

令和 6 年 9 月 11 日現在

機関番号：11101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03659

研究課題名（和文）湧水の微生物硫酸還元反応有効エネルギー解析とそれに基づく新規地熱探査法の構築

研究課題名（英文）Analysis of energy available of microbial sulfate reduction reaction in spring water and development of new geothermal exploration method

研究代表者

井岡 聖一郎 (Ioka, Seiichiro)

弘前大学・地域戦略研究所・教授

研究者番号：40598520

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は地熱探査地域における低温湧水中の硫化水素が火山活動起源か微生物活動起源かの評価を行うために、1) 微生物硫酸還元反応が生じた地下水が流出しているのか、2) 硫酸還元微生物相は存在するのか、3) 微生物硫酸還元反応に必要な有効エネルギーは存在するのか、4) 湧水流域に有機態炭素は存在するのかについて調査し硫化水素の起源評価を試みた。方法として、湧水の硫酸イオンの安定同位体比分析、微生物群集組成解析、微生物硫酸還元反応有効エネルギー解析、有機態炭素濃度分析を実施した。その結果、本研究で対象としたpHが酸性の硫化水素を含む低温湧水では微生物群集解析等の微生物の解析の有効性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本は火山が多く地熱資源量も多いとされている。しかし、火山地域でかつ地熱探査地域における低温湧水の水質形成機構研究はその資源的、地熱兆候としての低評価から遅れている。そのような中、本研究では低温湧水に含まれる硫化水素の起源推定を試みた。酸性の低温湧水を対象にした結果、微生物硫酸還元反応有効エネルギー解析は反応に十分な有効エネルギー値を示した。一方、微生物群集解析等では微生物反応評価の有無に地域差があり、微生物硫酸還元反応が起きている場と起きていない場がある可能性が評価され、火山地域でかつ地熱探査地域における低温湧水に含まれる硫化水素には微生物硫酸還元反応起源もある可能性が示された。

研究成果の概要（英文）：To evaluate whether hydrogen sulfide in low-temperature spring water in geothermal exploration areas originates from volcanic activity or microbial activity, we performed research to determine 1) whether groundwater in which microbial sulfate reduction reactions have occurred is flowing out, 2) whether microbiota exist, 3) whether there is effective available energy for the microbial sulfate reduction reaction, and 4) whether organic carbon exists in the spring water outflow area. The methods used included stable isotope ratio analysis of sulfate ions in spring water, microbial community composition analysis, effective available energy analysis of microbial sulfate reduction reaction, and organic carbon concentration analysis. The results demonstrated the effectiveness of microbial analysis, such as microbial community analysis, in the acidic low-temperature spring water containing hydrogen sulfide targeted in this study.

研究分野：地熱水文学，地熱水文地球化学

キーワード：地熱探査 湧水 硫酸還元 微生物

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地熱発電は再生可能エネルギーの中で唯一地下資源を利用するため、気象に依存しない安定電源という利点を有している。その地熱発電を実施するための有望地(熱水や蒸気が賦存している地下断裂構造)を見つける探査法には、地質学的、地球化学的、地球物理学的探査があるが、これら一つだけで完結する探査法は存在しない。また、数多くの既存探査法を組み合わせる地熱資源探査を実施した場合においても有望地の発見に失敗する事例がある。したがって、これまでとは異なる様々な探査法の提案が必要であると考えられる。

2. 研究の目的

再生可能エネルギーの一つである地熱を利用した発電の有望地を見つけるためには、透視できない地下の熱水・蒸気が賦存している断層、割れ目からなる断裂構造の評価のために様々な探査を行う。熱水に含まれる火山活動由来の硫化水素が深部断裂の存在を示唆する重要な指標と考えられるが、地熱探査地域における低温湧水はこれまで探査においてあまり顧みられることもなく、そして低温湧水中の硫化水素の起源も不明瞭であった。そこで、低温湧水中の硫化水素が火山活動起源か微生物活動起源か判定させる新しい指標作りを行うことを目的として、1) 微生物硫酸還元反応が生じた地下水が湧水として流出しているのか、2) 硫酸還元微生物相は存在するのか、3) 微生物硫酸還元反応に必要な有効エネルギーは存在するのか、4) 湧水流出域に微生物硫酸還元反応における電子供与体として有機態炭素は存在するのか調査することにより、硫化水素の起源を評価する。

3. 研究の方法

本研究の研究対象地域として硫化水素を含有する低温湧水をすでに見出していた青森県下北半島に位置する陸奥燧岳の大赤川、小赤川流域を予定していた。しかしながら、研究初年度の2021年8月に発生した豪雨災害により陸奥燧岳の林道崩落等が起き、調査予定地の変更を余儀なくされた。そこで、研究初年度は青森市の北八甲田火山群を対象にして最初に硫化水素を含有する低温湧水の発見に努めた。その結果、二地域において硫化水素を含有する低温湧水の存在を確認でき、この二地域を中心に研究を実施することにした。二地域とも国有林であり、調査事前

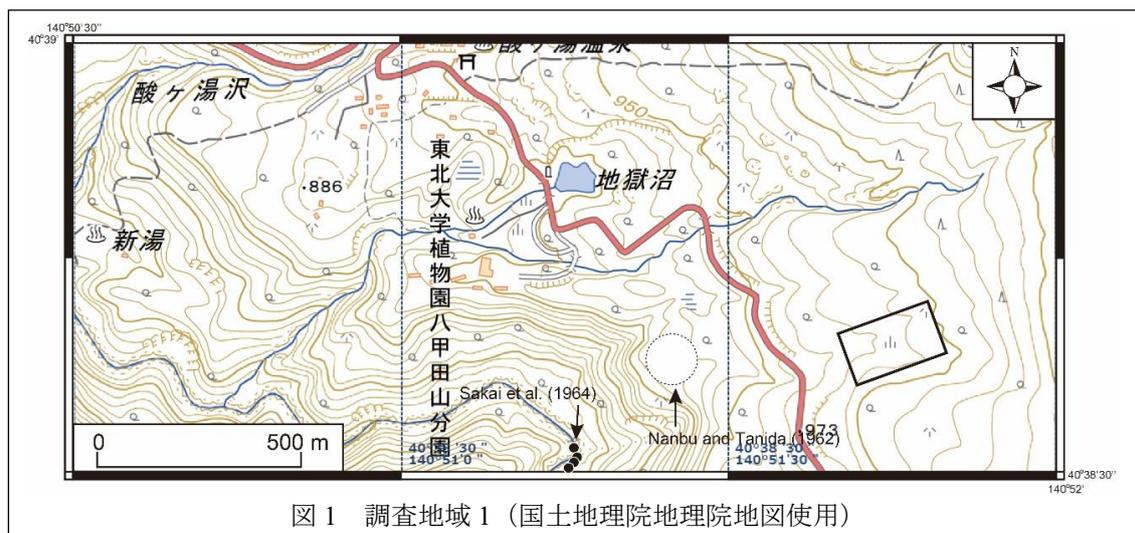


図1 調査地域1 (国土地理院地理院地図使用)

に各営林署に入林届を申請して許可を得ている。さらに、二地域ともに十和田八幡平国立公園内にあり、公園管理事務所へ事前に調査内容を説明し承諾をえた。一地域目は北八甲田火山群地獄沼の南東に位置する溶岩流が定着した地域である(図1の□の範囲)。また、図1に示した□の範囲の南西約500m付近の谷には高温の温泉(●、酒井ほか、1964)や、その中間地点付近には褐鉄鉱山(点線の○、南部・谷田、1962)が存在していたことが文献で報告されており、図1の□の範囲とその南西方向に温泉に向かって断裂構造の存在が示唆される。二地域目は、高田大岳の南東に位置する谷地温泉周辺の湿地の上流部である(図2の□の範囲)。本地域の南西にはかつて間欠泉も存在していた猿倉温泉がある。また、既存の報告(新エネルギー総合開発機構、1987)からリニアメントの存在が本地域周辺で推定されていることから図2に記載している。さらに、既存の報告にあるリニアメントの延長線が谷地温泉付近を通過することから点線で図2に記載している。

本研究では、微生物硫酸還元反応が生じた地下水が湧水として流出しているのか、硫酸還元微生物相は存在するのか、微生物硫酸還元反応に必要な有効エネルギーは存在するのか、湧水流出域に微生物硫酸還元反応における電子供与体として有機態炭素は存在するのか評価し硫化水素の起源を推定するために、湧水の硫酸イオンの安定同位体比解析、微生物の群集解析等、微生物硫酸還元有効エネルギー解析、そして湧水の有機態炭素の解析を実施する。

4. 研究成果

はじめに、二つの調査地域で採取した硫化水素を含有する低温湧水の SO_4^{2-} の硫黄の安定同位体比 ($\delta^{34}\text{S}$) を図3に示す。調査地域周辺域では、すでに公表されている温泉 (Hot springs (独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構, 2009) の SO_4^{2-} の $\delta^{34}\text{S}$ 値の他に地下水や湧水、沢水の SO_4^{2-} の $\delta^{34}\text{S}$ 値がなく、図3では両方を示している。本研究では硫化水素を含有していない低温湧水の SO_4^{2-} の $\delta^{34}\text{S}$ 値も測定したが、調査地域1の低温湧水は硫化水素を含有している低温湧水と比較して Cl 濃度差が大きく、調査地域2の低温湧水は硫化水素を含有している低温湧水と比較して、 SO_4^{2-} の $\delta^{18}\text{O}$ 値の解釈が厳しく、 SO_4^{2-} の安定同位体比解析からは微生物硫酸還元反応が生じた地下水が湧水として流出しているのか評価することが困難であった。

次に、硫酸還元微生物相は存在するかどうか評価するために微生物群集組成解析を調査地域1と2の硫化水素を含有している低温湧水を対象に実施した。微生物群集組成の解析の結果、微生物の多様性は調査地域2の方が大きいことが示された。また調査地域1においても硫酸還元反応を行う種が属するグループを見出すことができたが、硫酸還元反応に係る活性は調査地域2の方が高いことが示された。

そして微生物硫酸還元反応に必要な有効エネルギーについては、熱力学的解析ソフト The Geochemist's Workbench 12 (熱力学データベース thermo.com.V8.R6+.tdat) と各調査地域における分析測定結果を参考にして算出した (図4)。本研究で採取した低温湧水は酸性 (pH が 2.5 から 4.0 の範囲) であり、酢酸やギ酸を利用した微生物硫酸還元反応に必要な有効エネルギーを十分に満たしている (Jin and Bethke, 2010) と同時に pH が低い場合、有効エネルギーが pH に大きく依存しているため本解析の適用の困難さを示していると考えられる (Jin and Kirk, 2018)。

最後に湧水流出域に微生物硫酸還元反応における電子供与体としての有機酸 (酢酸, ギ酸) を生成する有機態炭素は存在するかどうか評価するために溶存有機炭素 (Dissolved organic carbon: DOC) を評価した (図5)。本研究では調査地域2の方が高い DOC 濃度を示す結果になった。DOC 濃度の結果からは調査地

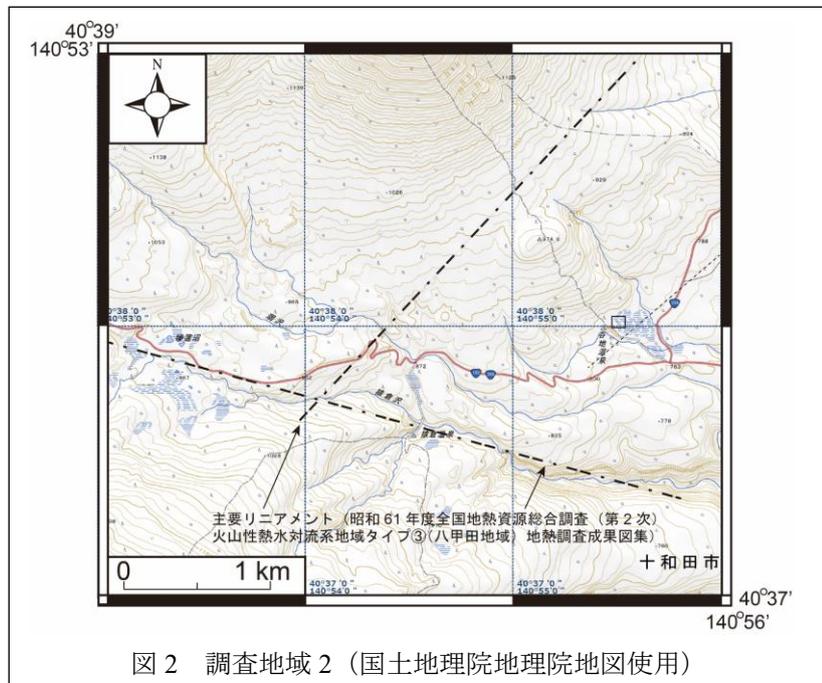
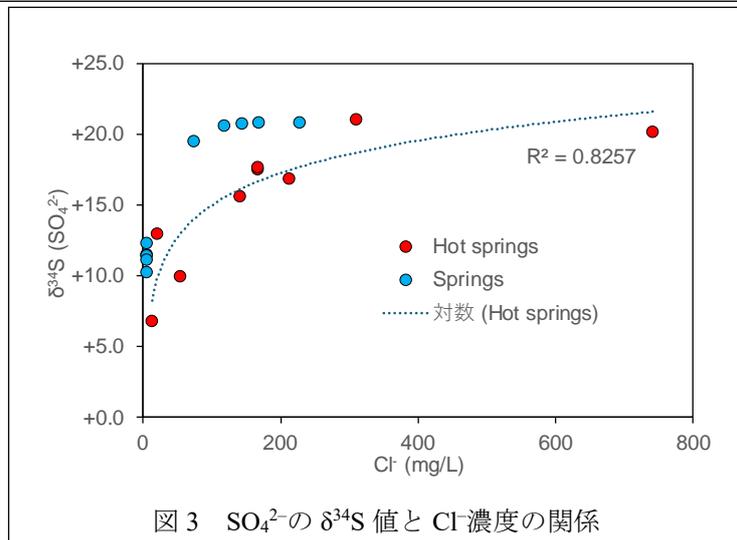


図2 調査地域2 (国土地理院地理院地図使用)



域 2 は微生物による硫酸還元反応が調査地域 1 よりも進行しやすいと考えられる。また調査地域 2 における DOC 濃度は、数千の DOC 濃度を解析した McDonough ほか (2020) で示されている DOC 濃度分布の Median (1.2mg/L) に近い値でもあった。

本研究実施の結果、調査地域に 2 においては微生物群集組成等の解析結果と溶存有機炭素濃度の評価結果より、低温湧水に含まれている硫化水素は微生物活動起源も含まれている可能性が示された。そして、硫化水素の起源推定には微生物に関する解析は有効な手法になりえることが示唆された。さらに、本研究では当初予定していなかった低温湧水の分析計測結果を用いた飽和指数解析も低温湧水に含まれている硫化水素の起源推定に有効な手法になる可能性が示された。

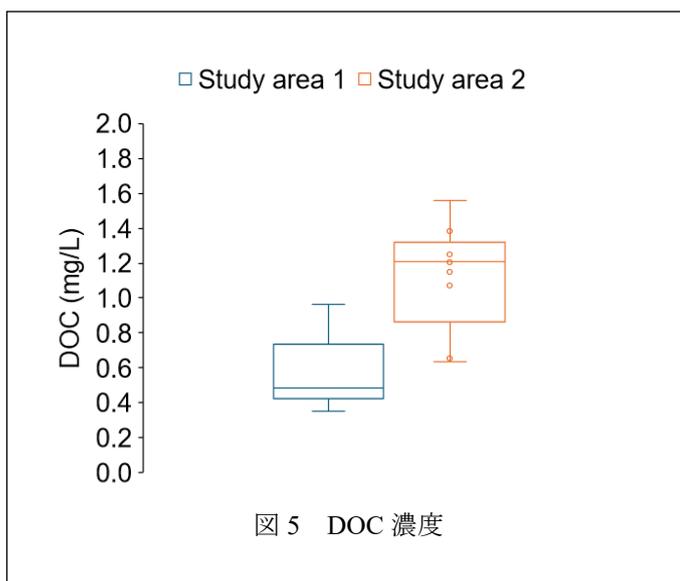


図 5 DOC 濃度

引用文献

- 酒井軍次郎・宮城育夫・岩井武彦 (1964) 八甲田火山地域における温泉群の研究. 56p. 弘前大学教育学部紀要. 別冊 (4)
- 新エネルギー総合開発機構 (1987) 昭和 61 年度全国地熱資源総合調査 (第 2 次) 火山性熱水対流系地域タイプ③ (八甲田地域) 地熱調査成果図集.
- 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (2009) 平成 20 年度～平成 21 年度のうち平成 20 年度分中間年報 地熱開発促進調査 No.C-2-12 下湯地域 (第 1 次).
- 南部松夫・谷田勝俊 (1961) 青森市八甲田火山の地質および地下資源調査報告書. 29p.
- Jin Q. and Bethke, C.M. (2010) Cellular energy conservation and rate of microbial sulfate reduction. *Geology*, 1027–1030.
- Jin Q. and Kirk, M. (2018) pH as a primary control ion Environmental microbiology:1. Thermodynamic perspective. *Frontiers in Environmental Sciences*, 6:21.
- McDonough, L.K. ほか 13 名 (2020) Changes in global groundwater organic carbon driven by climate change and urbanization. *Nature Communications*, 11:1279.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 渡部乃佳・稲葉唯・井岡聖一郎・若狭幸・村岡洋文	4. 巻 46 (3)
2. 論文標題 北八甲田火山群鳥滝沢-傘峠区間における沢水, 湧水の水質	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 日本地熱学会誌	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) 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 Suzuki Yota, Ioka Seiichiro, Muraoka Hirofumi, Asanuma Hiroshi	4. 巻 95
2. 論文標題 Shadow effect of the pH distribution of surface waters around the Kakkonda geothermal field, Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geothermics	6. 最初と最後の頁 102111 ~ 102111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.geothermics.2021.102111	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 中村美月・梅田浩司・井岡聖一郎	4. 巻 63
2. 論文標題 大和沢川扇状地における湧水の地球化学特性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 地下水学会誌	6. 最初と最後の頁 279 ~ 286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5917/jagh.63.279	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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 井岡聖一郎・若狭幸
2. 発表標題 地熱地帯における低温湧水の溶存硫化水素の起源推定
3. 学会等名 公益社団法人日本地下水学会2023年春季講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Wakasa, S., Kasuya, M. and Ioka, S.
2. 発表標題 An experiment for geothermal exploration using remote sensing in Japan
3. 学会等名 JpGU Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 井岡聖一郎・一戸夏綺・若狭幸
2. 発表標題 北八甲田火山群硫黄岳西方における地熱熱水と湧水の溶存CO2濃度
3. 学会等名 日本地熱学会令和5年学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 井岡聖一郎・若狭幸
2. 発表標題 イオンクロマトグラフによる酸性の鉱泉湧水等のAl ³⁺ 濃度分析
3. 学会等名 公益社団法人日本地下水学会2024年春季講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 粕谷真大・佐藤一輝・井岡聖一郎・若狭幸
2. 発表標題 地獄沼周辺地域におけるUAVを用いたクラック及び熱水の湧水地点の推定
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2024年大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Ioka, S., Inaba, Y. and Wakasa, S.
2. 発表標題 Cold surface water chemistry in the western area of Iwodake, North Hakkoda Volcanoes
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 若狭 幸・井岡聖一郎
2. 発表標題 八甲田山硫黄岳山麓の高精度地表図と空間温度マップと水質の関係
3. 学会等名 日本地熱学会令和4年学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井岡聖一郎・鈴木陽大・村岡洋文・若狭幸
2. 発表標題 むつ燧岳地熱地域における降水，湧水，沢水，温泉水のB/Cl比
3. 学会等名 日本地熱学会令和3年学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井岡聖一郎・鈴木陽大・若狭幸・村岡洋文
2. 発表標題 青森県陸奥燧岳大赤川，小赤川流域における降水，湧水，河川，温泉のBr/Cl比
3. 学会等名 水文・水資源学会/日本水文科学会2021年度研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井岡聖一郎・若狭幸
2. 発表標題 青森県黒石市浅瀬石川扇状地右岸深度約400mから採取した地下水の水文化学特性
3. 学会等名 日本地下水学会2021年春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Rusydi, A., Onodera, S., Saito, M., Ioka, S., and Maria, R.
2. 発表標題 Impact of brackish-water aquaculture on groundwater resources in a coastal alluvial aquifer
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Maria, R., Rusydi, A., Onodera, S., Saito, M., Ioka, S., Delimon, R., Purwoko, W., Sukmayadi, D. and Hendarmawan, H.
2. 発表標題 Hydrogeochemical evolution mechanisms of groundwater in the Semarang Coastal Zone, Java Island, Indonesia
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 浅井和由, 井岡聖一郎, 井川怜欧, 池田光良, 板寺一洋, 内山高, 内山美恵子, 小野昌彦, 小野寺真一, 利部慎, 川満一史, 九鬼貴弘, 河野忠, 五藤幸晴, 齋藤光代, 佐藤芳徳, 島野安雄, 杉本亮, 鈴木秀和, 竹内真司, 辻村真貴, 土原健雄, 寺本雅子, 徳永朋祥, 中川啓, 中村高志, 林武司, 細野高啓, 町田功, 松井喜治, 松本親樹, 茂木勝郎ほか	4. 発行年 2023年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 176
3. 書名 図説 日本の湧水 : 80地域を探るサイエンス	

1. 著者名 相澤亮太郎, 青木賢人, 青木久, 青山雅史, 赤坂郁美, 秋元菜摘, 秋本弘章, 秋山千亜紀, 秋山祐樹, 淺野敏久, 網島聖, 荒井良雄, 荒木俊之, 荒木一視, 荒又美陽, 有馬貴之, 飯嶋曜子, 飯島慈裕, 井岡聖一郎ほか	4. 発行年 2023年
2. 出版社 丸善出版	5. 総ページ数 842
3. 書名 地理学事典 (「地下水の分布と流動」担当)	

〔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	若狭 幸 (Wakasa Sachi) (40442496)	弘前大学・地域戦略研究所・准教授 (11101)	
研究分担者	天野 由記 (Amano Yuki) (60421674)	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・核燃料・バックエンド研究開発部門 核燃料サイクル工学研究所 環境技術開発センター・研究副主幹 (82110)	

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