

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 3月31日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560004

研究課題名（和文） スピン軌道相互作用系におけるスピネルnst効果の理論と観測

研究課題名（英文） Theory and experiment of the spin Nernst effect in electron gas systems with a spin-orbit interaction

研究代表者

白崎 良演（SHIRASAKI RYŌEN）

横浜国立大学・工学研究院・准教授

研究者番号：90251751

研究成果の概要（和文）：固体物質中のキャリアにスピン軌道相互作用が働く場合、その物質に熱伝導を与えると、熱流に垂直にスピン流が現れるスピネルnst効果が起こる可能性がある。我々は、スピン軌道相互作用が働くナノスケールの物理系の電子状態を調べ、材料に熱伝導を与えたときの輸送現象に対する不純物の効果とフォノンドラッグ効果を理論的に考察した。また、ワイヤ径が数百 nm 程度の Bi 単結晶ナノワイヤを製作し、その電子物性を測定した。

研究成果の概要（英文）：The spin Nernst effect is considered to be a thermoelectric phenomenon which yield the chemical potential difference between carriers with opposite spin in the direction perpendicular to the temperature gradient. We theoretically investigated the electronic states of meso scale electron gas systems with a spin-orbit interaction. Then we investigated the effects of impurities and phonon-drag on transport phenomena of the systems under the temperature gradient. Moreover, we fabricated the single-crystal Bi nanowire several hundred nano-meters in diameter, and measured the electronic physical properties.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目： 応用物理学・工学基礎 ・ 応用物性・結晶工学

キーワード：スピントロニクス

1. 研究開始当初の背景

磁場中の電子系において磁場に垂直に熱流を流すと、磁場と熱流に垂直な方向に起電力が生じるネルnst効果が現れる。これと類似の現象として、スピン軌道相互作用(SOI相互作用)を持つ試料に電場をかけると、電場に垂直にスピン流が現れると考えられてい

る。この現象はスピンホール効果と呼ばれているが、結晶場起源の SOI によるスピンホール効果以外に、熱流によるスピン流の存在が示され、磁場中の熱流磁気効果によるスピン流も提案されている。

スピネルnst効果は粒子間の相互作用やフォノン散乱の影響を強く受けることが予想される。単結晶 Bi バルク材料の場合

では、強磁場の下での断熱ネルンスト係数の振動が観測されているが、フォノンドラッグ効果によりこのネルンスト効果が強められる事が示されている。

一方、近年、直径数百 nm 程度の Bi ナノワイヤが製作され、Bi ナノワイヤの電子物性を直接観測することが可能になっている。スピネルンスト効果が現実の系で観測される条件や実際の強度は確認されていないが、ネルンスト効果と同様にスピネルンスト効果においてもフォノン散乱やその他の相互作用によって駆動力を強める効果が期待される。

2. 研究の目的

SOIを持つ系の電子状態と電子系への不純物散乱とフォノンの影響を調べ、電子系内の熱流に伴って現れる輸送現象を調べる。この知見からスピネルンストの発生条件とスピネルンストの大きさ等の評価を行う。また、SOIを持つ2次元系やナノワイヤのスピネルンストと磁化の関係等、スピネルンストに伴って現れる物理現象を調べスピネルンスト確認の方法の検討を行う。

3. 研究の方法

(1) SOI を持つ電子系の量子状態を調べ、線形応答理論などを用いてバルスティックな系での輸送現象を調べる。次に不純物散乱の効果を取り入れ線形応答理論を用いた輸送係数の計算を行い、ネルンスト効果、ゼーベック効果を調べる。更にネルンスト係数に対するフォノンドラッグの影響を調べる。以上の結果を踏まえ、スピネルンスト効果に対する不純物散乱、フォノンドラッグの影響を考察する。

(2) ナノワイヤの輸送現象と磁化の関係を理論的に調べる。また、実際に数百 nm の径を持つナノワイヤを作成しその物性値を測定する。

4. 研究成果

InGaAs/InAlAs 系、Bi 系に関する理論研究と実験により、主に以下にあげる成果を得た。

(1) SOIを持つバルスティックなナノワイヤの量子状態と輸送係数の理論

中村、羽田野、白崎等は Rashba スピン軌道相互作用(RSOI)を持つバルスティックな擬一次元電子系において、温度勾配と電気化学ポテンシャルの勾配の下で現れる輸送現象を理論的に調べた。

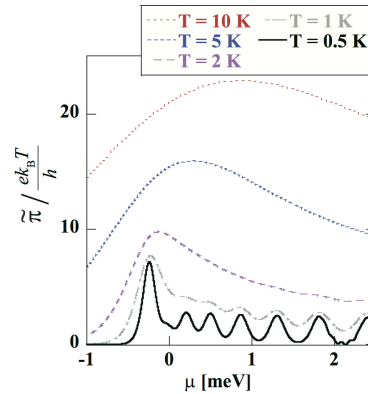


図1化学ポテンシャルと熱電気伝導度の関係。0.5[K], 1.0[K], 2.0[K], 5.0[K], 10[K] の5つの場合にプロットしたもの。

ヘテロ接合系 InGaAs/InAlAsによるナノワイヤを想定し、輸送係数を理論計算した。ナノワイヤでは、RSOIにより、縦方向の伝導チャンネルの電子バンドにギャップが現れる状態を用意することができる。このとき、輸送現象が温度差や化学ポテンシャルに単調に依存して変化するのではなく、量子効果のために輸送係数の振動が現れることが理論的に示された。この量子振動により、Wiedemann-Franz 則が厳密には成立していないことが判明した。

また、白崎はInGaAs系によるナノワイヤの電子状態を、ワイヤの横方向の境界条件を束縛条件におき、SOIを考慮に入れて理論的に厳密に調べた。磁場を加えない場合では、ワイヤの横方向の境界条件によらず、縦方向の伝導チャンネルの電子バンドにギャップが現れることを確かめた。従来、このギャップはワイヤの横方向に周期境界条件が成立する場合か、縦方向に平行な磁場を印加した場合に現れると考えられていた。このギャップの存在により、SOIを持つナノワイヤは温度勾配を加えることにより磁化を持つことを理論的に示すことができる。

(2) 量子ホール領域での電子系の輸送現象に対する不純物散乱の影響の評価

白崎、遠藤、羽田野、中村等は量子ホール効果があらわれる、強磁場下の2次元電子系

において、不純物散乱の効果を取り入れて線型応答理論を発展させ、熱電能テンソル（ゼーベック効果とネルンスト効果）の振る舞いを表現する一般的な理論式を求めることに成功した。

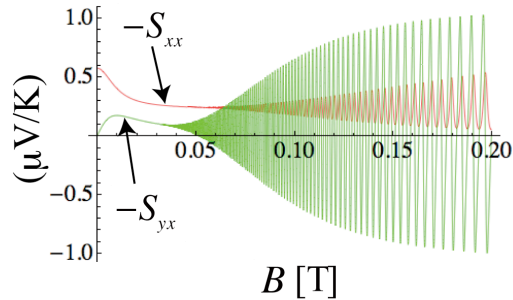


図2 2次元電子系における熱電能テンソルの対角成分（赤色の実線）と非対角成分（緑色の実線）と磁場の関係

ヘテロ接合系 GaAs/AlGaAs の物性値を想定し、ここで導出した理論式を用いて熱電能テンソルを数値的に求め実際の測定結果と比較したところ、中程度の強さの磁場の下では、低温での熱電能テンソルの量子振動の振る舞いを概ね再現できることが分かった。また、電気伝導度と熱電能の関係式として知られている、モットの関係式が成立する温度領域を調べ、この関係式が成立する温度領域の広さは不純物散乱による寿命と概ね反比例する関係を持つことが分かった。熱電能テンソルに現れる不純物散乱と温度の関係は、熱流により誘起されるスピン流に対しても、類似の形で現れることが予想される。

(3) ナノワイヤの輸送現象とフォノンドラッグ効果の理論計算

遠藤、羽田野、中村、白崎等は他の共同研究者達と共に、強磁場下ナノワイヤのフォノンドラッグ効果と、SOIを持つ2次元電子系の電子状態を調べた。強磁場下では、磁場を変化させキャリアのランダウレベルをフェルミレベルと同程度の高さにすると、ネルンスト熱電能にピークが現れる量子振動の効果が現れる。我々は、Bi単結晶ナノワイヤのネルンスト熱電能をフォノンドラッグ効果を考慮に入れて計算し、このピークの高さとワイヤ径の関係を調べた。ワイヤ径を数百nmから100nm程度まで小さくしていくと、量子振動のピークが高くなっていくが、100nm以下になる

と、量子振動のピークが小さくなるという特異な振る舞いが導かれた。

(4) 強磁場下の電子系における冷却効果

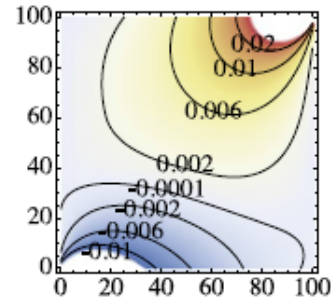


図3 磁場中の試料の温度分布。試料を上方から見たもの。赤色側が高温部で青色側低温部である。電流は試料の横方向に流している。

遠藤、羽田野、中村、白崎等は他の共同研究者達と共に、電気伝導度テンソル、熱電気伝導度テンソル、熱伝導度テンソルなどの輸送係数を用いて輸送方程式を作り、これを直接数値的に解くことにより、強磁場下での熱流と電流の関係を調べた。

このシミュレーションによって、ある値以上の強さの磁場の下で電子系に電流を流すと、試料の抵抗による発熱と、系の一部が冷やされる冷却効果が同時に現れることが明らかになった。我々はこの現象をヘテロ接合系 GaAs/AlGaAsを用いた実験によって実際に確かめている。

(5) Bi ナノワイヤの作成と物性値の観測

長谷川等は実際に水晶テンプレートに流し込んだ Bi をテンプレートと一緒に引き伸ばして数百 nm のワイヤ径を持つ Bi 単結晶ナノワイヤを作成し、更にイオンビームを照射することによってナノワイヤに炭素電極を取り付けることに成功した。長谷川等はこうして作成したナノワイヤを用いて、四端子法による電気抵抗の測定、強磁場中でのシュブニコフ・ド・ハース振動の測定、ホール係数の測定等を行い、Bi 単結晶ナノワイヤの電子物性を調べた。その結果、ワイヤ径が百 nm から数百 nm 程度の範囲では、フェルミエネルギー、キャリア密度、電気抵抗はバルクの Bi 単結晶と同程度の大きさであることが明らかになった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計 25 件)

- ① Naomi Hirayama, Akira Endo, Kazuhiro Fujita, Yasuhiro Hasegawa, Naomichi Hatano, Hiroaki Nakamura, Ryōen Shirasaki and Kenji Yonemitsu, “Current-induced cooling phenomenon in a two-dimensional electron gas under a magnetic field”, Journal of Low Temperature Physics, 査読有, 171 巻, 2013 年, Web 電子版, DOI:10.1007/s10909-012-0852-8
- ② Akira Endo, Toshiyuki Kajioka, and Yasuhiro Iye, “Commensurability Oscillations in the Radio-Frequency Conductivity of Unidirectional Lateral Superlattices: Measurement of Anisotropic Conductivity by Coplanar Waveguide”, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, 82 巻, 2013 年, 054710(1-7), DOI: 10.7566/JPSJ.82.054710
- ③ Shuhei Kobayakawa, Akira Endo, and Yasuhiro Iye, “Diffusion Thermopower of Quantum Hall States Measured in Corbino Geometry”, Journal of the Physical Society of Japan, 査読有, 82 巻, 2013 年, 053702(1-4), DOI: 10.7566/JPSJ.82.053702
- ④ Fumiaki Tsunemi, Masayuki Murata, Yusuke Saito, Katsuhito Shirota, Yasuhiro Hasegawa, Takashi Komine, “Shubnikov-de Haas oscillations in individual single-crystal bismuth nanowires encased in quartz template”, Applied Physics Express, 査読有, 6 巻, 2013 年, 045002(1-4), DOI: 10.7567/APEX.6.045002
- ⑤ Ryōen Shirasaki, Akira Endo, Naomichi Hatano, and Hiroaki Nakamura, “Thermomagnetic Effect in the Quantum Hall System”, Journal of ELECTRONIC MATERIALS, 査読有, 41 巻, 2012 年, 1540-1545, DOI: 10.1007/s11664-011-1880-x
- ⑥ Naomi Hirayama, Akira Endo, Kazuhiro Fujita, Yasuhiro Hasegawa, Naomichi Hatano, Hiroaki Nakamura, Ryōen Shirasaki and Kenji Yonemitsu, “Transport-coefficient dependence of current-induced cooling effect in a two-dimensional electron gas”, Journal of ELECTRONIC MATERIALS, 査読有, 41 巻, 2012 年, 1535-1539, DOI: 10.1007/s11664-011-1850-3
- ⑦ Masayuki Murata, Yasuhiro Hasegawa, Takashi Komine and Tomohiro Kobayashi, “Preparation of bismuth nanowire encased in quartz template for Hall measurements using focused ion beam processing”, Nanoscale Research Letters, 査読有, 7 巻, 2012 年, 505(1-6), DOI: 10.1186/1556-276X-7-505
- ⑧ Masayuki Murata, Hiroya Yamamoto, Fumiaki Tsunemi, Yasuhiro Hasegawa, Takashi Komine, “Four-Wire Resistance Measurements of a Bismuth Nanowire Encased in a Quartz Template Utilizing Focused Ion Beam Processing”, Journal of Electronic Materials, 査読有, 41 巻, 2012 年, 1442-1449, DOI: 10.1007/s11664-012-1986-9
- ⑨ Yasuhiro Hasegawa, Daiki Nakamura, Masayuki Murata and Hiroya Yamamoto, Takashi Komine, Takashi Taguchi and Shinichiro Nakamura, “Crystal orientation and transport properties of a 633-nm-diameter bismuth nanowire”, Journal of Electronic Materials, 査読有, 40 巻, 2011 年, 1005-1009, DOI: 10.1007/s11664-010-1480-1
- ⑩ Hiroaki Nakamura, Naomichi Hatano, Ryōen Shirasaki, Naomi Hirayama, Kenji Yonemitsu, “Quantum Oscillations of Thermoelectric Effects in a Pseudo-one-dimensional Electron Gas with a Spin-Orbit Interaction”, Journal of Electric Material, 査読有, 40 巻, 2011 年, 601 (5pp), DOI: 10.1007/s11664-010-1470-3
- ⑪ Naomi Hirayama, Akira Endo, Kazuhiro Fujita, Yasuhiro Hasegawa, Naomichi Hatano, Hiroaki Nakamura, Ryōen Shirasaki, Kenji Yonemitsu, “Temperature Distribution in Two-Dimensional Electron Gases under a Strong Magnetic Field”, Journal of Electric Material, 査読有, 40 巻, 2011 年, 529 (4pp), DOI: 10.1007/s11664-010-1427-6
- ⑫ Yuki Ichige, Tsuyoshi Matsumoto, Takashi Komine, Ryuji Sugita, Tomosuke Aono, Masayuki Murata, Daiki Nakamura and Yasuhiro Hasegawa, “Numerical study of effect of scattering process on transport properties in Bi nanowires”, Journal of Electronic Materials, 査読有, 40 巻, 2011 年, 523-528, DOI: 10.1007/s11664-010-1426-7
- ⑬ Daiki Nakamura, Yasuhiro Hasegawa, Masayuki Murata, Hiroya Yamamoto, Takashi Komine, “Thermoelectric properties for single crystal bismuth nanowires using a mean free path limitation model”, Journal of Applied Physics, 査読有, 110 巻, 2011 年, 053702 (1-6), DOI: 10.1063/1.3630014

⑭ Naomi Hirayama, Akira Endo, Kazuhiro Fujita, Yasuhiro Hasegawa, Naomichi Hatano, Hiroaki Nakamura, Ryōen Shirasaki, “Temperature Distribution in Nano-Devices under a Strong Magnetic Field”, Computer Physics Communications, 査読有, 182 巻, 2011 年, 90-92, DOI: 10.1016/j.cpc.2010.07.043

⑮ 羽田野直道, “Resonant states of open quantum systems”, Progress of theoretical physics supplement, 査読有, 184 巻, 2010 年, 497-515, DOI: 10.1143/PTPS.184.497

⑯ Masayuki Murata, Daiki Nakamura and Yasuhiro Hasegawa, Takashi Komine, Daisuke Uematsu, Shinichiro Nakamura and Takashi Taguchi, “Electrical nanocontact between bismuth nanowire edges and electrodes”, Journal of Electronic Materials, 査読有, 39 巻, 2010 年, 1536-1542, DOI: 10.1007/s11664-010-1282-5

⑰ Daiki Nakamura, Masayuki Murata, Yasuhiro Hasegawa, Takashi Komine, Daisuke Uematsu, Shinichiro Nakamura, Takashi Taguchi, “Thermoelectric properties of a 593 nm individual bismuth nanowire prepared using a quartz template”, Journal of Electronic Materials, 査読有, 39 巻, 2010 年, 1600-1605, DOI: 10.1007/s11664-009-1045-3

〔学会発表〕(計 42 件)

① 平山尚美, 遠藤彰, 羽田野直道 “量子化磁場下におけるビスマスナノワイヤの熱電特性とワイヤ径および温度依存性”, 日本物理学会第 68 回年次大会(27aXQ-11), 2013 年 03 月 27 日, 広島大学

② 小早川周平, 藤田和博, 遠藤彰, 家泰弘 “高周波加熱を利用した量子ホール領域での熱電効果の測定”, 日本物理学会第 68 回年次大会(27aXQ-9), 2013 年 03 月 27 日, 広島大学

③ 村田正行, 常見文昭, 齋藤佑介, 代田雄人, 藤原啓資, 長谷川靖洋, 小峰啓史 “Bi ナノワイヤ上へのホール測定用局所電極の作製と評価”, 第 60 回応用物理学関係連合講演会, 2013 年 03 月 27 日, 神奈川工科大学

④ 長谷川靖洋, 谷川靖洋, 常見文昭, 村田正行, 齋藤佑介, 代田雄人, 小峰啓史, Dames Chris, “石英テンプレート中の Bi ナノワイヤ熱伝導率測定法の開発”, 第 60 回応用物理学関

係連合講演会, 2013 年 03 月 27 日, 神奈川工科大学

⑤ 藤田和博, 遠藤彰, 家泰弘, 勝本信吾 “量子ホール領域におけるペルチェ効果の観測”, 日本物理学会 2012 年秋季大会(18pFB-6), 2012 年 09 月 18 日, 横浜国立大学

⑥ 村田正行, 常見文昭, 長谷川靖洋, 小峰啓史, “Bi ナノワイヤ熱電変換素子の抵抗率の温度依存性”, 第 9 回熱電学会学術講演会, 2012 年 08 月 27 日, 東京工業大学

⑦ 常見文昭, 村田正行, 長谷川靖洋, 小峰啓史, 遠藤彰, “Bi ナノワイヤ熱電変換素子の Shubnikov-de Hass 振動測定”, 第 9 回熱電学会学術講演会, 2012 年 08 月 27 日, 東京工業大学

⑧ Yasuhiro Hasegawa, Masayuki Murata, Fumiaki Tsunemi, Takashi Komine, Chris Dames, Javier E. Garay “A process for thermal conductivity measurement of an individual bismuth nanowire in quartz template”, 31th International Conference on Thermoelectrics, 2012 年 07 月 08 日~2012 年 07 月 12 日, デンマーク・オーボルー

⑨ Masayuki Murata, Fumiaki Tsunemi, Yasuhiro Hasegawa and Takashi Komine, “Dependence of temperature coefficient of resistivity on individual and single-crystal bismuth nanowires”, 31th International Conference on Thermoelectrics, 2012 年 07 月 08 日~2012 年 07 月 12 日, デンマーク・オーボルー

⑩ 藤田和博, 遠藤彰, 勝本信吾, 家泰弘, “量子ホール系の直流電流加熱による熱起電力: 充填率および電流・磁場方向依存性”, 日本物理学会 2012 年第 67 回年次大会(25pCJ-5), 2012 年 03 月 25 日, 関西学院大学

⑪ N. Hirayama, A. Endo, K. Fujita, Y. Hasegawa, N. Hatano, H. Nakamura, R. Shirasaki and K. Yonemitsu, “Theoretical study of thermoelectric and thermomagnetic characteristics of bismuth nanowires under a quantizing magnetic field”, Simulation and Manipulation of Quantum Systems for Information Processing, 2011 年 10 月 17 日~2011 年 10 月 19 日, ドイツ

⑫ 藤田和博, 遠藤彰, 勝本信吾, 家泰弘, “量子ホール系における電流加熱時電子温度の空間分布と発生する熱起電力”, 日本物理学会 2011 年秋季大会(23aTL-7), 2011 年 09 月 23 日, 富山大学

⑬ 平山尚美、遠藤彰、藤田和博、長谷川靖洋、羽田野直道、中村浩章、白崎良演、米満賢治，“ビスマスナノワイヤーの量子化磁場下での熱電特性の理論計算”，日本物理学会2011年秋季大会(23aTL-3)，2011年09月23日，富山大学

⑭ 常見文昭，村田正行，長谷川靖洋，小峰啓史，遠藤彰，“単結晶ビスマスナノワイヤーのShubnikov-de Haas 振動”，日本物理学会2011年秋季大会(23aTL-2)，2011年09月23日，富山大学

⑮ N. Hirayama，A. Endo，K. Fujita，Y. Hasegawa，N. Hatano，H. Nakamura，R. Shirasaki and K. Yonemitsu，“Theoretical study of thermoelectric and thermomagnetic characteristics of Bismuth nanowires under a quantizing magnetic field”，NATO Advanced Research Workshop on New materials for thermoelectric applications: theory and experiment 2011，2011年09月20日-2011年09月25日，クロアチア

⑯ K. Fujita，A. Endo，S. Katsumoto，Y. Iye，“Spatial distribution of electron temperatures induced by a current in the quantum Hall regime”，19th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS19) 2011，2011年07月25日，Tallahassee FL. USA

⑰ Ryōen Shirasaki，Akira Endo，Naomichi Hatano，and Hiroaki Nakamura，“Thermomagnetic effect in the quantum hall system”，30th International Conference on Thermoelectrics，2011年07月18日，トラバースシティ，USA

⑱ Naomi Hirayama，Akira Endo，Kazuhiro Fujita，Yasuhiro Hasegawa，Naomichi Hatano，Hiroaki Nakamura，Ryōen Shirasaki and Kenji Yonemitsu，“Transport-coefficient dependence of current-induced cooling effect in a two-dimensional electron gas”，30th International Conference on Thermoelectrics，2011年07月18日，トラバースシティ，USA

⑲ 藤田和博，遠藤彰，勝本信吾，家泰弘，“量子ホール系における電流加熱時電子温度の空間分布の充填率依存性”，日本物理学会第66回年次大会(25pHG-14)，2011年03月25日，新潟大学

⑳ 中村浩章，白崎良演，羽田野直道，米満賢治，平山尚美，“擬一次元スピン軌道相互作用系の熱電効果における量子振動”，日本物理学会第66回年次大会(25aHD-10)，2011年03月25日，新潟大学

㉑ 平山尚美，遠藤彰，藤田和博，長谷川靖洋，羽田野直道，中村浩章，白崎良演，“電流加熱時の磁場中極低温2次元電子系の温度分布と電位分布”，日本物理学会2010年秋季大会(25aWR-4)，2010年09月25日，大阪府立大学

㉒ K. Fujita，A. Endo，S. Katsumoto，Y. Iye “Experimental verification of the Mott relation in the thermoelectric effect of the quantum Hall systems”，30-th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors，2010年07月29日，COEX，Seoul，Korea

㉓ A. Endo，Y. Iye，“Measurement of thermoelectric power in unidirectional lateral superlattices”，30-th Int. Conf. on the Physics of Semiconductors，2010年07月27日，COEX，Seoul，Korea

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白崎 良演 (SHIRASAKI RYŌEN)
横浜国立大学・工学研究院・准教授
研究者番号：90251751

(2) 研究分担者

羽田野 直道 (HATANO NAOMICHI)
東京大学・生産技術研究所・准教授
研究者番号：70251402

中村 浩章 (NAKAMURA HIROAKI)
核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授
研究者番号：30311210

遠藤 彰 (ENDO AKIRA)
東京大学・物性研究所・助教
研究者番号：20260515

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