

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 9 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01158

研究課題名(和文) 重金属類汚染修復に向けたハイパーアキュムレーターの機能解明とその応用

研究課題名(英文) Elucidation and application of hyperaccumulating functions of plants towards remediation of heavy metals contamination

研究代表者

井上 千弘 (Inoue, Chihiro)

東北大学・環境科学研究科・教授

研究者番号：30271878

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,500,000円

研究成果の概要(和文)：ヒ素の高蓄積植物(ハイパーアキュムレーター)であるモエジマシダとカドミウムの高蓄積植物であるハクサンハタザオに関し、有害元素(ヒ素あるいはカドミウム)のストレス下での植物器官別の遺伝子発現解析、植物体内に吸収された有害元素の植物組織あるいは器官別のマッピングと化学形態の解析、ポジトロン核種を利用した有害元素吸収時における植物体内での動態解析を行い、これらのハイパーアキュムレーターの有害元素吸収・蓄積のメカニズムに対する理解を深化させた。また、これら高蓄積植物を用いた汚染土壌浄化の圃場試験のデータをネットワーク分析により解析して、浄化効率を向上させる要因を抽出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでヒ素やカドミウムをはじめとする高蓄積植物における有害元素の吸収メカニズムや体内での有害元素の化学形態はほとんど解明されておらず、本研究により世界に先駆けてその概要を明らかにした学術的意義は大きい。また有害元素による土壌汚染は世界中で顕在化しているが、モエジマシダやハクサンハタザオなどの高蓄積植物を利用するファイトレメディエーションの手法は低コストで実施可能であるため、持続可能な環境修復技術として今後の発展が期待されている。本研究の成果はファイトレメディエーションの適用に対する理論的裏付けを与えるものであり、その社会的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：Following results were obtained with regard to the arsenic-hyperaccumulating plant *Pteris vittata* and the cadmium-hyperaccumulating plant *Arabidopsis halleri* ssp. *gemmifera*. Gene expression analysis of each plant organ under the stress of toxic elements (arsenic or cadmium), two-dimensional mapping and chemical morphology analysis of each toxic elements absorbed by the plants, and dynamics of both elements in the hyperaccumulating plants using Positron Emitting Tracer Imaging System are deepened our understanding of the mechanism of uptake and accumulation of toxic elements in these hyperaccumulator. In addition, network analysis of the field trial data of phytoremediation using these hyperaccumulating plants extracted the factors that improve the remediation efficiency.

研究分野：生物による環境修復

キーワード：ハイパーアキュムレーター 重金属汚染 遺伝子発現解析 元素マッピング PETIS ネットワーク解析

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

自ら移動することができない植物は、環境中で生存するために様々な能力を獲得してきた。そういった植物の持つ能力を今日の環境問題の解決に利用していく概念が「ファイトテクノロジー」である。ファイトテクノロジーに関する唯一の国際学会組織である International Phytotechnology Society (IPS) では、ファイトテクノロジーを、植物を戦略的に利用することにより、土壌、水、大気の質的、量的な修復、および生態系を復旧することによって環境問題を解決する技術と定義している (<http://phytosociety.org/>)。しかし世界的に見ても植物の機能を利用した環境修復技術はまだ黎明期と言える状況であり、人工湿地による鉱山廃水処理などでの実用例は見られるものの、本格的な展開はこれからの段階にある。

我が国において有害物質で汚染された土壌の浄化には、汚染土壌を全量掘削して別の場所に運搬して処理する掘削除去法が適用される事例が多いが、汚染土壌 1m³あたり 5 万円もの浄化コストがかかるため、莫大な対策費用を要することになる。掘削除去法を主要な浄化方法とした東京都の豊洲市場予定地の土壌汚染対策費用は約 1000 億円にも及んでいる。

植物に機能を利用して汚染土壌を浄化する「ファイトレメディエーション」は、掘削除去法の数分の一の処理費用で汚染土壌の浄化が可能なる方法として期待されている。しかしながら、ファイトレメディエーションの土壌汚染浄化への適用はまだ限定的な状況である。その理由はいくつか考えられるが、最大の理由は植物が保有する機能がまだ十分に解明されておらず、したがって植物が保有する潜在能力を活用できていないところにある。例えば本研究で取り上げるヒ素のハイパーアキュムレーターのモエジマシダ (*Pteris vittata* L.) は、ヒ素を最大 2% (20 g/kg-植物乾燥重量) の濃度まで蓄積する能力を有するが、実際のヒ素汚染土壌で生育させた場合はその濃度の数%程度しかヒ素を吸収しないことが多い。またカドミウムを最大 0.6% (6 g/kg-植物乾燥重量) まで蓄積する能力を有するハクサンハタザオ (*Arabidopsis halleri* ssp. *gemmifera*) も同様の傾向を示す。

これらのハイパーアキュムレーター (モエジマシダとハクサンハタザオ) は実験室の環境において水耕栽培で生育させた場合には体内に極めて高濃度の有害元素を蓄積させるにもかかわらず障害なく成長を続ける。ヒ素やカドミウムは植物細胞にとって極めて有害な物質にもかかわらず、なぜ高濃度の有害元素が体内に蓄積可能なのかを説明する合理的なメカニズムは提案されていない。また、上述のハイパーアキュムレーターを実汚染土壌で栽培した場合に、有害元素が高レベルで体内に蓄積されないのか理由が明らかでない。これらの未解明点がハイパーアキュムレーターを土壌汚染修復に活用する際の制約ともなっており、その解明は学術的にも重要な課題であることから本研究を提案した。

2. 研究の目的

本研究では 2 種類のハイパーアキュムレーター (モエジマシダとハクサンハタザオ) に関し、有害元素 (ヒ素とカドミウム) の吸収・蓄積機能を遺伝子レベルから圃場の植物レベルまで多层次的な解析を行い、これらのハイパーアキュムレーターの有害元素吸収・蓄積のメカニズムを解明するとともに、これらのハイパーアキュムレーターを重金属類汚染修復に応用する上での指針を示すことを目的とした。

3. 研究の方法

3. 1. 有害元素吸収・耐性に関する機能遺伝子の同定と発現解析

モエジマシダの水耕栽培の培地にヒ素をスパイクした後、植物体をいくつかの部位に分割し各部位から RNA を抽出して各遺伝子の発現解析を行った。ハクサンハタザオに関してカドミウムと亜鉛をスパイクし同様の実験を行った。植物の根と葉を採取し、各遺伝子の発現部位と発現量、その発現時期を検討した。

3. 2. ハイパーアキュムレーターに吸収された元素の局在性イメージング

ハクサンハタザオの生体試料を用いて Cd の取り込みと分布、細胞内局在、Cd の種分化、および金属キレート化合物であるグルタチオン (GSH) とフィトケラチン (PC) を経時解析で評価し、Cd の過剰蓄積メカニズムへの関与を明らかにした。モエジマシダの凍結薄層切片を作成し、高分解能電子プローブ微小分析器 (EPMA) により細胞質・細胞間液に存在する有害元素イオンの細胞レベルでのイメージングを試みた。

3. 3. ハイパーアキュムレーター内の有害元素の動態解析

ポジトロンイメージング技術 (Positron Emitting Tracer Imaging System, PETIS) を用いハイパーアキュムレーターが生きたままの状態のカドミウムやヒ素がどの器官を經由して最終的にどの部位に蓄積するのかを詳細に解析した。ヒ素のポジトロン核種 (⁷⁴As) とカドミウムのポジトロン核種 (¹⁰⁷Cd) は東北大学サイクロトロンラジオアイソトープセンター (CYRIC) で作成

した。ヒ素に関しては ^{74}As でラベルしたヒ酸 (AsO_4^{3-}) のみを分離精製したのち実験に供した。

3. 4. 実圃場データの統計数理解析

宮城県内の複数の圃場で3年間にわたりモエジマシダを栽培して、土壌からのヒ素の除去を検討した結果を用い、ネットワーク解析の手法で解析し、土壌から植物体への有害元素の移行に対しての本質的な法則性や規範を考察・検討した。

4. 研究成果

4. 1. 有害元素吸収・耐性に関する機能遺伝子の同定と発現解析

4. 1. 1 モエジマシダ

モエジマシダの保有する As 耐性にかかわる 3 つの遺伝子 (PvPht1;3、リン酸 (ヒ酸) 輸送遺伝子、PvACR2、AsV 還元酵素遺伝子、PvACR3、AsIII 輸送遺伝子) の根に発現に焦点を当てた検討を行った結果、根に取り込まれた As の 99 % が AsIII に還元され、根茎に輸送された As の 85 % は AsIII として存在し、葉に蓄積された As の 74 % は AsIII で存在する状況下で、PvPht1;3 の転写は低濃度の AsV によって一時的に誘導され、高濃度の AsV では全期間にわたって転写の誘導が維持された。一方、PvACR2 は AsV により誘導されず構成的に発現しており、PvACR3 は低濃度の AsV により直ちに誘導された (図 1)。PvPht1;3 による敏感な AsV 吸収、PvACR2 構成的な AsV の還元、およびその後の PvACR3a による AsIII 輸送の 3 つの遺伝子産物の連携がモエジマシダの As の過剰蓄積に寄与することが示された。

4. 1. 2 ハクサンハタザオ

ハクサンハタザオの近縁植物であるシロイヌナズナの Zn 輸送体として知られる HMA4 と IRT3 に焦点を当て、Cd/Zn 処理下でのハクサンハタザオにおけるこれらの遺伝子の転写を検討した。HMA4 の転写量は、いずれの処理下でも 7 日後に 3 倍増加しており、ハクサンハタザオの葉の Cd/Zn の輸送への役割が示された。IRT3 は、Cd または Zn の単一処理下では根と葉の両方で持続的に発現されたが、Cd と Zn を組み合わせた処理下では発現量が 50 分の 1 に低下した (図 2)。この際に、細胞内の遊離亜鉛イオンが増加しており、両金属の存在下での葉における亜鉛恒常性の新たな機構が示唆された。さらに、Cd/Zn の取り込みと蓄積との間に競合がないことから、ハクサンハタザオにおける Cd と Zn の独立した輸送システムの存在が示唆された。

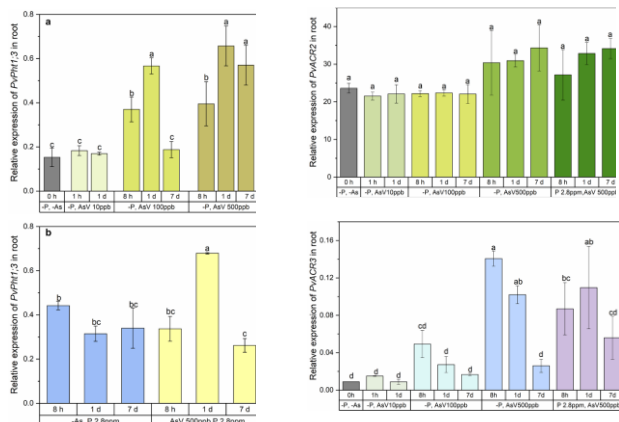


図 1 モエジマシダにおける PvPht1;3、PvACR2、PvACR3 遺伝子の発現解析結果

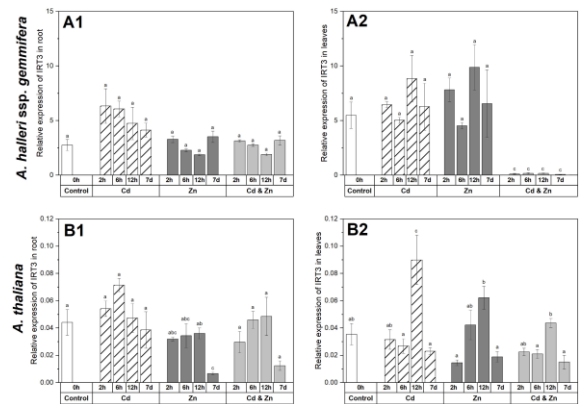


図 2 ハクサンハタザオにおける Zn/Cd 処理下での IRT3 遺伝子の発現解析結果

4. 2. ハイパーアキュムレーターに吸収された元素の局在性イメージング

ハクサンハタザオに低濃度の Cd を投与した場合、336 時間でこの植物に完全に吸収された。根の Cd 量と比較して、茎と葉にはより多くの Cd が蓄積した。上部に輸送されている過剰な Cd は、大部分が可溶性の画分 (エタノールおよび水抽出可能な形態) 中に存在した。一方、金属錯体形成化合物としての GSH と PC は、細胞内の Cd 量と比べてごく少量しか合成されておらず、その Cd 無毒化への役割は小さいと推定された。したがって、ハクサンハタザオにおける Cd の過剰蓄積には、チオール錯体形成よりも液胞や細胞外空間への Cd の隔離が効果を発揮していると考えられた。また、As を吸収させたモエジマシダの凍結切片を作成し、高分解能 EPMA で元素マッピングを行った結果、蓄積されたヒ素が主として細胞外に局在することを明らかにした。

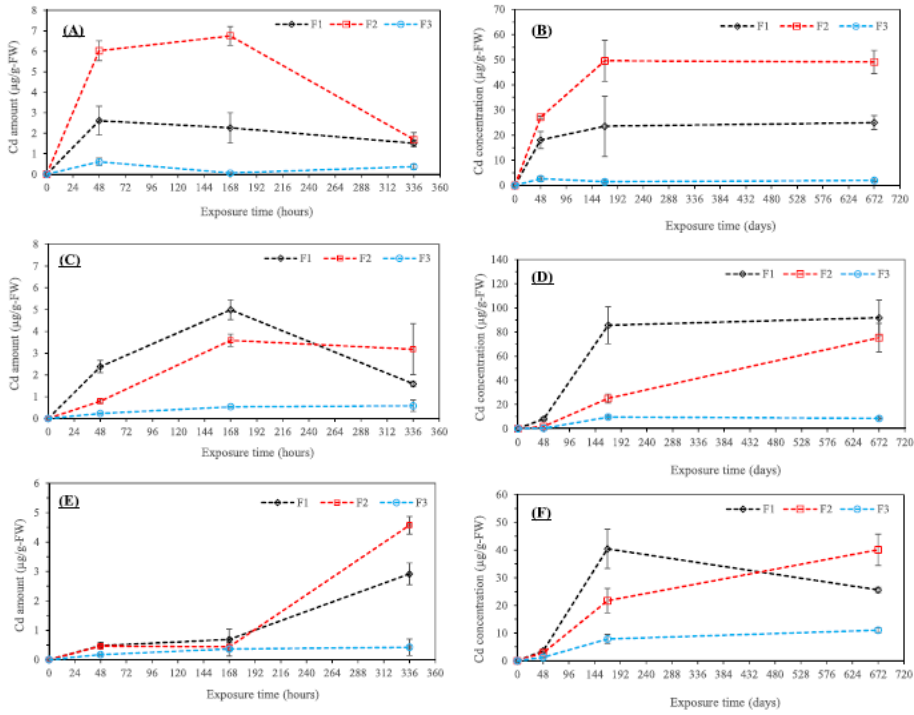


図3 ハクサンハタザオの根 (A,B)、茎 (C,D)、葉 (E,F) における各細分画 (F1 : 細胞膜・細胞壁、F2 : 可溶性画分、F3 : オルガネラ) 中の Cd 濃度

4. 3. ハイパーアキュムレーター内の有害元素の動態解析

ポジトロン核種 (^{74}As あるいは ^{107}Cd) をモエジマシダあるいはハクサンハタザオの水耕栽培液に加え、ポジトロンイメージング技術 (PETIS) を用いて、植物が生きたままの状態 で根から吸収させたポジトロン核種の植物体内移動と蓄積の過程を解析することに成功した (図4、図5)。

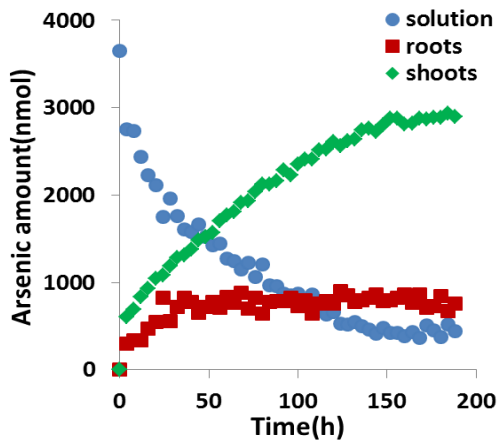


図4 PETIS によるモエジマシダのヒ素吸収過程の解析結果

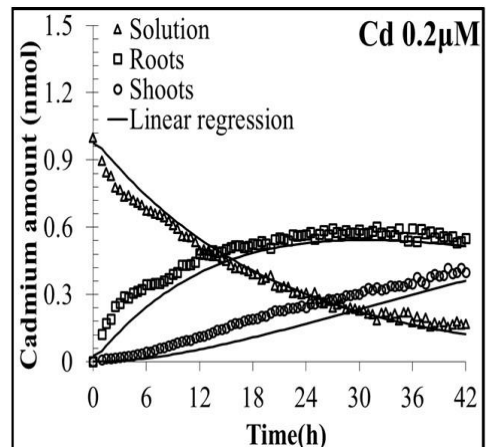


図5 PETIS によるハクサンハタザオのカドミウム吸収過程の解析結果

4. 4. 実圃場データの統計数理解析

ヒ素で汚染された実土壌にモエジマシダを定植した圃場試験で取得した植物体の分析データ、根圏の代謝産物データ、および土壌微生物の菌叢解析データについてベイジアンネットワークを利用したマルチオミクス解析を行った（図6）。その結果、モエジマシダのヒ素吸収の向上には亜硫酸酸化能力を有する土壌細菌と低窒素環境下で生育する土壌細菌の存在が強く相関していることが明らかになり（図7）、モエジマシダを用いたヒ素のファイトレメディエーションにおいては土壌中の窒素化合物濃度が重要な要因となるという新たな知見が得られた。実圃場データの統計数理解析は、ファイトレメディエーションの効率改善の方策を見出す上での有用なツールであることが示され、今後の進展が期待される。

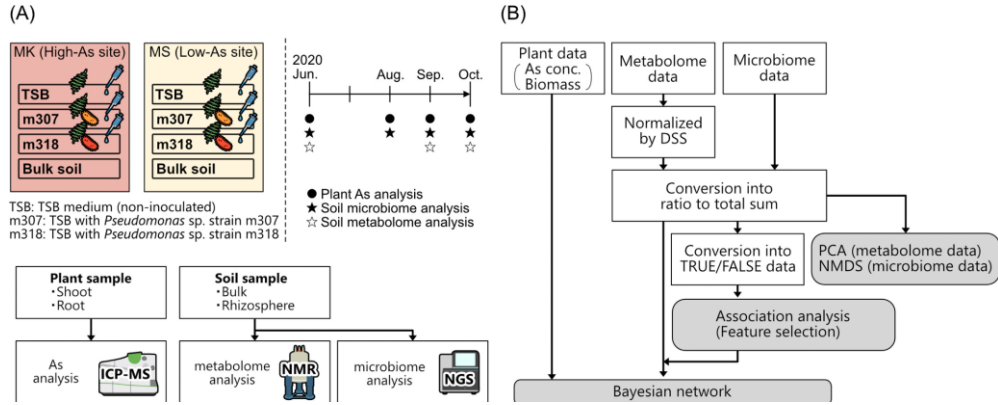


図6 実汚染土壌におけるヒ素吸収促進要因解明のためのマルチオミクス分析の流れ

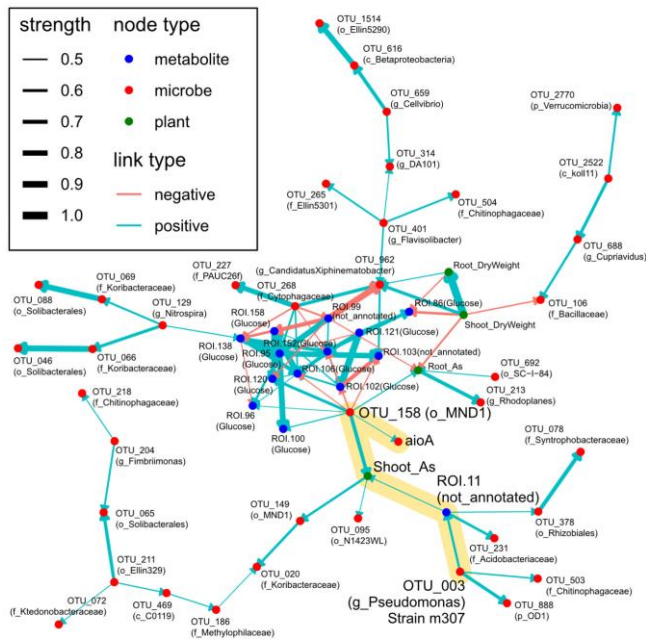


図7 モエジマシダによるヒ素吸収促進要因のベイジアンネットワーク

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計25件（うち査読付論文 25件／うち国際共著 8件／うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 Rahman Farzana, Sugawara Kazuki, Wei Shujun, Kohda Yi Huang-Takeshi, Chien Mei-Fang, Inoue Chihiro	4. 巻 56
2. 論文標題 Influence of low temperature on comparative arsenic accumulation and release by three <i>Pteris</i> hyperaccumulators	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Science and Health, Part A	6. 最初と最後の頁 1179 ~ 1188
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/10934529.2021.1970443	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 Wei Shujun, Kohda Yi Huang-Takeshi, Inoue Chihiro, Chien Mei-Fang	4. 巻 182
2. 論文標題 Expression of PvPht1;3, PvACR2 and PvACR3 during arsenic processing in root of <i>Pteris vittata</i>	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Environmental and Experimental Botany	6. 最初と最後の頁 104312 ~ 104312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.envexpbot.2020.104312	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 Kudo Hiroshi, Inoue Chihiro, Sugawara Kazuki	4. 巻 18
2. 論文標題 Effects of Growth Stage and Cd Chemical Form on Cd and Zn Accumulation in <i>Arabidopsis halleri</i> ssp. <i>gemmifera</i>	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Environmental Research and Public Health	6. 最初と最後の頁 4214 ~ 4214
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ijerph18084214	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 Kohda Yi Huang-Takeshi, Qian Zhaojie, Chien Mei-Fang, Miyauchi Keisuke, Endo Ginro, Suzui Nobuo, Yin Yong-Gen, Kawachi Naoki, Ikeda Hayato, Watabe Hiroshi, Kikunaga Hidetoshi, Kitajima Nobuyuki, Inoue Chihiro	4. 巻 11
2. 論文標題 New evidence of arsenic translocation and accumulation in <i>Pteris vittata</i> from real-time imaging using positron-emitting ⁷⁴ As tracer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Scientific Reports	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) 10.1038/s41598-021-91374-1	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 Doyama Kohei, Yamaji Keiko, Haruma Toshikatsu, Ishida Atsushi, Mori Shigeta, Kurosawa Yoko	4. 巻 16
2. 論文標題 Zn tolerance in the evergreen shrub, <i>Aucuba japonica</i> , naturally growing at a mine site: Cell wall immobilization, aucubin production, and Zn adsorption on fungal mycelia	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0257690
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0257690	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 Wiyono Christine Dwi A P, Inoue Chihiro, Chien Mei-Fang	4. 巻 2
2. 論文標題 HMA4 and IRT3 as indicators accounting for different responses to Cd and Zn by hyperaccumulator <i>Arabidopsis halleri</i> ssp. <i>gemma</i>	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plant Stress	6. 最初と最後の頁 100042 ~ 100042
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.stress.2021.100042	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 Nakamoto Yukihiko, Doyama Kohei, Haruma Toshikatsu, Lu Xingyan, Tanaka Kazuya, Kozai Naofumi, Fukuyama Kenjin, Fukushima Shigeru, Ohara Yoshiyuki, Yamaji Keiko	4. 巻 11
2. 論文標題 Fe, Mn and 238U Accumulations in <i>Phragmites australis</i> Naturally Growing at the Mill Tailings Pond; Iron Plaque Formation Possibly Related to Root-Endophytic Bacteria Producing Siderophores	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Minerals	6. 最初と最後の頁 1337 ~ 1337
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/min11121337	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 Han Ning, Yang Chongyang, Shimomura Shunya, Inoue Chihiro, Chien Mei-Fang	4. 巻 19
2. 論文標題 Empirical Evidence of Arsenite Oxidase Gene as an Indicator Accounting for Arsenic Phytoextraction by <i>Pteris vittata</i>	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Environmental Research and Public Health	6. 最初と最後の頁 1796 ~ 1796
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ijerph19031796	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 Lu Xingyan, Yamaji Keiko, Haruma Toshikatsu, Yachi Mitsuki, Doyama Kohei, Tomiyama Shingo	4. 巻 11
2. 論文標題 Metal Accumulation and Tolerance in <i>Artemisia indica</i> var. <i>maximowiczii</i> (Nakai) H. Hara. and <i>Fallopia sachalinensis</i> (F.Schmidt) Ronse Decr., a Naturally Growing Plant Species at Mine Site	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Minerals	6. 最初と最後の頁 806 ~ 806
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/min11080806	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 Kurosawa Yoko, Mori Shigeta, Wang Mofei, Ferrio Juan Pedro, Yamaji Keiko, Koyama Kohei, Haruma Toshikatsu, Doyama Kohei	4. 巻 36
2. 論文標題 Initial burst of root development with decreasing respiratory carbon cost in <i>Fagus crenata</i> Blume seedlings	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Plant Species Biology	6. 最初と最後の頁 146 ~ 156
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/1442-1984.12305	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 井上 千弘, 黄田 毅, 簡 梅芳	4. 巻 63
2. 論文標題 高蓄積植物を活用したヒ素とカドミウムのファイトレメディエーション	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 用水と廃水	6. 最初と最後の頁 725 ~ 731
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 山路恵子, 春間俊克, 土山紘平, 盧星燕, 中本幸弘	4. 巻 63
2. 論文標題 植物-微生物共生系を利用した鉱山跡地の植生再生の可能性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 用水と廃水	6. 最初と最後の頁 738 ~ 742
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 黒澤陽子, 王莫非, 森茂太, 春間俊克, 野路健太, 土山紘平, 山路恵子, 富山眞吾	4. 巻 67
2. 論文標題 鉱山集積場の緑化のための多様な植物の初期成長と呼吸特性の評価	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 環境資源工学	6. 最初と最後の頁 122 ~ 127
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 Kohda Yi Huang-Takeshi, Endo Ginro, Kitajima Nobuyuki, Sugawara Kazuki, Chien Mei-Fang, Inoue Chihiro, Miyauchi Keisuke	4. 巻 831
2. 論文標題 Arsenic uptake by <i>Pteris vittata</i> in a subarctic arsenic-contaminated agricultural field in Japan: An 8-year study	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science of The Total Environment	6. 最初と最後の頁 154830 ~ 154830
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2022.154830	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 Yang Chongyang, Han Ning, Inoue Chihiro, Yang Yu-Liang, Nojiri Hideaki, Ho Ying-Ning, Chien Mei-Fang	4. 巻 -
2. 論文標題 Rhizospheric plant-microbe synergistic interactions achieve efficient arsenic phytoextraction by <i>Pteris vittata</i>	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Hazardous Materials	6. 最初と最後の頁 128870 ~ 128870
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jhazmat.2022.128870	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 簡梅芳, 楊重陽, 魏書君, John Jewish A. Dominguez, Ho Ying-Ning, 井上千弘	4. 巻 21
2. 論文標題 微生物・植物による環境汚染浄化機構の解明とその応用 ヒ素のファイトエクストラクションおよび多環芳香族炭化水素のリゾデグラデーションを例として	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Biotechnology	6. 最初と最後の頁 1 ~ 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 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 Chongyang Yang; Ying-Ning Ho; Ryota Makita; Chihiro Inoue, Mei-Fang Chien	4. 巻 712
2. 論文標題 A multifunctional rhizobacterial strain with wide application in different ferns facilitates arsenic phytoremediation.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science of the Total Environment	6. 最初と最後の頁 134504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2019.134504	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 Chongyang Yang, Ying-Ning Ho, Ryota Makita, Chihiro Inoue, Mei-Fang Chien	4. 巻 190
2. 論文標題 Cupriavidus basilensis strain r507, a toxic arsenic phytoextraction facilitator, potentiates the arsenic accumulation by Pteris vittata.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Ecotoxicology and Environmental Safety	6. 最初と最後の頁 110075
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ecoenv.2019.110075	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 Chongyang Yang, Ying-Ning Ho, Chihiro Inoue, Mei-Fang Chien	4. 巻 740
2. 論文標題 Long-term effectiveness of microbe-assisted arsenic phytoremediation by Pteris vittata in field trials.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science of the Total Environment	6. 最初と最後の頁 140137
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2020.140137	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 Shujun Wei , Yi Huang-Takeshi Kohda , Chihiro Inoue , Mei-Fang Chien	4. 巻 182
2. 論文標題 Expression of PvPht1;3, PvACR2 and PvACR3 during arsenic processing in root of Pteris vittata	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Environmental and Experimental Botany	6. 最初と最後の頁 104312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.envexpbot.2020.104312	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 Hiroshi Kudo, Chihiro Inoue, Kazuki Sugawara	4. 巻 18
2. 論文標題 Effects of growth stage and Cd chemical form on Cd and Zn accumulation in <i>Arabidopsis halleri</i> ssp. <i>gemmifera</i> .	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Environmental Research and Public Health	6. 最初と最後の頁 4214
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/ijerph18084214	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 Yang Chongyang, Ho Ying-Ning, Makita Ryota, Inoue Chihiro, Chien Mei-Fang	4. 巻 190
2. 論文標題 Cupriavidus basilensis strain r507, a toxic arsenic phytoextraction facilitator, potentiates the arsenic accumulation by <i>Pteris vittata</i>	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Ecotoxicology and Environmental Safety	6. 最初と最後の頁 110075 ~ 110075
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ecoenv.2019.110075	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 Yang Chongyang, Ho Ying-Ning, Makita Ryota, Inoue Chihiro, Chien Mei-Fang	4. 巻 712
2. 論文標題 A multifunctional rhizobacterial strain with wide application in different ferns facilitates arsenic phytoremediation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science of The Total Environment	6. 最初と最後の頁 134504 ~ 134504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2019.134504	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 Chongyang Yang, Mei-Fang Chien, Ying-Ning Ho, Chihiro Inoue	4. 巻 10
2. 論文標題 Phosphorus- and iron-deficiency stresses affect arsenic accumulation and root exudates in <i>Pteris vittata</i>	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Environmental Science and Development	6. 最初と最後の頁 430 ~ 434
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 該当する

1. 著者名 Kudo Hiroshi, Han Ning, Yokoyama Daiki, Matsumoto Tomoko, Chien Mei-Fang, Kikuchi Jun, Inoue Chihiro	4. 巻 899
2. 論文標題 Bayesian network highlights the contributing factors for efficient arsenic phytoextraction by <i>Pteris vittata</i> in a contaminated field	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Science of The Total Environment	6. 最初と最後の頁 165654 ~ 165654
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scitotenv.2023.165654	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32件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 朴ソヨン・工藤宏史・黄田毅・簡梅芳・井上千弘・宮内啓介
2. 発表標題 ハクサンハタザオによる圃場レベルでのCd汚染土壌浄化
3. 学会等名 第26回地下水土壌汚染とその防止対策に関する研究集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 工藤宏史・韓凝・横山大稀・簡梅芳・菊地淳・井上千弘
2. 発表標題 環境診断に資する指標決定に向けたファイトレメディエーションにおけるデータサイエンス
3. 学会等名 第73回日本生物工学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Agni Lili Ariyanti, Mei-Fang Chien, Chihiro Inoue
2. 発表標題 Characterization of root exudates from <i>Arabidopsis halleri</i> ssp. <i>gemmifera</i> and its leaching potential for cadmium and zinc from contaminated soil
3. 学会等名 16th Joint Conference on Chemistry 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上 千弘、黄田 毅、銭 照杰、簡 梅芳、渡部 浩司、池田 隼人、菊永 英寿、北島 信行、鈴木 伸郎、尹 永根、河地 有木
2. 発表標題 PETISによる高蓄積植物体内における有害元素吸収過程の解析
3. 学会等名 QST高崎サイエンスフェスタ2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 韓 凝・楊 重陽・ホ インニン・楊玉良・簡 梅芳・井上 千弘
2. 発表標題 根圏メタボロミクス解析を起用したヒ素のファイトエキストラクション過程における代謝産物および代謝経路の調査
3. 学会等名 日本農芸化学会2021年度大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Chongyang Yang, Ning Han, Ying-Ning Ho, Yu-Liang Yang, Hideaki Nojiri, Mei-Fang Chien, Chihiro Inoue
2. 発表標題 The interactions between <i>Pteris vittata</i> and its rhizosphere contribute to As phytoextraction
3. 学会等名 日本農芸化学会2021年度大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 韓 凝, 竹岡拓人, 井上千弘, 簡 梅芳
2. 発表標題 機能的根圏細菌が多圃場におけるモエジマシダのヒ素ファイトエキストラクションに及ぼす影響の評価
3. 学会等名 環境バイオテクノロジー学会2021年度大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 簡梅芳, 魏書君, 森内良太, 井上千弘
2. 発表標題 RNA-seq によるモエジマシダのヒ素吸収・輸送に寄与する遺伝子の探索
3. 学会等名 環境バイオテクノロジー学会2021年度大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 簡梅芳
2. 発表標題 微生物・植物によるヒ素汚染浄化機構の解明とその応用
3. 学会等名 環境バイオテクノロジー学会2021年度大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 簡梅芳
2. 発表標題 環境調和型バイオテクノロジーの創出を目指した生物機能と生物間作用の解明
3. 学会等名 日本微生物学連盟理事会、日本学会議総合微生物科学分科会・IUMS 分科会・病原体学分科会合同会議（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 簡梅芳
2. 発表標題 Metal biotechnologies toward environmental conservation and sustainability
3. 学会等名 International Conference on Biotechnology and Healthcare Industry（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 簡梅芳
2. 発表標題 微生物・植物による環境調和型 バイオテクノロジーの創出と課題
3. 学会等名 理研-東北大科学技術ハブ共同研究プログラム採択課題によるシンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 N. Han, C. Yang, S. Shimomura, M.F. Chien, C. Inoue.
2. 発表標題 Characterization of arsenic accumulation and removal from two fields by <i>Pteris vittata</i>
3. 学会等名 International Phytotechnology Conference 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 韓 凝・楊 重陽・ホ インニン・楊玉良・簡 梅芳・井上 千弘
2. 発表標題 根圏メタボロミクス解析を起用したヒ素のファイトエクストラクション過程における代謝産物および代謝経路の調査
3. 学会等名 日本農芸化学会2021年度大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Chongyang Yang, Ning Han, Ying-Ning Ho, Yu-Liang Yang, Hideaki Nojiri, Mei-Fang Chien, Chihiro Inoue
2. 発表標題 The interactions between <i>Pteris vittata</i> and its rhizosphere contribute to As phytoextraction
3. 学会等名 日本農芸化学会2021年度大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kazuki Sugawara
2. 発表標題 Elucidation of Toxic Metal Tolerance and Heavy Metal Absorption Mechanisms in Hyperaccumulating Plants Using Visualization
3. 学会等名 UCSD-NCHU Joint Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 一尾 昂平, 菅原 一輝, 小川 人土, 加藤 茂, 鈴木 誠一
2. 発表標題 焼成温度および化学修飾が及ぼすモエジマシダbiocharのカドミウム及びヒ素吸着能への影響
3. 学会等名 資源・素材学会 2021年度春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山路恵子・春間俊克・中本幸弘・土山紘平・盧星燕・野路建太・升屋隼人・田中万也・田村憲司・小川 和義・森 茂太・黒澤 陽子・香西直文
2. 発表標題 鉱山跡地の自生植物と機能性微生物の相互作用の解明
3. 学会等名 第71回コロイドおよび界面化学討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山路恵子
2. 発表標題 休廃止鉱山集積場の緑化ガイドラインの紹介
3. 学会等名 環境資源工学会 Webシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 春間俊克・山路恵子・野路建太・土山紘平・盧星燕・升屋勇人・黒沢陽子・森茂太・富山眞吾
2. 発表標題 鉦山集積場に自生するススキが関与したアカマツ実生の生残要因の解明
3. 学会等名 日本生態学会第68回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Xingyan Lu・Keiko Yamaji・Toshikatsu Haruma・Kohei Doyama・Hayato Masuya
2. 発表標題 Elucidation of heavy metal tolerance in <i>Miscanthus sinensis</i> growing at a mine site, considering the interaction with root endophytic fungi.
3. 学会等名 日本生態学会第68回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡部千晴・山路恵子・土山紘平・春間俊克・升屋勇人
2. 発表標題 重金属環境に植林されたヒサカキの重金属耐性機構及び内生菌の機能と定着要因の解明
3. 学会等名 日本生態学会第68回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野路建太・春間俊克・山路恵子・土山紘平・盧星燕・升屋勇人・黒沢陽子・森茂太・富山眞吾
2. 発表標題 鉦山集積場に自生するススキ(<i>Miscanthus sinensis</i> Andersson)の金属耐性機構と内生菌の影響
3. 学会等名 日本生態学会第68回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 土山紘平・山路恵子・春間俊克・升屋勇人
2. 発表標題 鉱山跡地に自生するアオキの金属耐性と内生菌 <i>Pezicula ericae</i> の関与
3. 学会等名 日本生態学会第68回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Jiang Qi, Kenji Tamura, Maki Asano, Kenjin Fukuyama, Junko Takahashi, Keiko Yamaji
2. 発表標題 Macro and Micromorphological Characteristics of Soils under the Abandoned Fields of Mines, Ningyo-toge, Japan
3. 学会等名 日本ペトロロジー学会2021年度大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Xingyan Lu・Keiko Yamaji・Toshikatsu Haruma・Kohei Doyama・Hayato Masuya
2. 発表標題 Elucidation of heavy metal tolerance in <i>Miscanthus sinensis</i> growing at a mine site, considering root endophytic fungi
3. 学会等名 Livestock Waste 2020
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kohei Doyama・Keiko Yamaji・Toshikatsu Haruma
2. 発表標題 Heavy Metal Stress Tolerance in <i>Aucuba japonica</i> Thunb. Naturally Growing in Mine Site and the Possible Functions of Root Endophytic Fungi.
3. 学会等名 Livestock Waste 2020
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 Chongyang Yang, Ryota Makita, Mei-Fang Chien, Chihiro Inoue
2 . 発表標題 A field application of multi-functional rhizobacterium for elevating arsenic phytoremediation by <i>Pteris vittata</i> .
3 . 学会等名 16th International Phytotechnology Conference (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 C.D.A. Wiyono, M.F. Chien, C. Inoue
2 . 発表標題 Assessing HMA4, IRT3, NRAMP5 as Potential Cadmium Resistance Genes in a Hyperaccumulator Plant <i>Arabidopsis halleri</i> ssp. <i>gemmifera</i> .
3 . 学会等名 16th International Phytotechnology Conference (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Sugawara, H. Hayashi, S. Suzuki, C. Inoue
2 . 発表標題 Analysis of the localization of arsenic and major element in pinnae of <i>Pteris vittata</i>
3 . 学会等名 16th International Phytotechnology Conference (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Zao Jie Qian, Yi Huang-Takeshi Kohda, Mei-Fang Chien, Nobuyuki Kitajima, A. Kanayama, Chihiro Inoue
2 . 発表標題 Investigating the Influence of Temperature on Cadmium and Zinc Absorption of <i>Arabidopsis halleri</i> ssp. <i>Gemmiferain</i> Hydroponics
3 . 学会等名 16th International Phytotechnology Conference (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Shu Jun Wei, Mei-Fang Chien, J.J. Chang, Y.J. Lin, W.H. Li, Chihiro Inoue
2. 発表標題 Overexpression of PvPht1;3, PvACR2, and PvACR3 in yeast toward an understanding of arsenic hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i>
3. 学会等名 16th International Phytotechnology Conference (国際学会)
4. 発表年 2019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	山路 恵子 (Yamaji Keiko) (00420076)	筑波大学・生命環境系・教授 (12102)	
研究分担者	宮内 啓介 (Miyachi Keisuke) (20324014)	東北学院大学・工学部・教授 (31302)	
研究分担者	鈴井 伸郎 (Suzui Nobuo) (20391287)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用 研究所 放射線生物応用研究部・主幹研究員 (82502)	
研究分担者	簡 梅芳 (Chien Mei-fang) (20533186)	東北大学・環境科学研究科・助教 (11301)	
研究分担者	菅原 一輝 (Sugawara Kazuki) (60792405)	東京理科大学・工学部工業化学科・研究員 (32660)	

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	河地 有木 (Kawachi Naoki) (70414521)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所 放射線生物応用研究部・上席研究員 (82502)	
研究分担者	國頭 恭 (Kunito Takashi) (90304659)	信州大学・学術研究院理学系・教授 (13601)	

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