

令和 4 年 6 月 19 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K21583

研究課題名(和文)火葬骨を”自然に土に還す”手法の確立

研究課題名(英文) Establishment of a method of "natural conversion of cremated bones into soil"

研究代表者

南 雅代(Minami, Masayo)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授

研究者番号：90324392

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：土葬された遺体は、土壌中で次第に分解されて土に還っていくが、火葬された骨は土壌中で分解しにくく、土に還りにくい。本研究では、このような火葬骨を、化学薬品を使って急激に溶解するのではなく、埋葬後、数年～数十年をかけて自然に徐々に分解されるような過程を見出すことを目的とした。現生の骨片を用いた実験から、比較的低温(<750℃)で加熱された骨は分解しやすいこと、骨への元素の取り込みが起こりやすいことを明らかにした。また、火葬骨の長期間の分解過程の様子を調べるために、いくつかの遺跡出土人骨の分析を行い、火葬骨と接する水、土壌の存在が、骨の続成・変質過程を促進し、分解しやすくすることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在、日本ではほぼ100%に近い率で火葬された遺骨が墓に埋葬されている。日本は舎利信仰が深く、火葬後の収骨儀礼も敬いの念がある。一方で、すべての遺骨が永続的に崇め祀られることはなく、弔い手のいなくなった放置遺骨が増えつつあるのも事実である。本研究は、火葬時の加熱温度を少し下げるとともに、火葬骨を納める骨壺に穴を開け、雨水が入り込み、かつ、わずかず排水されるようにしておくことで、火葬骨が分解されやすくなることを、現生骨、及び遺跡から出土した考古人骨の分析から提案したものである。これは、化学薬品や特別な器具を使用せず、自然に火葬骨を土に還す手法を提案したもので、社会的に意義がある。

研究成果の概要(英文)：Buried human remains gradually decompose in the soil and return to the soil, while cremated bones are relatively stable and difficult to decompose in the soil. The purpose of this study is to find a process that allow such cremated bones to decompose gradually and naturally over several years to several decades after burial, instead of decomposing them rapidly with chemicals. Some experiments with modern bones revealed that cremated bones heated at relatively low temperatures (<750℃) are easy to decompose and that incorporation of elements into the bones is likely to occur. To investigate the decomposition process of cremated bones due to long-term alteration, we analyzed archaeological human bones excavated from archaeological sites at Osaka and Nara in Japan and found that the presence of water and soil in contact with the cremated bones accelerated the process of diagenesis and alteration of the bones, making them easier to decompose.

研究分野：地球化学

キーワード：火葬骨 バイオアパタイト 分解 化学反応 コンクリーション

### 1. 研究開始当初の背景

火葬は、700年(文武天皇4年) 仏教の伝来と共に日本に伝わったと言われている。火葬は釈迦に倣う高尚な行いであったため、その当時、火葬され墓に埋葬されたのは、皇族、貴族、僧侶などの特別な階級の人たちのみで、一般の人は、河原や野原や山などの決められた場所に土葬されていた。ところが、江戸時代になると市街が形成され、寺院や墓地に火葬場が設けられるようになり、火葬が広く行われるようになった。時代と共に火葬は広まり、戦後、日本の高度成長とともに火葬技術が発展し、現在、日本ではほぼ100%に近い率で火葬された遺骨が墓に埋葬されている。土葬された遺体は、土壌中で次第に分解され、土に還っていくが、火葬による焼骨は土壌中でも分解しにくく安定で、土に還りにくい。実際に、放置された個別・合葬墓所での、「還らない焼骨」が顕著に問題として現れるようになってきている。今後、団塊の世代が終末期を迎えるにあたり、この数は増大すると予測される。

研究代表者の南は、本研究開始当初、火葬骨が分解しにくく安定であることに注目し、遺跡から出土する火葬骨の信頼性ある<sup>14</sup>C年代測定の試みを行っていた(H26-H28 挑戦的萌芽研究「骨の炭酸ヒドロキシアパタイトを用いた炭素14年代測定の試み」、H30-R2 基盤研究(B)「火葬骨の高確度炭素14年代測定と食性解析のための基礎研究・考古資料への展開」)。その結果、骨は高温(>750) で加熱されると、有機成分が分解し、無機成分のバイオアパタイトの結晶化が進むこと、高温で加熱された火葬骨は続成作用や汚染の影響を受けにくく、信頼性ある<sup>14</sup>C年代測定、そしてストロンチウム同位体分析から食性解析が可能であることを明らかにしつつあった。

この研究成果をウェブで見た、ある墓石業界の方から、火葬骨の化学分解・風化に関する問い合わせがあった。それは、「甲い手のいなくなった遺骨も増えてきて、対策に苦慮している、火葬骨をお墓へ埋葬後、数年～数十年かけて徐々に分解させるような添加物がないか」という内容であった。この問い合わせは、私が目指してきた方向とは逆であるものの、これまでの研究で得た知識を用いて、逆の発想で、高温で加熱され無機化し、土壌中で分解しにくくなった火葬骨を「自然に土に還す」手法を見いだすことができるのではないかという発想に結びついた。また、火葬骨の保存状態を知るために、フーリエ変換赤外分光分析 (FTIR) スペクトル、粉末 X 線回折 (XRD) パターンから求められるアパタイトの結晶度を指標とすることが多いが、火葬骨の中には、結晶度が高くても、若い<sup>14</sup>C年代が得られる骨もあり、<sup>14</sup>C年代測定を行うにあたり、試料の保存状態(信頼性ある<sup>14</sup>C年代値を与える試料であるかどうか)の評価指標を確立する必要性を感じていた。火葬骨の分解の過程を詳細に追うことは、<sup>14</sup>C年代測定に用いる遺跡出土火葬骨の保存状態を評価する指標を得ることであり、火葬骨のバイオアパタイトを用いた<sup>14</sup>C年代測定における、試料のスクリーニングにもつながると考えた。

### 2. 研究の目的

本研究では、火葬骨を土葬された骨と同じように、お墓への埋葬後、数年～数十年をかけて自然に徐々に分解されるような過程を目指すことにした。葬儀・埋葬様式を変えていかなければいけない過渡期にあって、本研究においては、日本の埋葬文化を尊重しながら、新たな埋葬方式を導入する、つまり、火葬骨を急激にではなく、自然に、徐々に無理なく分解させる過程を探索することを目的とする。

### 3. 研究の方法

骨は、バイオアパタイトを主とするリン酸カルシウム結晶とコラーゲン繊維を主とする有機分子からなる構造をしている。バイオアパタイトは、リン酸カルシウムの $\text{PO}_4$ あるいは $\text{OH}$ が $\text{CO}_3$ に置換した形で存在している (Cazalbou et al., 2004)。このため、アパタイト結晶のサイズがナノメートルサイズに抑制され (Wopenka and Pasteris, 2005)、土壌中で自然に分解されやすい状態にある。一方、750 以上の高温で加熱された骨は、アパタイトの結晶化が進み、分解しにくく、続成作用や汚染の影響を受けにくくなると考えられている (Lanting et al., 2001)。現在の火葬炉の温度は800～1200 とされており、高温で加熱されることにより、バイオアパタイトがヒドロキシ化し( $\text{CO}_3$ が除去され、 $\text{OH}$ に置換) 土壌中で分解されにくい状態にあると考えられる。そのため、本研究では、現生骨を用いて、加熱温度によって火葬骨の安定性がどの程度異なるか、分解過程がどのように異なるのかを明らかにするとともに、考古遺跡から出土した火葬骨を用いて、骨アパタイト結晶度と受けた変質の程度を明らかにするため、以下の実験を行った。

火葬骨の分解されにくい状態を結晶学的、化学組成的に明らかにするための実験：

現生イノシシの骨をさまざまな温度で加熱し、加熱することによって、骨の結晶状態がどのように変化するかをIRスペクトル、XRDパターンから探る。

分解しにくい火葬骨を、強力な酸・アルカリによって急激に分解するのではなく、徐々に分解する過程を見出すための実験：

現生骨を用いた骨の元素の取り込み過程を解明するため、アパタイトの結晶度を明らかにした加熱骨、ならびに鉱物アパタイトを、均質性に十分に留意して調製し、質量数84のストロンチウム同位体が濃縮した炭酸ストロンチウム溶液に浸す実験を開始し、どのように元

素が骨に取り込まれるのかを探る。

考古遺跡から出土した火葬骨の分析：

続成・変質作用によって分解が進んでいると考えられる火葬骨の分析から、何が原因で分解が進んでいるのかを探る。

#### 4. 研究成果

火葬骨の分解されにくい状態を結晶学的、化学組成的に明らかにするための実験：

現生イノシシ骨を切り分け、マッフル炉内でそれぞれ 300、450、600、750、900 で 1 時間 30 分加熱し、XRD 分析、FT-IR 分析、元素分析を行った。その結果、750 以上の加熱温度でアパタイトの結晶性が急激に高まる様子を詳細にとらえることができた。この内容を論文にまとめた (Minami et al., 2019)。現在の火葬炉の温度は 800~1200 とされており、高温で加熱されることにより、バイオアパタイトがヒドロキシアパタイト化し (OH のサイトに置換した CO<sub>3</sub> が除去され、OH に置換) 土壤中で分解されにくい状態になっていることが明らかになった。

火葬骨を徐々に分解する過程を見出すための実験：

反応開始後、1日後、3日後、1週間後、2週間後、1ヶ月後、3ヶ月後、半年後までの骨片を取り出し、乾燥後、元素分析計で炭素・酸素・水素含有量を、ICP質量分析計でカルシウム・リン濃度を測定し、骨の分解速度を算出する。炭素濃度、炭素、ストロンチウム同位体比の変化を調べた (炭素濃度の変化を右の図 1 に示す)。その結果、750、900 で加熱した骨は、ほとんど元素の取り込みがなく、同位体比の変化もほぼ見られないことが明らかになった。この結果に対しては、日本文化財科学会第36回大会において、第13回ポスター賞を受賞した。

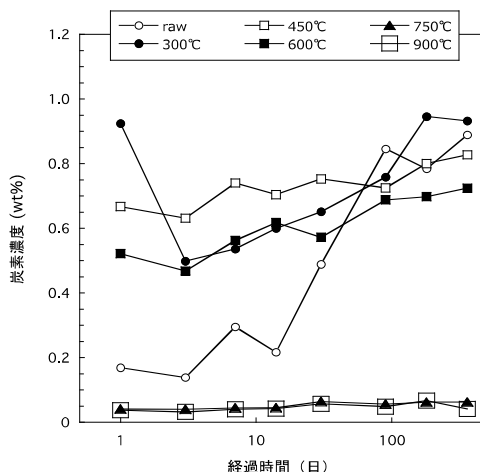


図 1 被熱骨の浸透実験：時間経過に伴う炭素濃度変化

考古遺跡から出土した火葬骨の分析

・唐招提寺西方院の五輪塔の地下から出土した火葬骨  
唐招提寺西方院にある重要文化財西方院五輪塔の地下から出土した蔵骨器には、蔵骨器銘文から、圓律上人證玄 (1220-1292) が納められていると考えられている。この蔵骨器内の白色骨片の <sup>14</sup>C 年代を測定したところ、11 世紀から 15 世紀の幅広い年代を示した。この蔵骨器内に納められた骨を調べた結果、3 体の人骨が納められており、それぞれが層位的な単位を持っていたことから、證玄の納骨後、それほど隔たらない時期に弟子が蓋上半を開けて納骨され、その後さらに別の人物が納骨されたことが推定された。蔵骨器内は水に満たされており、中の火葬骨は水に浸かった状態であった。微量元素濃度、ストロンチウム同位体比は続成・変質の影響を強く受け、生体由来の化学情報を一部損なっている可能性が明らかになった。火葬骨は水との反応で変質が促進されることが実証された。

・大阪府松原市立部遺跡出土蔵骨器に納められた火葬骨の化学分析

蔵骨器内の骨片は、黒色から白色までさまざま存在し、焼成温度にかなりのムラがあったと考えられる (図2の写真)。XRD分析から、黒色骨片は600-700 の温度を受けたこと、白色骨片は750 以上の高温の熱を被り、高いアパタイトの結晶度を有することがわかった。黒色骨片は、白色骨片よりもわずかに <sup>14</sup>C 年代が若くなる傾向が見られるが、誤差範囲で一致する結果となった。これは、今回、蔵骨器の蓋がしっかりと閉じられており、蔵骨器内に水も土壌も入り込まない状態になっていたため、低いアパタイト結晶度の黒色骨片でも、続成・変質の影響が小さく、正しい <sup>14</sup>C 年代を与えたと考えられる。<sup>14</sup>C 較正暦年代は 770-900 cal AD となり、奈良時代後半という考古学知見と一致した。



図 2 大阪府松原市の立部遺跡から出土した蔵骨器

一方、白色骨片と黒色骨片は異なるストロンチウム同位体比を示し、黒色骨片は埋没時に土壌間隙水と同位体交換反応を生じてストロンチウム同位体組成が変化していることが明らかになった。

火葬骨の化学前処理法の開発

以上①~③の成果のほか、火葬が土壌中に埋没している間に骨に付着して、汚染炭素となる二

次生成炭酸塩の除去を効果的に行うため、水の無機溶存炭素抽出用に使用していた反応容器を改良し、骨試料の化学前処理が簡便にできるようにした。また、生物遺骸を核とする（骨や殻など）炭酸塩コンクリーションは、非常に保存性が良好であるが、このコンクリーション化と骨アパタイトのヒドロキシ化との関連性を探るため、コンクリーションの形成プロセスに関する研究も行い、いくつか興味深い結果が得られた。

以上の現生骨の室内実験、考古遺跡から出土した火葬人骨の結果から、水の存在が火葬骨の分解に大きく関わっていること、この分解は、低温で加熱された火葬骨において、促進されることが明らかになった。以上の結果をもとに考えると、火葬する温度を少し下げ（骨が 700 以下の被熱となる温度）、火葬骨を納める蔵骨器に水が溜まりやすい状況にしておくと、中の骨片が分解しやすい状態になることがわかった。雨水は大気中の  $\text{CO}_2$  が溶け込んでいて、酸性になっている。例えば、蔵骨器の蓋を密閉せず、蓋に小さい穴を開けておくなどして、酸性になっている雨水が入り込むようにしておき、その雨水が、少しずつ排水されるようにごく小さい穴を底に開けておくことで、長時間、水と骨が反応することになり、骨の分解を促進すると考えられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 5件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Muramiya, Y., Yoshida, H., Minami, M., Mikami, T., Kobayashi, T., Sekiuchi, K., Katsuta, N.	4. 巻 429
2. 論文標題 Glendonite concretion formation due to dead organism decomposition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sedimentary Geology	6. 最初と最後の頁 106075 ~ 106075
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sedgeo.2021.106075	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 Takahashi, H.A., Handa, H., Minami, M.	4. 巻 63
2. 論文標題 A simple CO2 extraction method for radiocarbon analyses of dissolved inorganic carbon in water sample without a carrier gas	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Radiocarbon	6. 最初と最後の頁 1339-1353
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/RDC.2021.48	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 Muramiya, Y., Yoshida, H., Kubota, K., Minami, M	4. 巻 404
2. 論文標題 Rapid formation of gigantic spherical dolomite concretion in marine sediments.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sedimentary Geology	6. 最初と最後の頁 105664
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sedgeo.2020.105664	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 高橋 浩・佐藤里名・南 雅代	4. 巻 5
2. 論文標題 水試料の放射性炭素濃度測定のための手法改良 (その2)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 名古屋大学年代測定研究	6. 最初と最後の頁 12-22
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 南 雅代	4. 巻 -
2. 論文標題 火葬骨・木炭の放射性炭素年代測定	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 松原市 立部遺跡発掘調査報告書	6. 最初と最後の頁 68-72
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 -

1. 著者名 若木重行・南 雅代	4. 巻 -
2. 論文標題 人骨のストロンチウム同位体分析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 松原市 立部遺跡発掘調査報告書	6. 最初と最後の頁 73-77
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 -

1. 著者名 若木重行・南 雅代	4. 巻 -
2. 論文標題 土壌資料のストロンチウム同位体分析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 松原市 立部遺跡発掘調査報告書	6. 最初と最後の頁 78-80
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 -

1. 著者名 Minami, M., Mukumoto, H., Wakaki, S., Nakamura, T.	4. 巻 61
2. 論文標題 Effect of crystallinity of apatite in cremated bone on carbon exchanges during burial and reliability of radiocarbon dating.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Radiocarbon	6. 最初と最後の頁 1823-1834
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/RDC.2019.97	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 Minami, M., Mukumoto, H., Sawada, H., Wakaki, S., Nakamura, T.	4. 巻 -
2. 論文標題 Radiocarbon dating of cremated bones from the Ishibotoke-dani of Binman-ji Temple in Taga, Shiga Prefecture, Japan: A preliminary report.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of EA-AMS 8 & JAMS-22	6. 最初と最後の頁 94-97
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 該当する

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 隈 隆成・浅井沙紀・吉田英一・南 雅代
2. 発表標題 名古屋港海底泥中找到の炭酸塩コンクリーションの形成年代
3. 学会等名 第33回 (2021年度) 名古屋大学宇宙地球環境研究所年代測定研究シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北川浩之・南 雅代・酢屋徳啓・池田晃子・隈 隆成・山根雅子・西田真砂美
2. 発表標題 名古屋大学タンデトロンAMS14Cシステムの現状と利用
3. 学会等名 第33回 (2021年度) 名古屋大学宇宙地球環境研究所年代測定研究シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 若木重行、南雅代、佐藤亜聖、樫木規秀
2. 発表標題 土壌資料のSr同位体分析より推定する立部遺跡火葬墓ST2005の成り立ち
3. 学会等名 第33回 (2021年度) 名古屋大学宇宙地球環境研究所年代測定研究シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 澤田 陸・若木重行・南 雅代
2. 発表標題 滋賀県敏満寺遺跡出土火葬骨のマルチSr同位体比から探る中世の文化
3. 学会等名 日本質量分析学会同位体比部会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 澤田 陸・若木重行・南 雅代
2. 発表標題 火葬骨のSr同位体比と微量元素濃度比から探る中世の人々の食性
3. 学会等名 2021年度日本地球化学会第68回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 南 雅代
2. 発表標題 AMS 14C分析の温故知新
3. 学会等名 2021年度日本地球化学会第68回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐藤里名・高橋 浩・半田宙子・南 雅代
2. 発表標題 水試料の溶存無機炭素を抽出する新手法の開発および従来法との比較
3. 学会等名 2020年度日本地球化学会第67回年会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 南 雅代・若木重行・佐藤亜聖・櫻木規秀
2. 発表標題 大阪府松原市立部遺跡出土蔵骨器に納められた火葬骨の化学分析
3. 学会等名 2020年度日本地球化学会第67回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 南 雅代
2. 発表標題 考古遺跡から出土した骨遺物の放射性炭素年代測定
3. 学会等名 2020年度日本地球化学会第67回年会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金子将己・浅原良浩・南 雅代・栗田直幸・Hossein Azizi・Hadi Amin-Rasouli・張 玉博
2. 発表標題 イラン北西部のトラパーチン湧水の同位体地球化学的評価
3. 学会等名 2020年度日本地球化学会第67回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 澤田 陸・若木 重行・南 雅代
2. 発表標題 滋賀県敏満寺遺跡石仏谷墓跡から出土した火葬骨のSr同位体比から探る食性と居住地域
3. 学会等名 2020年度日本地球化学会第67回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masayo Minami
2. 発表標題 Quality control for radiocarbon dating of charcoal: Assessment of decontamination by chemical pre-treatment
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 南 雅代・中村俊夫
2. 発表標題 火葬骨のバイオアパタイトを用いた高精度炭素14年代測定
3. 学会等名 日本文化財科学会第36回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 若木重行・南雅代
2. 発表標題 火葬骨のバイオアパタイトのマルチSr同位体分析ー食性解析とに二次変質作用の影響評価ー
3. 学会等名 日本文化財科学会第36回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Minami, M., Wakaki, S.
2. 発表標題 Sr isotope exchange in bone apatite: an $^{84}\text{Sr}$ -enrichment experiment
3. 学会等名 Goldschmid 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Minami, M., Wakaki, S., Mukumoto, H., Nakamura, T.
2. 発表標題 Radiocarbon dating and diet analysis of cremated bones excavated from archaeological sites in Japan
3. 学会等名 The 8th East Asia Accelerator Mass Spectrometry Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 南 雅代
2. 発表標題 火葬骨を”自然に土に還す”手法の確立
3. 学会等名 特設審査領域「超高齢社会研究」の研究代表者交流会
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	加藤 文典  (Kato Takenori)  (90293688)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授   (13901)	

	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
連携 研究者	若木 重行  (Wakaki Shigeyuki)  (50548188)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(高知コア研究所)・研究員   (82706)	
連携 研究者	高橋 浩  (Takahashi Hiroshi)  (70357367)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・地質調査総合センター・主任研究員   (82626)	

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