameter	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 214302 ~ 214302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0094649	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 Hasegawa Yasuhiro, Yamashita Daisuke	4. 巻 61
2. 論文標題 Temperature dependence of resistivity and temperature coefficient of a single-crystal bismuth nanowire based on the varying scattering mechanism	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 065005 ~ 065005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac646c	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 Hirabayashi Shinya, Hasegawa Yasuhiro	4. 巻 60
2. 論文標題 Observing variations in carrier-scattering mechanisms of polycrystalline bismuth through its temperature-dependent properties	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 115505 ~ 115505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac21dc	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 Hirabayashi Shinya, Hasegawa Yasuhiro	4. 巻 60
2. 論文標題 Influence of contact resistance and heat leakage in the determination of the dimensionless figure of merit via duo-impedance spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 106503 ~ 106503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac1f48	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 Hasegawa Yasuhiro, Takeuchi Mai	4. 巻 92
2. 論文標題 Determination of dimensionless figure of merit in time and frequency domains	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 083902 ~ 083902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0045108	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 Shinozaki Ryo, Hirabayashi Shinya, Hasegawa Yasuhiro	4. 巻 13
2. 論文標題 Dimensionless figure of merit of constantan estimated using impedance spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 106501 ~ 106501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abb285	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 Otsuka Mioko, Arisaka Taichi, Hasegawa Yasuhiro	4. 巻 261
2. 論文標題 Evaluation of a thermoelectric material using duo-frequency impedance spectroscopy method	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Materials Science and Engineering: B	6. 最初と最後の頁 114620 ~ 114620
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mseb.2020.114620	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 Arisaka Taichi, Otsuka Mioko, Tokitani Masayuki, Hasegawa Yasuhiro	4. 巻 126
2. 論文標題 Temperature dependence of carrier scattering in polycrystalline bismuth	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 085101 ~ 085101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5110254	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 Arisaka Taichi, Otsuka Mioko, Hasegawa Yasuhiro	4. 巻 90
2. 論文標題 Measurement of thermal conductivity and specific heat by impedance spectroscopy of Bi ₂ Te ₃ thermoelectric element	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 046104 ~ 046104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5079832	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 Morita Hiroyuki, Arisaka Taichi, Otsuka Mioko, Hasegawa Yasuhiro	4. 巻 12
2. 論文標題 Simultaneous transport coefficient measurements for an individual bismuth wire embedded in a quartz template applying nano-fabrication	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 011008 ~ 011008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/aaf629	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 Vandaele K, Otsuka M, Hasegawa Y, Heremans J P	4. 巻 30
2. 論文標題 Confinement effects, surface effects, and transport in Bi and Bi _{1-x} Sb _x semiconducting and semimetallic nanowires	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Condensed Matter	6. 最初と最後の頁 403001 ~ 403001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-648X/aada9b	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 該当する

1. 著者名 Hasegawa Yasuhiro, Otsuka Mioko	4. 巻 8
2. 論文標題 Temperature dependence of dimensionless figure of merit of a thermoelectric module estimated by impedance spectroscopy	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 075222 ~ 075222
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5040181	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 -

1. 著者名 Arisaka Taichi, Otsuka Mioko, Hasegawa Yasuhiro	4. 巻 123
2. 論文標題 Investigation of carrier scattering process in polycrystalline bulk bismuth at 300 K	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 235107 ~ 235107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5032137	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 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 平林 伸哉, 山下 大輔, 長谷川靖洋
2. 発表標題 多結晶Biバルクの輸送係数測定による散乱過程変化の観測
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山下 大輔, 長谷川靖洋
2. 発表標題 キャリア散乱過程の温度依存性を考慮した単結晶 Bi ワイヤの輸送係数
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹内 舞, 長谷川靖洋
2. 発表標題 無次元性能指数決定法の提案
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大塚美緒子, 長谷川靖洋
2. 発表標題 2点IS法によるバルクBi ₂ Te ₃ 熱電変換素子のzTの温度依存性測定
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 篠崎諒, 長谷川靖洋, 大塚美緒子, 平林伸哉, 笹川晴章, 山下大輔
2. 発表標題 高熱応答性ペルチェモジュールの提案及びIS法による熱応答性の評価
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 平林伸哉, 森田寛之, 長谷川靖洋
2. 発表標題 熱電変換Biワイヤーの輸送係数測定に向けたナノ加工
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山下大輔, 大塚美緒子, 篠崎諒, 森田寛之, 長谷川靖洋
2. 発表標題 単結晶Biワイヤーの抵抗率温度依存性を考慮したモデルの構築
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村田正行, 富岡平祐, 青山佳代, 山本淳, 長谷川靖洋, 小峰啓史
2. 発表標題 直径400 nm級Biナノワイヤーの熱・電流磁気効果
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小峰啓史, 青野友祐, 村田 正行, 長谷川靖洋
2. 発表標題 Bi ナノワイヤーにおける格子圧縮が輸送特性に及ぼす影響
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村田正行, 富岡平祐, 青山佳代, 山本淳, 長谷川靖洋, 小峰啓史
2. 発表標題 磁気ゼーベック効果を利用した直径400nm級Biナノワイヤーの出力因子向上
3. 学会等名 第16回日本熱電学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷川靖洋, 大塚美緒子, 有坂太一, 篠崎諒, 森田寛之
2. 発表標題 単結晶Biワイヤーの作製と4端子物性測定
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大塚美緒子, 有坂太一, 篠崎諒, 森田寛之, 長谷川靖洋
2. 発表標題 単結晶Biワイヤーの移動度温度依存性
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小峰啓史, 青野友祐, 村田正行, 長谷川靖洋
2. 発表標題 Biナノワイヤーにおける格子圧縮が量子効果に及ぼす影響
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大塚美緒子, 山下大輔, 篠崎諒, 有坂太一, 長谷川靖洋
2. 発表標題 Bi人工結晶作製をテーマとした4年間の研究アウトリーチ活動報告
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大塚美緒子, 長谷川靖洋
2. 発表標題 インピーダンススペクトロスコピー法に基づいた熱電変換モジュールの無次元性能指数 zT の評価
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 有坂 太一, 長谷川靖洋, 大塚 美緒子
2. 発表標題 インピーダンススペクトロスコピー法を用いた熱電材料の比熱評価
3. 学会等名 第15回日本熱電学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大塚美緒子, 長谷川靖洋
2. 発表標題 IS法に基づいた熱電変換モジュールの無次元性能指数決定方法
3. 学会等名 第15回日本熱電学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasuhiro Hasegawa, Hiroyuki Morita, Mioko Otsuka, Taichi Arisaka, Takashi Komine
2. 発表標題 Transport measurements of bismuth nanowire embedded in quartz template by nano-fabrication
3. 学会等名 37th International Conference on Thermoelectrics (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

長谷川靖洋のホームページ
<http://www.env.gse.saitama-u.ac.jp/hasegawa/index-j.html>

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
研究分担者	遠藤 彰 (Endo Akira) (20260515)	東京大学・物性研究所・助教 (12601)	
研究分担者	村田 正行 (Murata Masayuki) (80717695)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エネルギー・環境領域・主任研究員 (82626)	
研究分担者	小峰 啓史 (Komine Takashi) (90361287)	茨城大学・理工学研究科(工学野)・准教授 (12101)	

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			
米国	オハイオ州立大学			