

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 24 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02442

研究課題名(和文) 高強度・低弾性率と骨結合能を併せ持つ全非金属人工骨の創製と生体機能発現機構の解明

研究課題名(英文) Development of All-non-metal Artificial Bone with High Mechanical Strength, Low Elastic Modulus and Bone-bonding Ability and Elucidation of the Mechanism of Biofunctional Expression

研究代表者

藪塚 武史 (Yabutsuka, Takeshi)

京都大学・エネルギー科学研究科・講師

研究者番号：20574015

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：炭素繊維強化ポリエーテルエーテルケトン(PEEK)に高い骨結合能を付与することができれば、金属に匹敵する機械的強度、ストレスシールディングの低減、金属アレルギーの回避、良好な骨結合能のすべてを併せ持つ、いまだ実現されていない物性の材料の開発につながり、整形外科および歯科領域における大きなブレイクスルーとなる可能性を秘めている。本研究では、炭素繊維強化PEEK表面にリン酸カルシウム微粒子「アパタイト核」を析出させることで、生体不活性な炭素繊維強化PEEKへのアパタイト形成能付与を行った。さらに、アパタイト核処理による炭素繊維強化PEEKの生体活性についてin vivoの観点から検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人工股関節や人工歯根等の高強度を必要とする人工骨として、チタン合金、Co-Cr合金、ステンレス鋼等の金属材料が数多く臨床応用されてきた。しかし、金属は弾性率が骨よりもはるかに大きいため、骨欠損部に埋入すると材料への応力集中により周囲の骨吸収を引き起こす懸念がある。高強度と低弾性率、さらに良好な骨結合性をも兼ね備えた、従来にない魅力的な物性を有する人工骨の開発が切望されていたが、実現に至っていなかった。卓越した物性を有する炭素繊維強化ポリエーテルエーテルケトンに高い骨結合能を付与することに成功した本研究は、整形外科および歯科領域における大きなブレイクスルーとなる可能性を秘めている。

研究成果の概要(英文)：The ability to add high bone-bonding ability to carbon fiber-reinforced polyetheretherketone (PEEK) could lead to the development of a biomaterial with unrealized physical properties that combines mechanical strength comparable to metal, reduced stress sealing, avoidance of metal allergies, and good bone-bonding ability, which could be a significant breakthrough in the orthopedic and dental fields. In this study, calcium phosphate fine particles called "apatite nuclei" were precipitated on the surface of carbon fiber-reinforced PEEK to provide apatite-forming ability to the bioinert carbon fiber-reinforced PEEK. Furthermore, the bioactivity of the carbon fiber-reinforced PEEK treated with apatite nuclei was evaluated from a viewpoint of an in vivo perspective.

研究分野：無機材料化学、生体材料学

キーワード：炭素繊維強化ポリエーテルエーテルケトン アパタイト核 生体活性 アパタイト形成能 骨結合能

1. 研究開始当初の背景

炭素繊維を添加してポリエーテルエーテルケトン (PEEK) を補強した炭素繊維強化 PEEK は、PEEK の機械的強度を強化するのみならず、皮質骨と同等の弾性率を示す。したがって CFR-PEEK は、金属製人工骨の際に生じるストレスシールドイングを克服し、かつ高い比強度 (軽量かつ高強度) を有する新世代の人工骨材料として、幅広い臨床応用への展開が期待できる。材料に重金属を含まないため金属アレルギーの懸念が極めて低く、生体への安全性が高い。しかも磁性を持たないため X 線透過性に優れ、チタンをはじめ従来の金属製人工骨でしばしば問題となっている、金属アーチファクトによる MRI 画像診断の障害を回避する点も見逃せない。一方で、炭素繊維強化 PEEK は骨と自発的に結合する性質を持たないため、材料の表面で早期に新生骨を自発的に形成し、材料が長期にわたり安定して骨と一体化するための新たな表面構造制御プロセスの構築が求められている。

2. 研究の目的

卓越した物性を有する炭素繊維強化 PEEK において上記の課題が克服できれば、金属に匹敵する機械的強度、ストレスシールドイングの低減、金属アレルギーの回避、良好な骨結合能力を併せ持つ、いまだ実現されていない物性の材料の開発につながり、整形外科および歯科領域における大きなブレイクスルーとなる可能性を秘めている。

擬似体液 (SBF) [1] の温度および pH を上昇させると、均一核形成によりアモルファスリン酸カルシウム微粒子が析出する。我々はこれをアパタイト核と名付け、これまでの研究において SBF 中でアパタイト核が骨の主要成分であるアパタイトの形成を高活性に誘起するため、生体不活性材料表面近傍にアパタイト核を担持することで生体活性付与が可能であることを見出した[2]。さらに我々は、細孔を形成した PEEK の表面近傍にアパタイト核を析出させた生体活性 PEEK を開発した[3,4]。本研究では、炭素繊維強化 PEEK 表面にアパタイト核を析出させることで、生体不活性な炭素繊維強化 PEEK へのアパタイト形成能付与を行った。さらに、アパタイト核処理による炭素繊維強化 PEEK の生体活性について *in vivo* の観点から検証した。

3. 研究の方法

(1) 材料作製

炭素繊維が 50wt% 充填された炭素繊維強化 PEEK サンプル (15 mm×10 mm×2 mm) を研磨および洗浄して乾燥させた後、濃硫酸に浸漬した。その後、グロー放電によって O₂ プラズマを照射した。血漿中と類似の濃度の Ca イオンや HPO₄²⁻ イオン等を含む水溶液を作製し、25 °C で pH=8.2 に調整した。プラズマ処理後の基板をただちに上述の水溶液に浸漬し、70 °C の恒温槽にて 24 時間静置することでアパタイト核を基板表面近傍に析出させた。比較のため、炭素繊維が添加されていない PEEK 基板 (15 mm×10 mm×2 mm) を用いて同様の操作を行った。未処理、硫酸処理後、グロー放電処理後、アパタイト核処理後の各段階における基板および SBF 浸漬後の基板表面について、X 線光電子分光分析装置 (XPS)、接触角計、

電界放出型走査電子顕微鏡 (FE-SEM)、エネルギー分散型 X 線分析装置 (EDX)、薄膜 X 線回折装置 (TF-XRD)、フーリエ変換赤外分光光度計 (FT-IR) を用いて分析した。

(2) アパタイト形成能評価

各処理段階の PEEK サンプルおよび炭素繊維強化 PEEK サンプルを生理的 pH (36.5 °C、pH=7.40) に調整した SBF 中に浸漬し、擬似体液中におけるアパタイト形成能を評価した。SBF 浸漬後の基板表面について、FE-SEM、EDX、TF-XRD、FT-IR を用いて分析した。

(3) 骨結合能評価

以後、何も処理を施していない炭素繊維強化 PEEK 基板を「未処理サンプル」、硫酸処理、酸素プラズマ処理、アパタイト核処理のすべてを行った炭素繊維強化 PEEK 基板を「生体活性処理サンプル」と表記する。未処理サンプル、生体活性処理サンプルを日本白色家兔 (オス、3 kg 程度) 8 羽の脛骨に埋入した。1 羽に対して左右それぞれに未処理サンプル、生体活性処理サンプルを埋入し、4 週、8 週経過後に Sacrifice し評価を行った。8 羽すべてに対してマイクロ CT を用いて新生骨の Total volume の評価を行った。その後、4 羽については Detaching test による力学的評価を行い、4 羽については組織学的評価を行い、サンプルと新生骨との界面の評価を行うため、接触率 (BIC) を計測した。

4. 研究成果

(1) 材料作製

FE-SEM による観察から、硫酸処理によって孔径 500 nm 程度の細孔が炭素繊維強化 PEEK 基板表面全体に形成されたことが分かった。XPS による分析から、硫酸処理によってスルホ基の導入、それに次ぐ酸素プラズマ処理によってスルホ基量の増加およびカルボキシ基の導入が認められた。アパタイト核処理後の基板では、XPS、FT-IR、EDX による分析から Ca と P が検出され、FE-SEM では粒子状物質の析出が観察された。また、炭素繊維強化 PEEK 基板に代えて PEEK 基板を用いても同様の結果が得られた。以上の結果から、硫酸処理、酸素プラズマ処理およびアパタイト核処理を施すことで、PEEK 基板および炭素繊維強化 PEEK 基板の表面にアパタイト核が形成されたことが示された。さらに、接触角測定から、未処理基板および硫酸処理後の基板は疎水性、酸素プラズマ処理後およびアパタイト核処理後の基板は親水性であることがわかった。

(2) アパタイト形成能評価

硫酸処理、プラズマ処理、アパタイト核処理を経た炭素繊維強化 PEEK 基板を SBF に浸漬したところ、浸漬 1 日後に鱗片状結晶が基板表面全体を覆っている様子が FE-SEM から観察された。EDX 分析では SBF 浸漬前と比べて Ca と P のピーク強度の顕著な増大が確認された。TF-XRD 測定では、浸漬 1 日後にアパタイトの回折ピークが検出された。また、炭素繊維強化 PEEK 基板に代えて PEEK 基板を用いても同様の結果が得られた。これらの結果から、硫酸処理、プラズマ処理、アパタイト核析出処理を順次施した PEEK 基板および炭素繊維強化 PEEK 基板は、SBF 中で 1 日以内にアパタイト形成能を発現することが示唆された。

(3) 骨結合能評価

炭素繊維強化 PEEK 基板を用いて作製した「未処理サンプル」および「生体活性処理サンプル」を日本白色家兔脛骨に埋入したところ、埋入後 4 週、8 週ともに、生体活性処理サンプルで有意差をもって新生骨の体積が多かった（4 週：未処理サンプル 16.0%/生体活性処理サンプル 20.6%、8 週：未処理サンプル 10.1%/生体活性処理サンプル 18.5%）。しかし、生体活性処理サンプル、未処理サンプルともに埋入後 4 週よりも 8 週で体積が有意に減少していた。Detaching test では埋入後 4 週、8 週ともに生体活性処理サンプルで有意に破断強度が高かった（4 週：未処理サンプル 3.3 N/生体活性処理サンプル 15.5 N、8 週：未処理サンプル 3.2 N/生体活性処理サンプル 28.7 N）。生体活性処理サンプルでは埋入後 4 週から 8 週にかけて有意に破断強度の向上がみられたのに対して、未処理サンプルでは破断強度に有意差は見られなかった。BIC については埋入後 4 週時には両者に有意差がみられなかった（未処理サンプル 16.8%、生体活性処理サンプル 16.4%）。8 週では生体活性処理サンプルでは 4 週と有意差がみられずほぼ同等の結果であったのに対して、未処理サンプルでは大幅に BIC が低下した（未処理サンプル 3.6%、生体活性処理サンプル 7.9%）。炭素繊維強化 PEEK に対してアパタイト核処理を行うことにより、未処理サンプルのものに対して骨との間に結合強度の向上を認めた。一方で、埋入後の経時的に処理群の結合強度が上昇するにも関わらず新生骨の体積は減少するため、新生骨の体積と骨との結合強度に必ずしも比例関係がみられるわけではないことがわかった。サンプルと新生骨の BIC については未処理サンプルでは経時的に減少した一方で、生体活性処理サンプルでは維持された。未処理サンプルではサンプル界面の新生骨が経時的に吸収されるのに対して、アパタイト核処理はこれを防ぐ働きをすることが示唆された。

<引用文献>

- [1] T. Kokubo, H. Takadama, “How useful is SBF in predicting in vivo bone bioactivity?”, *Biomaterials*, **27**, 2907-2915 (2006).
- [2] T. Yao, M. Hibino, T. Yabutsuka, “Method of producing bioactive complex material”, *Japanese Patent 5252399* (2013), *U.S. Patent 8512732* (2013).
- [3] T. Yabutsuka, K. Fukushima, T. Hiruta, S. Takai, T. Yao, “Effect of pores formation process and oxygen plasma treatment to hydroxyapatite formation on bioactive PEEK prepared by incorporation of precursor of apatite”, *Mater. Sci. Eng. C*, **81**, 349-358 (2017).
- [4] T. Yabutsuka, K. Fukushima, T. Hiruta, S. Takai, T. Yao, “Fabrication of Bioactive Fiber-reinforced PEEK and MXD6 by Incorporation of Precursor of Apatite”, *J. Biomed. Mater. Res. B*, **106**, 2254-2265 (2018).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Masamoto Kazutaka, Fujibayashi Shunsuke, Yabutsuka Takeshi, Hiruta Tomoko, Otsuki Bungo, Okuzu Yaichiro, Goto Koji, Shimizu Takayoshi, Shimizu Yu, Ishizaki Chihiro, Fukushima Keito, Kawai Toshiyuki, Hayashi Makoto, Morizane Kazuaki, Kawata Tomotoshi, Imamura Masashi, Matsuda Shuichi	4. 巻 91
2. 論文標題 In vivo and in vitro bioactivity of a “precursor of apatite” treatment on polyetheretherketone	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Acta Biomaterialia	6. 最初と最後の頁 48 ~ 59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actbio.2019.04.041	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 Yamane Yuya, Yabutsuka Takeshi, Takaoka Yusuke, Ishizaki Chihiro, Takai Shigeomi, Fujibayashi Shunsuke	4. 巻 14
2. 論文標題 Surface Modification of Carbon Fiber-Polyetheretherketone Composite to Impart Bioactivity by Using Apatite Nuclei	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials	6. 最初と最後の頁 6691 ~ 6691
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ma14216691	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 藪塚武史	4. 巻 74
2. 論文標題 アパタイト核を用いた表面改質によるバイオイナート材料への生体活性機能付与	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ニューセラミックスレター	6. 最初と最後の頁 3 ~ 7
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 無
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 藪塚武史	4. 巻 74
2. 論文標題 骨修復を目的とした生体活性材料の開発 アパタイト核析出と硫酸処理による細孔形成の影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 硫酸と工業	6. 最初と最後の頁 43 ~ 54
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 無
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 YABUTSUKA Takeshi	4. 巻 67
2. 論文標題 Materials Design for Bioactive Function by Surface Modification with Apatite Nuclei	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy	6. 最初と最後の頁 252 ~ 257
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2497/jjspm.67.252	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 Chihiro Ishizaki, Takeshi Yabutsuka, Shigeomi Takai	4. 巻 31
2. 論文標題 Impartation of Apatite Forming Ability to Bioinert Carbon Nanotube-PEEK	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Bioceramics	6. 最初と最後の頁 30-35
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 Chihiro Ishizaki, Takeshi Yabutsuka, Shigeomi Takai	4. 巻 11
2. 論文標題 Development of Apatite Nuclei Precipitated Carbon Nanotube-Polyether Ether Ketone Composite with Biological and Electrical Properties	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Coatings	6. 最初と最後の頁 191
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/coatings10020191	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 数塚武史	4. 巻 95
2. 論文標題 アパタイト核析出法による生体活性機能材料の創製	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phosphorus Letter	6. 最初と最後の頁 16-26
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 無
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21件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 山根侑也, 藪塚武史, 高岡佑輔, 藤林俊介, 石崎千尋, 高井茂臣, 松田秀一
2. 発表標題 グロー放電処理によるポリエーテルエーテルケトンの表面状態変化およびアパタイト形成能に与える影響
3. 学会等名 第15回日本セラミックス協会関西支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山根侑也, 藪塚武史, 高岡佑輔, 藤林俊介, 高井茂臣, 松田秀一
2. 発表標題 化学処理を施した炭素繊維強化ポリエーテルエーテルケトンの表面状態変化とアパタイト形成能
3. 学会等名 日本セラミックス協会第34回秋季シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藪塚武史
2. 発表標題 アパタイト核を用いた表面改質による先進セラミックバイオマテリアルの開発
3. 学会等名 日本セラミックス協会第34回秋季シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山根侑也, 藪塚武史, 高岡佑輔, 高井茂臣, 藤林俊介
2. 発表標題 アパタイト核による表面改質処理を施した炭素繊維強化ポリエーテルエーテルケトンの生体活性評価
3. 学会等名 第40回日本バイオマテリアル学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高岡佑輔, 藤林俊介, 藪塚武史, 山根侑也, 後藤公志, 大槻文悟, 河井利之, 清水孝彬, 奥津弥一郎, 池田周正, 織田和樹, 池崎龍仁, 本田新太郎, 松田秀一
2. 発表標題 アパタイト核処理を行った炭素繊維強化PEEKの骨結合能について
3. 学会等名 日本バイオマテリアル学会関西ブロック第16回若手研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山根 侑也, 藪塚 武史, 高岡 佑輔, 高井 茂臣, 藤林 俊介
2. 発表標題 アパタイト核担持による炭素繊維強化ポリエーテルエーテルケトンへのアパタイト形成能付与
3. 学会等名 第24回生体関連セラミックス討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高岡佑輔, 藤林俊介, 藪塚武史, 山根侑也, 後藤公志, 大槻文悟, 河井利之, 清水孝彬, 奥津弥一郎, 池田周正, 織田和樹, 池崎龍仁, 本田新太郎, 松田秀一
2. 発表標題 アパタイト核処理を行った炭素繊維強化PEEKの骨結合能について
3. 学会等名 第40回整形外科バイオマテリアル研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藪塚武史
2. 発表標題 アパタイト核処理による表面改質を行った炭素繊維強化PEEKのアパタイト形成能
3. 学会等名 日本歯科理工学会第75回春期学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藪塚武史, 石崎千尋, 昼田智子, 正本和誉, 高岡佑輔, 藤林俊介, 山根侑也, 高井茂臣, 松田秀一
2. 発表標題 アパタイト核処理による表面改質を施した生体活性ポリエーテルエーテルケトンのアパタイト形成能および骨結合能
3. 学会等名 日本セラミックス協会第33回秋季シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山根侑也, 藪塚武史, 高井茂臣
2. 発表標題 アパタイト核担持による表面改質を施したポリエーテルエーテルケトンのアパタイト形成能およびグロー放電処理の影響
3. 学会等名 第29回無機リン化学討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山根侑也, 藪塚武史, 高井茂臣
2. 発表標題 アパタイト核を担持したポリエーテルエーテルケトンのアパタイト形成能評価およびグロー放電処理が与える影響
3. 学会等名 日本バイオマテリアル学会関西ブロック第15回若手研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藪塚武史, 石崎千尋, 昼田智子, 正本和誉, 藤林俊介, 福島啓斗, 高井茂臣, 松田秀一
2. 発表標題 ポリエーテルエーテルケトンへのアパタイト形成能付与による低弾性率型生体活性骨修復材料の創製
3. 学会等名 第14回日本セラミックス協会関西支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石崎千尋, 藪塚武史, 高井茂臣
2. 発表標題 導電性CNT / PEEK複合材料へのアパタイト形成能付与による新規人工骨材料の開発
3. 学会等名 第14回日本セラミックス協会関西支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石崎千尋, 藪塚武史, 高井茂臣
2. 発表標題 生体類似環境下でヒドロキシアパタイト形成を誘起するCNT-PEEKの開発
3. 学会等名 日本バイオマテリアル学会関西ブロック第14回若手研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石崎千尋, 藪塚武史, 高井茂臣
2. 発表標題 生体類似環境下でアパタイト形成能を発現する生体活性カーボン複合PEEKの作製
3. 学会等名 第28回無機リン化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chihiro Ishizaki, Takeshi Yabutsuka, Shigeomi Takai
2. 発表標題 Development of Novel Artificial Bone Material by Imparting Bioactivity to Carbon Nanotube-PEEK Composite
3. 学会等名 The 13th Pacific Rim Conference of Ceramic Societies (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chihiro Ishizaki, Takeshi Yabutsuka, Shigeomi Takai
2. 発表標題 Development of Novel Artificial Bone Material by Imparting Bioactivity to Carbon Nanotube-PEEK Composite
3. 学会等名 The 31st Symposium & Annual Meeting of the International Society for Ceramics in Medicine (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石崎千尋, 藪塚武史, 昼田智子, 正本和誉, 藤林俊介, 福島啓斗, 高井茂臣, 松田秀一
2. 発表標題 ポリエーテルエーテルケトンおよびカーボンナノチューブ複合体への生体活性付与
3. 学会等名 第9回日本セラミックス協会関東支部若手研究発表交流会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藪塚武史, 石崎千尋, 昼田智子, 正本和誉, 藤林俊介, 福島啓斗, 高井茂臣, 松田秀一
2. 発表標題 ポリエーテルエーテルケトンへのアパタイト形成能付与による生体活性インプラント材料の開発
3. 学会等名 第23回生体関連セラミックス討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chihiro Ishizaki, Takeshi Yabutsuka, Shigeomi Takai
2. 発表標題 Effect of Precursors of Apatite on Apatite-forming Ability of Carbon Nanotube-PEEK Composite
3. 学会等名 The 19th Asian BioCeramics Sympisium and 2019 International Symposium of Materials for Biomedical Application (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 数塚武史, 石崎千尋, 高井茂臣
2. 発表標題 アパタイト核処理を行った炭素繊維強化ポリエーテルエーテルケトンのアパタイト形成能
3. 学会等名 日本セラミックス協会2020年年会
4. 発表年 2020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	藤林 俊介 (Shunsuke Fujibayashi) (30362502)	京都大学・医学研究科・特定教授 (14301)	
研究分担者	高井 茂臣 (Takai Shigeomi) (10260655)	京都大学・エネルギー科学研究科・准教授 (14301)	

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
---------	---------