

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：62616
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2018～2021
課題番号：18H01244
研究課題名（和文）TES型マイクロカロリメータを用いた太陽アクシオン探査

研究課題名（英文）Solar axion search utilizing TES microcalorimeters

研究代表者

満田 和久（Mitsuda, Kazuhisa）

国立天文台・先端技術センター・特任教授

研究者番号：80183961

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）：太陽アクシオンコンバータとして ^{57}Fe 薄膜をもつTES型マイクロカロリメータを実現するため4つの主要課題を解決する方法を、要素試作と電磁界シミュレーションにより検討した。続いてその解決方法に基づいたTES型マイクロカロリメータを設計・製作し、X線照射により評価した。その結果、信号の立ち上がり波形が大きくばらつくことがわかり、その原因を検出器の熱応答シミュレーションにより検討した。その結果、金薄膜の熱伝導度が不十分であることが示唆され、それを改良する製作方法を開発した。これらに基づいて、 8×8 フォーマットのアレイ素子を設計し、マイクロ波周波数空間信号多重化による信号読み出しの準備もすすめた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

TES型マイクロカロリメータアレイ検出器は優れたエネルギー分解能が特徴であり、宇宙X線観測に加えて、高エネルギー分解能で得られる低バックグラウンドを生かした稀事象探査への応用が特に期待される。本研究は稀事象探査の一つとして太陽アクシオン探査を目標とする。本研究により64画素の検出器を実現する基礎的な知見が得られた。本格的な探査には千以上の素子が必要である。信号読み出し回路を含めたシステム全体はスケールアップであるので、時間と経費をかけることで実現の可能性は高い。また、今回研究した熱への変換物質をTESの横に配置する方式は応用性が高く、他の稀事象探査への応用も期待される。

研究成果の概要（英文）：We have studied the methods to solve the four main challenges in realizing a TES-type microcalorimeter with ^{57}Fe thin film as a solar-axion converter by elemental prototyping and electromagnetic field simulation. We then designed and fabricated a TES microcalorimeter based on the solutions, and evaluated it by X-ray irradiation. As a result, it was found that the waveform at the rising edge of the signal varied greatly, and the cause of this variation was investigated by simulating the thermal response of the detector. As a result, it was suggested that the thermal conductivity of the gold thin film was insufficient, and a fabrication method was developed to improve it. Based on these results, we designed an 8×8 format array element and prepared for signal readout by microwave frequency-space signal multiplexing.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：アクシオン 太陽アクシオン マイクロカロリメータ 超伝導転移端

1 研究開始当初の背景

ASTRO-H ひとみ衛星に搭載された軟 X 線分光装置 (SXS) は軌道上で正常に動作し、衛星姿勢系の問題により短い動作期間であったとはいえ、X 線マイクロカロリメータ (XMC) が拓く新しい宇宙物理学研究の世界を我々に垣間見せた。ひとみ衛星とその代替機 (XRISM) の XMC を集光・撮像能力の点で大きく超えるヨーロッパ宇宙機構 (ESA) の国際大型衛星 Athena 搭載の X-IFU 観測装置により、XMC による宇宙観測は大きく飛躍することが期待される。日本には X-IFU の冷却措置だけでなく、検出器システムへの貢献も期待されている。一方、本研究対象の一部である太陽アクシオン探査のような地上実験への応用も期待される。アクシオンは強い CP 問題を解決する未知の粒子であり、冷たい暗黒物質の候補の一つでもある。もしも存在していれば、太陽中心で大量に生成され太陽外に流れ出しているはずである。これまでに多くの太陽アクシオン検出実験が行われているが上限値のみで検出には至っていない。いくつかの原子核では太陽アクシオンを X 線領域の光子に変換するアクシオンコンバーターとして期待される核遷移が複数存在する。核遷移で光子に変換されたエネルギーは瞬時に転換電子などに分岐するため、この検出には全エネルギーを測定する XMC が検出効率の点で有利である。また高いエネルギー分解能によりバックグラウンドの影響が大きく低減できる。

2 研究目的

本研究の目的は以下の二つである。(1) 2030 年代前半の打ち上げをめざす欧州を中心とする大型 X 線天文台 Athena 衛星に搭載される観測装置 X-IFU の搭載候補となる TES 型 X 線マイクロカロリメータ (TES- XMC) アレイ素子を周波数分割信号多重化 (FDM) で読み出すための極低温初段増幅器 (SQUID および SQUID Array Amplifier) を、オランダ SRON と協力して研究開発する。(2) その成果を信号処理に応用し、未検出の太陽アクシオンに感度のある検出器実現にける 4 つの主要課題を解決し、その上で、 8×8 フォーマットのアレイ素子による検出実験をめざす。

3 研究方法

(1) については、素子の作成は産総研 CRAVITY で行う。素子の設計は SRON がフィンランド VTT と協力して開発をすすめてきた SQUID を基本とするが、CRAVITY の薄膜特性を取り込むことで、設計上相反する要求となる雑音と周波数帯域のさらなる最適化をめざす。素子の評価は、JAXA 宇宙科学研究所と SRON で行う。(2) については ^{57}Fe 同位体をコンバーターとして使用する前提ですすめる。そこで目標とする検出実験を実現するためには、4 つの主要課題が存在する。(A) 鉄の磁性が TES (超伝導転移端センサー) の超伝導特性を阻害するので対策が必要、(B) 従来の金に比べて鉄は比熱が大きいため最適設計が必要、(C) 鉄の熱伝導度が低いことに起因する信号波形のアクシオン吸収位置依存性によりエネルギー分解能悪化の可能性があり、最適設計が必要、(D) ^{57}Fe は大変高価なため、収率の高い鉄吸収体形成のマイクロプロセスが必要、である。これらの課題を一つ一つ解決した上で、アレイ素子を作成する。

4 研究成果

(1) 信号処理用 SQUID の開発

本研究は、SRON と VTT が開発した SQUID の設計パラメータとマスクパターンをもとに、CRAVITY の薄膜特性にあわせて再調整して素子を再設計し、それで作成した素子のその特性評価から開始することにした。また、X-IFU の FDM 用極低温信号処理回路は、single SQUID と SAA の 2 段からなるが、single SQUID から製作を始めることとした。SRON での評価試験の結果、SRON/VTT の素子と遜色のない動作を確認した。しかし、ここまで開発が進んだところで、X-IFU 国際コンソーシアムは、XMC の信号処理を FDM ではなく、時間分割多重化 (TDM) に変更する判断を下し、それを担当する組織も SRON から米国 NIST に移った。このため、本研究は残念ながらここまでで終了とすることにした。

太陽アクシオンの研究では極低温の信号多重化処理を必要としている。その信号処理は、産総研グループと JAXA 宇宙科学研究所等が別の科研費で研究をすすめているマイクロ波周波数帯を用いた FDM (MW-FDM) に変更することにした (X-IFU の FDM は 1-10MHz の周波数を搬送波として用いており、マイクロ波を用いる MW-FDM とは本質的に異なる)。なお、MW-FDM の研究開発位は XMC アレイの提供で SRON も協力している。また、本研究期間の間に本研究目的達成に十分な性能を持つ MW-FDM システムの開発に成功している [1]。

(2) 太陽アクシオン探査のための XMC の開発

4つの課題の解決 まず初めに課題(D)の解決のために鉄薄膜の製作方法として電析を選択した。少ない溶液で作成することで、一回のプロセスで必要とする量を少なくするとともに、溶液中の使われなかった鉄は再利用可能だからである。このような鉄の電析方法の研究については早稲田大学の本間・斉藤研究室に協力をお願いし中心となって実施していただいた。課題(C)が問題になるかどうかを調べるために、電析で鉄薄膜を試作し、極低温での熱伝導度を推定することにした。Figure 1 に示す電気抵抗測定用の素子を試作し、その極低温での電気抵抗を測定した。金のみのサンプルとの比較から鉄の電気伝導度を推定し、それから Wiedemann - Franz law を用いて熱伝導度を推定した。熱伝導度は電析のパラメータに依存し、それを調整した結果、後述する検出熱シミュレーションからは十分な熱伝導度が得られた。続いて課題(A)の解決のために、まず、TES と鉄薄膜の間に必要な距離の最小値を推定した。我々が用いている Ti/Au 2層薄膜の TES が受ける磁場の影響は先行研究で調べられている [2]。そこで地球磁場で鉄が磁化したと仮定して、その近傍に発生する磁場の強さを有限要素法による磁場シミュレーションにより求めた。Figure 2 にシミュレーション結果の例を示す。これらの最小距離を決定し、それを満足する検出器設計を行い Figure 3 の構造とすることにした。最後に課題(B)については、文献にある鉄の極低温での熱容量と、課題(C)で鉄の測定された熱伝導度を用いて Figure 3 の検出器の熱シミュレーションを行い、検出器として動作することを確認した。熱容量の値が妥当であるかどうかは、マイクロカロリメータを試作し、それを動作させることで確認することとした。ここまでの成果は、査読付き学術誌に公表し [3] , また、修士論文の一部にもなった [4]。



Figure 1: 鉄の熱伝導度推定のための測定サンプルの例。鉄薄膜ありとなしのサンプルを一度に作成することで、極低温での鉄の電気伝導度を測定し、それから、熱伝導度を推定した。

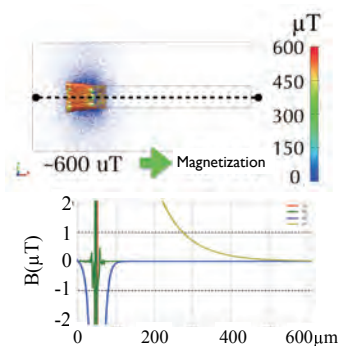


Figure 2: 有限要素法による磁場シミュレーション。地球磁場で鉄が磁化したと仮定して、近傍の磁場の強さを求めた。

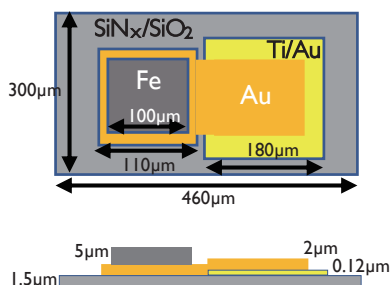


Figure 3: 設計したマイクロカロリメータ素子の構造。アクシオンコンバータとしての鉄を Ti/Au の TES の横におき、両者を金の熱伝導用薄膜（サーマルストラップ）で熱的に接続している。これら全体は、シリコン窒化膜/酸化膜薄膜上に形成され、熱浴であるシリコン基板に弱い熱伝導で接続する。



Figure 4: 製作したマイクロカロリメータ素子の光学顕微鏡写真。Ti/Au TES の上下端に接続し、右側に引き出されているのは TES 信号読み出すための電極と配線である。これは Figure 3 では省略されている。

マイクロカロリメータとしての動作確認と課題の抽出 Figure 3 に示される構造を持つ検出器の作成プロセス設計とフォトマスク設計を行い、インハウスで素子を試作した。製作した素子の光学顕微鏡写真を Figure 4 に示す。この素子の超伝導転移温度は約 150mK であるので、素子を約 100mK まで冷却し、電流-電圧曲線などの特性を評価した。さらに、 ^{55}Fe からの 5.9keV Mn K_{α} 線を照射した。その結果、信号立ち上がり波形の異なる信号パルスが観測された (Figure 5)。多様な立ち上がり波形の多くは、X 線をコリメートせずに検出器全体にあてているため、サーマルストラップや TES で発生したイベントによるものであると考えられる。しかし、それらを取り除いても立ち上がり波形の違いによりエネルギー分解能が阻害されることが明らかになった。なお、太陽アクシオンには鉄コンバータ以外は反応しないので、太陽アクシオンの検出時にはコリメータは必要ない。本節までの成果は、国際会議で発表し [6]、また、修士論文の一部にもなった [5]。

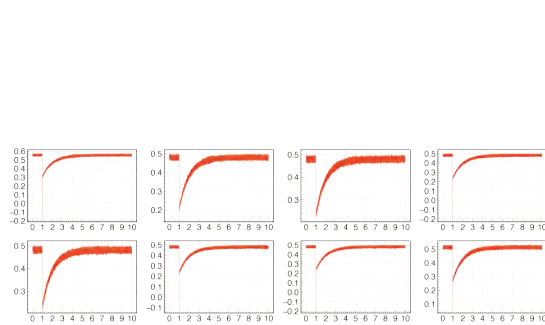


Figure 5: ^{55}Fe からの X 線を照射して得られた信号パルスの例。TES を流れる電流変化であるため負のパルスとなっている。Figure 6 のシミュレーションパルスは、TES の平均温度変化を示しているため極性が逆向きの正パルスである。

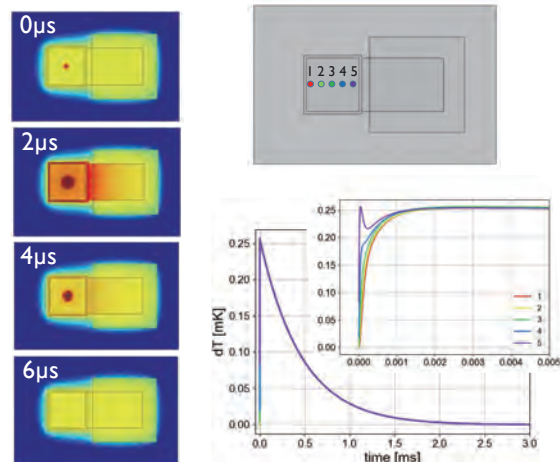


Figure 6: シミュレーション結果の例。左の図はパルスの立ち上がり時に熱が伝わる様子を示している。右の図に挿入されたパネルは立ち上がりの拡大図で、5つの熱入射位置によって、立ち上がり波形が大きく異なることがわかる。

検出器シミュレーションの詳細化、動作の理解と改良 エネルギー分解能の劣化は、鉄薄膜上の X 線吸収位置によって、信号波形が異なるためであると予想される。しかし、課題 (B)(C) の解決確認ために行ったシミュレーションでは、このような位置依存性は予想されなかった。これは、このシミュレーションが簡易的なもので、特に TES マイクロカロリメータの Electro-Thermal Feedback (ETF) の効果が考慮されていない可能性が考えられる。研究分担者を含む帝京大学・九州大学のチームは ETF を含めた検出器シミュレーションに取り組んできており、その開発をもとに ETF を取り入れたより詳細な検出器モデルを構築し、シミュレーションを行った。その結果 Figure 6 に示す例のように、信号立ち上がりの波形が吸収位置に変化することがわかった [7]。パラメータを振ってシミュレーションを行ったところ、鉄の熱伝導度は原因ではなく、金のサーマルストラップの熱伝導度が不十分であり、これを少なくとも 5 倍高くすることで、波形のばらつきが抑えられることがわかった。そこでサーマルストラップ用の金薄膜の製作プロセスを見直し、これまでの電子ビーム蒸着法から電析法に変更するための開発を行った。Figure 7 に示す電析装置を開発し、電析のパラメータを調整することで、極低温での電気伝導度が、従って、熱伝導度がこれまでよりも約 5 倍大きな薄膜を作ることができた。

アレイ素子の設計と製作 以上の研究成果をもとに、 8×8 フォーマットの 64 アレイ素子の開発を開始した。Figure 8 に、フォトマスクの設計パターンを示す。reference で用いた MW-MUX 装置に接続して信号を読み出すことを考慮した設計となっている。このマスクパターンを用いた場合の電析などのプロセスパラメータの最適化を行った。しかし、残念ながら、TES 薄膜を作成する装置が不調となり、新たな装置を別の予算で立ち上げることになった。その装置の調整が本研究の時間の範囲では完了しなかったため、所定の温度で超伝導転移する TES を備えたアレイ素子を実現するところまでは至らなかった。

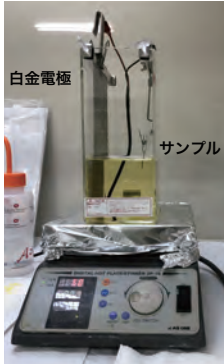


Figure 7: 開発した金電析による薄膜製作装置。

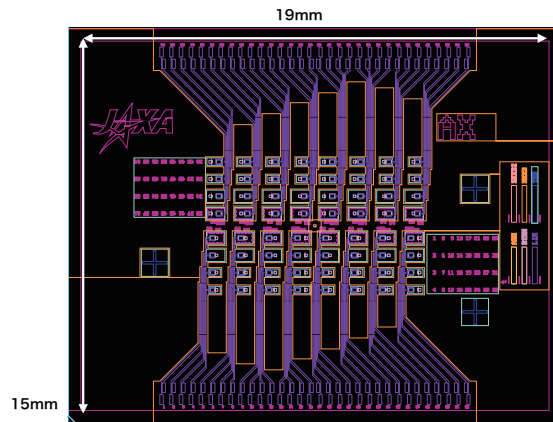


Figure 8: 8×8 フォーマットの 64 アレイ素子作成のためのフォトマスク図。MW-MUX の極低温信号処理装置に接続するために、信号は上下 2 つの方向に読み出す。

References

- [1] Nakashima, Y., Hirayama, F., Kohjiro, S., Yamamori, H., Nagasawa, S., Sato, A., Yamada, S., Hayakawa, R., Yamasaki, NY., Mitsuda, K., Nagayoshi, K., Akamatsu, H., Gottardi, L., Taralli, E., Bruijn, MP., Ridder, ML., Gao, JR., den Herder, JWA., "Low-noise microwave SQUID multiplexed readout of 38 x-ray transition-edge sensor microcalorimeters", Appl. Phys. Lett., 117, article 122601, doi 10.1063/5.0016333 (2020)
- [2] Ishisaki, Y. , Kurabayashi, H. , Hoshino, A. , Ohashi, T., Yoshino, T., Hagihara, T., Mitsuda, K., Tanaka, K., "Effect of On-Chip Magnetic Shielding for TES Microcalorimeters", Journal of Low Temperature Physics, 151, 131 (2008)
- [3] Konno, R., Maehisa, K., Mitsuda, K., Yamasaki, NY., Yamamoto, R., Hayashi, T., Muramatsu, H., Nakashima, Y., Maehata, K., Homma, T., Saito, M., Sugie, M., Sato, R., "Development of TES Microcalorimeters with Solar-Axion Converter", J. Low Temp. Phys., 199, page 654 - 662, doi 10.1007/s10909-019-02257-9 (2020)
- [4] 紺野良平, 太陽アクシオン探査に特化した ^{57}Fe 吸収体を持つ TES 型マイクロカロリメータの研究, 修士論文 (2020)
- [5] 八木雄大, ^{57}Fe 原子核の共鳴吸収による 14.4keV 太陽アクシオン探査に向けた TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発, 修士論文 (2021)
- [6] Yuta Yagi, Ryohei Konno, Tasuku Hayashi, Keita Tanaka, Noriko Y. Yamasaki, Kazuhisa Mitsuda, Rumi Sato, Mikiko Saito, Takayuki Homma, Yoshiki Nishida, Shohei Mori, Naoko Iyomoto, "Performance of TES X-Ray Microcalorimeters Designed for 14.4 keV Solar Axion Search", 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (2021)
- [7] Shohei Mori, Y. Nishida, N. Iyomoto, Y. Yagi, R. Konno, T. Hayashi, K. Tanaka, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, R. Sato, M. Saito, and T. Homma, "Simulation of TES X-Ray Microcalorimeters designed for 14.4 keV Solar Axion Search", 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (2021)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Y. Nakashima, F. Hirayama, S. Kohjiro, H. Yamamori, S. Nagasawa, A. Sato, S. Yamada, R. Hayakawa, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, K. Nagayoshi, H. Akamatsu, L. Gottardi, E. Taralli, M. P. Bruijn, M. L. Ridder, J. R. Gao, and J. W. A. den Herder	4. 巻 117
2. 論文標題 Low-noise microwave SQUID multiplexed readout of 38 x-ray transition-edge sensor microcalorimeters	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Lett.	6. 最初と最後の頁 122601
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0016333	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 該当する

1. 著者名 Konno, R., Maehisa, K., Mitsuda, K., Yamasaki, N.Y., Yamamoto, R., Hayashi, T., Muramatsu, H., Nakashima, Y., Maehata, K., Homma, T., Saito, M., Sugie, M., Sato, R.	4. 巻 199
2. 論文標題 Development of TES Microcalorimeters with Solar-Axion Converter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 JOURNAL OF LOW TEMPERATURE PHYSICS	6. 最初と最後の頁 654 662
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s10909-019-02257-9	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5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Konno, Mitsuda, K. Yamasaki, N.Y., Yamamoto, R., Hayashi, T., Muramatsu, H., Homma, T., Saitou, M., Sugie, M., Satou, R.
2. 発表標題 Development of TES microcalorimeters for solar axion search
3. 学会等名 18th International Workshop on Low Temperature Detectors（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 紺野良平, 前久景星, 満田和久, 山崎典子, 山本亮, 林佑, 村松はるか, 中島裕貴, 八木雄大, 本間敬之, 齋藤美紀子, 杉江美紗貴, 佐藤瑠美
2. 発表標題 太陽アクシオン探査に特化した吸収体を持つ TES 型マイクロカロリメータの開発 2
3. 学会等名 日本物理学会2020年年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 紺野良平, 満田和久, 山崎典子, 山本亮, 林佑, 村松はるか, 前久景星, 本間敬之, 斎藤美紀子, 杉江美紗貴
2. 発表標題 太陽アクシオン探査に特化した吸収体を持つTES型マイクロカロリメータの開発
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会 (2019年3月14日-2019年3月17日)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Yagi, Ryohei Konno, Tasuku Hayashi, Keita Tanaka, Noriko Y. Yamasaki, Kazuhisa Mitsuda, Rumi Sato, Mikiko Saito, Takayuki Homma, Yoshiki Nishida, Shohei Mori, Naoko Iyomoto,
2. 発表標題 Performance of TES X-Ray Microcalorimeters Designed for 14.4 keV Solar Axion Search
3. 学会等名 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shohei Mori, Y. Nishida, N. Iyomoto, Y. Yagi, R. Konno, T. Hayashi, K. Tanaka, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, R. Sato, M. Saito, and T. Homma
2. 発表標題 Simulation of TES X-Ray Microcalorimeters designed for 14.4 keV Solar Axion Search
3. 学会等名 19th International Workshop on Low Temperature Detectors (国際学会)
4. 発表年 2021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
研究分担者	山崎 典子 (Yamasaki Noriko) (20254146)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授 (82645)	

6. 研究組織（つづき）

	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	前畑 京介 (Maehata Keisuke) (30190317)	帝京大学・公私立大学の部局等・教授 (32643)	

	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 協 力 者	本間 敬之 (Homma Takayuki)	早稲田大学・先進理工学部・教授 (32689)	
研究 協 力 者	齋藤 美紀子 (Saito Mikiko)	早稲田大学・ナノ・ライフ創新研究機構・教授 (32689)	
研究 協 力 者	伊豫本 直子 (Iyomoto Naoko)	九州大学・工学部・准教授 (17102)	

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