

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04639

研究課題名（和文）道路構造物に埋設された金属補強材の腐食状況を磁気で探る研究法の開発

研究課題名（英文）Development of a research method to magnetically explore the corrosion status of metal reinforcements buried in road structures

研究代表者

竜田 尚希（Tatta, Naoki）

富山大学・学術研究部都市デザイン学系・助教

研究者番号：30521314

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：地中には様々な目的で鋼材等の金属材料が埋設されている。金属材料の腐食の状況を地中から掘り出すことなく非破壊調査できれば、維持管理に大いに役立ち、具体的な被害が生じる前に予防保全を行うことも可能となる。しかし、非破壊で把握する手法は殆どないのが現状である。本研究では、磁気探査を用いて、非破壊で鋼材の腐食程度を把握することを目的として研究を行った。室内実験により鋼材の腐食に伴う磁性の変化について研究を行い、屋外実験では磁気探査によって腐食状況を地表から非接触で探る方法の有効性を調べた。その結果、磁気探査が鋼材の腐食に対して、非破壊調査として利用できる可能性が高いという結論に至った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鋼材の磁性を利用して、土中での腐食状況を効率良く把握できる非破壊の調査法を開発することが研究目的である。地表・道路面から土中の鋼材の腐食状況が調査できると、広く道路構造物のメンテナンスに役立ち、補修対策にも大きく貢献できる。

本研究に適用する磁気探査は、理学分野において遺跡等の埋設物調査や地層構造の調査等に活用されている手法である。この手法を、分野の異なる工学分野の「構造物の点検」に適用することで、これまで困難であった「土中に埋設された鋼材の腐食の程度を把握する」の課題解決を目指す。この観点は、独自性が高く、また金属腐食と磁場の関係で新たな探査手法を生み出すという創造性の高い研究である。

研究成果の概要（英文）：Metal materials such as steel may be buried underground for various purposes. If the corrosion of these metal materials can be non-destructively tested without excavation, it would greatly benefit maintenance management and enable preventive maintenance before actual damage occurs. However, there are hardly any non-destructive assessment methods available. In this study, we aim to non-destructively assess the degree of corrosion in iron materials through a magnetic survey. We investigate changes in magnetism associated with corrosion of iron products through indoor experiments and examine the effectiveness of using magnetic surveys to non-invasively investigate corrosion conditions from the ground surface through outdoor experiments. We conclude that magnetic surveys have good potential for use in non-destructive testing of corrosion of iron materials.

研究分野：地盤工学

キーワード：維持管理 腐食 磁気探査 鋼材 補強材 補強土壁

1. 研究開始当初の背景

道路構造物の維持管理では、点検、診断、措置の管理業務(メンテナンスサイクル)が必要である。これまでの補強土壁(図1)の変状では、構造物・路面に変形や亀裂等の変状が発生して緩やかに進行し、最終的に崩壊したとの報告が多い。また豪雨・台風時、降雨流入や地下水位の上昇で変状が急激に進行することもある。こうした状況で、補強土壁の崩壊を防ぐには、変状を初期段階で捉える必要がある。

現在、道路の補強土構造物の数は膨大であり、維持管理の点検は、1-2日に一回の目視によるパトロールで初期変状を見つけて対応することが基本となっている。しかし目視の点検では補強土壁内部の補強材(図2のストリップ)の状態の把握はできない。さらに補強材の破断によって起こる崩壊は、事前変状が小さいか殆ど生じず、突発的に起きることがある。そして突発的崩壊で落下した壁面材が人的被害につながる可能性もある。

現在、補強材には金属製のものが多く使用されている。補強材は、土中に埋設することで、土と補強材の摩擦、および補強材自身の引張強度によって、補強材に連結された垂直のコンクリート壁面を維持する構造である。その為、一旦、補強材が補強土壁へ埋設されると、外観としては、コンクリート壁面しか調べられない。つまり、補強材の腐食の状態を把握することは不可能に近く、また定期的実施される日常点検では、内部に変状兆候があっても捉えることは難しいとされていた。

補強土壁における補強材の状態調査として、従来、鉛直壁面にボーリングを行って土ごと補強材を抜き取ったり、予め調査用補強材を埋め込んでおき、取り出して調べる方法も試みられているが、抜き取りは大掛かりとなり、また調査用補強材も全場所へは設置できず点検手法としては確立されていない。また非破壊調査として電気比抵抗探査も試みられたが、土の含水率変化の影響が大きく効果的でなかった。現状ではこうした調査手法と壁面変位の計測を組み合わせ、補強材のひずみや破断を間接的に予測しているが、点検手法としての有用性はあまり報告されていない。

補強土壁は、日本に導入されて50年が経過しようとしている。この工法は多くの現場で利用されており、ストック量も膨大で、施工範囲は道路の延長として1600kmにおよんでいる(JFE 商事テールメ株式会社ホームページ <http://www.terrearnee.com> に記載されている情報を参照)

2. 研究の目的

地中には様々な目的で鋼材等の金属材料が埋設されている。例えばガスや水道の鋼管や、地盤を補強することを目的とした鋼材が挙げられる。いずれも維持管理を行いながら長期間の使用を前提としているが、埋設されていることから目視点検が困難であり、老朽化による損壊等が生じると人的・物的被害が大きくなる。老朽化の主な原因は金属材料の腐食であり、腐食の状況を地中から掘り出すことなく非破壊調査できれば、維持管理に大いに役立ち、具体的な被害が生じる前に予防保全を行うことも可能となる。

電磁物性を用いる非破壊の調査として、電気比抵抗による電気探査・電磁探査、比誘電率を用いる地中レーダ探査、磁性からの磁気探査がある¹⁾。しかし電気比抵抗や比誘電率による方法は、土中の含水率や地温等の変化が結果に影響するので、金属材料の変化のモニターにはあまり適さない。電気比抵抗探査などを補強土壁の維持管理に利用するモデル実験²⁾³⁾も試みられているが、盛土の変形や物性値の変化を探るもので、金属補強材の状態は対象とされていない。現状では、土中に埋設された金属材料の腐食の状況を、非破壊で把握する手法は殆どない。

本研究では、地中の金属材料の腐食を探るために非破壊調査の一つの磁気探査を用いることとした。磁気探査は、地球科学や考古学において、地中の物質・構造を磁性の違いから探る方法として活用されている⁴⁾。また古墳で鉄製副葬品を検出した事例⁵⁾もあり、地中の腐食した鉄製品での磁気探査の有用性が示されている。この磁気探査を用いて、非破壊で鉄材料の腐食程度を把握することを目的として研究を行った。

3. 研究の方法と結果



図1 補強土壁(帯鋼補強土壁：テールメ)
(テールメ協会ホームページより参照)

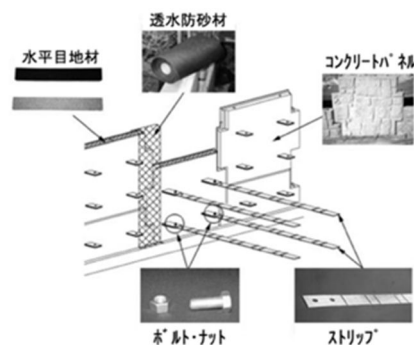


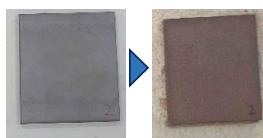
図2 帯鋼補強土壁の構造
(テールメ協会ホームページより参照加筆)

室内腐食実験により鋼材の磁性の変化に関する研究を行い、屋外実験で磁気探査によって腐食状況を地表から非接触で探る方法の有効性を調べた。

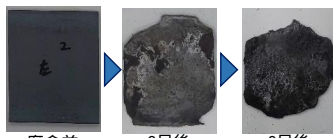
(1) 室内実験

物質の磁性は残留磁化と誘導磁化の2つからなる。残留磁化とは、永久磁石のように外部磁場とは無関係に物質が持つ磁化である。本研究では、外部磁場を遮蔽した磁気シールド筒内で、フラックスゲート磁力計にて供試体の磁場を測定することで残留磁化を求めた。誘導磁化とは、物質の帯磁率と外部磁場の積で表され、外部磁場が無くなると消失する磁化である。本研究では帯磁率計による測定を行った。2つの磁化を分けて測定することで腐食に伴う磁性変化の定量化を試みた。

室内実験では、鋼材サンプル(50×60×4mm)を使用し、腐食促進剤の塗布(図3)と電気腐食(図4)の両方法で腐食を促進させて、鋼材の磁性の変化を比較した。腐食促進剤を塗布したものは腐食が鋼材サンプル表面のみに留まり有意な結果は得られなかった。一方、電気腐食は図5のように腐食による体積(質量)の減少に伴い帯磁率・残留磁化ともに減少傾向がみられた。つまり、体積が大きく減少する腐食(例えば部材断面が欠損するような腐食)であれば本手法が有効と推定される。



腐食前 8日後
図3 腐食促進剤による腐食状況



腐食前 3日後 6日後
図4 電気腐食による腐食状況

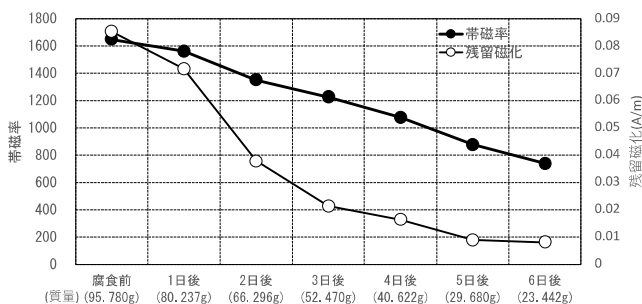


図5 体積(質量)減少による磁化の減少

(2) 屋外実験

屋外実験では室内実験の結果を踏まえて、帯状の鋼材(1160×60×4mm)の一部を図6のように欠損または切断して腐食状態を再現した。これを地表面に設置して鋼材の直上1測線の磁場(磁束密度)を光ポンピング式磁力計(図7)で測定した。

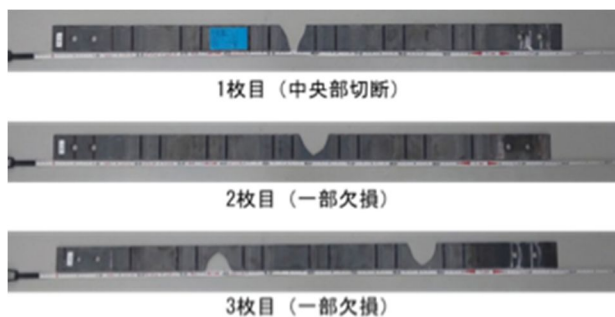


図6 腐食による欠損を模擬した鋼材



図7 光ポンピング式磁力計による磁場計測

研究の結果、図8に示すように帯状の鋼材の両端付近に逆極性の極値が生じ、鋼材の欠損により極値（絶対値）が減少していた。図9に示すように、室内実験の結果と同様、様々な欠損での体積（質量）の減少に伴い、極値（絶対値）が減少していたが、減少の程度（グラフの傾き）は一様でなく個体差が認められた。体積と磁束密度の関係の定式化や、磁場の測定値から欠損箇所を特定するためには、さらに検証が必要である。

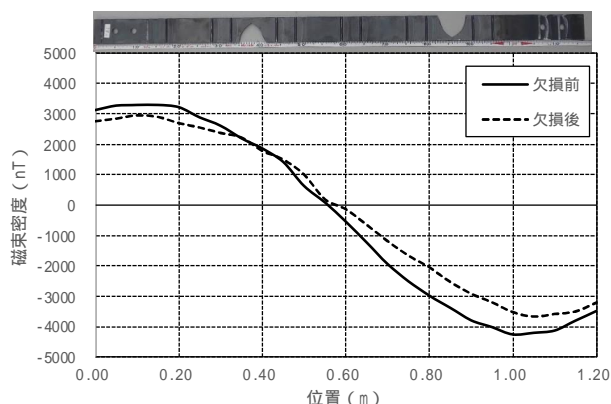


図8 鋼材が持つ磁場（磁束密度）

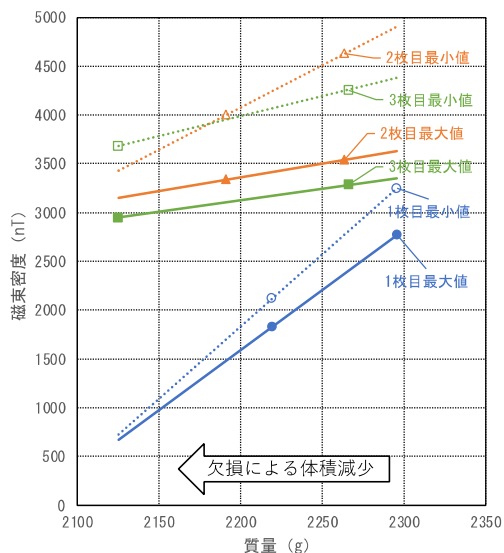


図9 質量と磁束密度の変化

次に腐食していない状態の帯状の鋼材を地中の異なる深さ（0.5, 0.75, 1.0m）で埋設し（図10）、地表から磁場を測定した。その結果、図11に示すように地表面に設置した実験と同様に鋼材の両端付近に逆極性の極値が確認できた。鋼材を深く埋設するほど値は小さくなる傾向がみられた。亜鉛メッキで防食した鋼材も同じ条件で埋設しており、今後定期的に計測して、結果の比較と検証を行っていく。

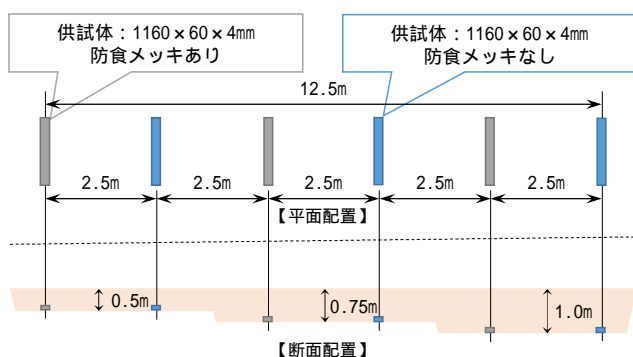


図10 埋設実験における鋼材の配置

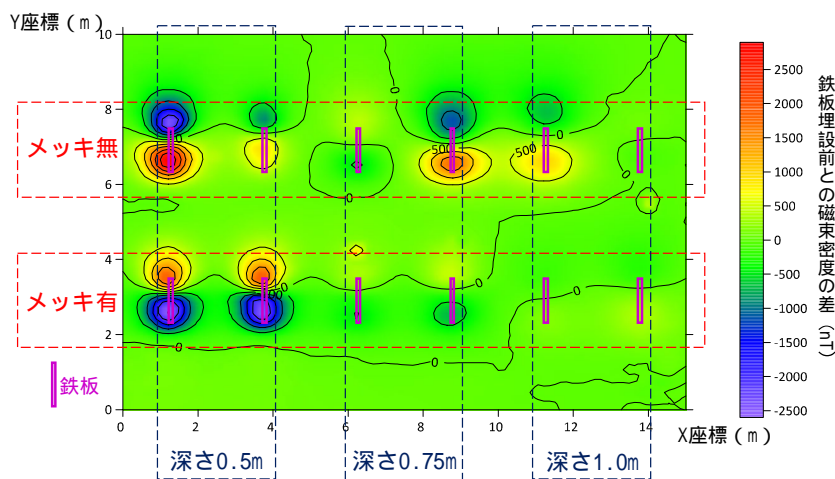


図11 埋設された鋼材による磁束密度の分布

4．研究成果

本研究では、室内実験により鋼材の腐食に伴う磁性の変化について研究を行い、屋外実験では磁気探査によって腐食状況を地表から非接触で探る方法の有効性を調べた。室内実験・屋外実験を通して以下のことが分かった。

- ・鋼材表面のみの薄い腐食では、磁化の変化は確認できない。
- ・鋼材の体積が減少するような腐食では、体積の減少に伴って鋼材の磁化が減少することが確認できた。
- ・帯状の鋼材では、体積の減少に伴って端部に生じる磁場の極値が変化することが確認できた。
- ・帯状の鋼材が、地中にあっても磁場とその極値を確認することができた。

以上のことから、磁気探査が鋼材の地中での腐食に対して、非破壊調査として利用できる可能性が高いという結論に至った。今後、更なる検証を行い欠損箇所の特的手法の確立や地中に埋設した鋼材の長期的な変化を確認していく。

<参考文献>

- 1) 公益社団法人地盤工学会：地盤調査の方法と解説，2013.
- 2) 藤田智弘，久保哲也，宮武裕昭，宮田喜壽：補強土壁の維持管理手法構築に向けた実大模型実験(その1)，土木学会第69回年次学術講演会 III-309，2014.
- 3) 久保哲也，藤田智弘，青池邦夫，宮武裕昭，宮田喜壽：補強土壁の維持管理手法構築に向けた実大模型実験(その2)，土木学会第69回年次学術講演会 III-310，2014.
- 4) 酒井英男，小田博之，山田剛士，城地琴博，田中保士：活断層トレンチ調査地点近傍の電磁気探査，活断層研究，12,65-71,1994.
- 5) 酒井英男，野村成宏，泉吉紀，竜田尚希：古墳の鉄製副葬品の検出における非破壊のレーダ・磁気探査の有効性の検討，日本情報考古学会講演論文集 Vol. 25，2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 TATTA Naoki, SOGA Hiroyuki, KUSAKA Hirohiko, HARA Takashi	4. 巻 37
2. 論文標題 MODEL EXPERIMENT STUDY ON EFFECTIVENESS OF COUNTERMEASURES AGAINST BUMP OF ROAD EMBANKMENT SURFACE CAUSED BY EARTHQUAKE	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geosynthetics Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 13~18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5030/jcigsjournal.37.13	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 寺迫太陽, 兵動太一, 吉崎達矢, 内田慎哉, 竜田尚希, 高津沙和, 永井裕之	4. 巻 15
2. 論文標題 富山県で排出された種々のバイオマスを追加したまさ土の締固め特性とCBR値	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 地盤改良シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 327-332
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 吉崎達矢, 兵動太一, 寺迫太陽, 内田慎哉, 竜田尚希, 永井裕之	4. 巻 15
2. 論文標題 富山県で排出されたバイオマスを混合したまさ土の液状化特性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 地盤改良シンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 507-512
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 酒井英男, 境悠希, 丹保俊哉, 竜田尚希, 杉本利英	4. 巻 第17号
2. 論文標題 立山カルデラ内で掘削されたボーリングコアの磁化による崩壊堆積物の研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 富山県立山カルデラ研究紀要	6. 最初と最後の頁 13-19
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 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 高松尚輝, 竜田尚希, 酒井英男
2. 発表標題 磁気研究による液状化地盤の判定精度の向上と年代推定への利用
3. 学会等名 公益社団法人地盤工学会北陸支部第2回JGSユースネットワーク研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 片山裕介, 竜田尚希, 酒井英男
2. 発表標題 金属材料の腐食を非破壊の電磁気調査で探る新規方法の開発
3. 学会等名 公益社団法人地盤工学会北陸支部第2回JGSユースネットワーク研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥村太揮, 兵動太一, 寺迫太陽, 吉崎達矢, 竜田尚希
2. 発表標題 種々のバイオマスを混合したまさ土の修正CBR値
3. 学会等名 公益社団法人地盤工学会北陸支部第2回JGSユースネットワーク研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 北川陽士, 兵動太一, 寺迫太陽, 竜田尚希, ハザリカヘマンタ, 前田翼
2. 発表標題 礫分が配合珪砂の液状化特性に及ぼす影響
3. 学会等名 公益社団法人地盤工学会北陸支部第2回JGSユースネットワーク研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉崎達矢, 兵動太一, 寺迫太陽, 竜田尚希
2. 発表標題 カニ・竹パウダーがまさ土の液状化特性に及ぼす影響
3. 学会等名 公益社団法人地盤工学会北陸支部第2回JGSユースネットワーク研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉崎 達矢, 兵動 太一, 竜田 尚希
2. 発表標題 竹パウダーの添加率がまさ土の液状化特性に及ぼす影響
3. 学会等名 令和4年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 北川 陽士, 兵動 太一, 寺迫 太陽, 竜田 尚希, ヘマンタ ハザリカ, 前田 翼
2. 発表標題 礫分含有率が配合珪砂の液状化強度特性に及ぼす影響
3. 学会等名 令和4年度土木学会中部支部研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹内滉二, 竜田尚希, 酒井英男
2. 発表標題 金属材の腐食を非破壊の電磁気調査で探る新規方法の開発
3. 学会等名 公益社団法人地盤工学会北陸支部 第1回ユースネットワーク研究発表会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 高津沙和, 兵動太一, 寺迫太陽, 吉崎達矢, 竜田尚希
2. 発表標題 富山県で排出された種々の廃棄物系バイオマスとまさ土の混合土の締固め特性
3. 学会等名 公益社団法人地盤工学会北陸支部 第1回ユースネットワーク研究発表会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 竜田尚希, 酒井英男
2. 発表標題 土中に埋設された金属の腐食状況を磁気で探る研究
3. 学会等名 福井地域地盤研究会 第16回(令和3年度第1回)技術者交流会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 S. Ochiai, A. Fujita, T. Tokunari, K. Kawamura, H. Sakai, S. Nagao
2. 発表標題 Distributions of 210Pb, 137Cs, and physical properties in bottom sediments of West Nanao Bay, Japan
3. 学会等名 Radiation Protection Dosimetry, RPD-21-0453.R2.
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 酒井英男, 野村成宏, 泉吉紀, 竜田尚希
2. 発表標題 古墳の鉄製副葬品の検出における非破壊のレーザ・磁気探査の有効性の検討
3. 学会等名 日本情報考古学会論文集, Vol. 45, 41-44.
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 酒井英男, 菅頭明日香, 山元一広, 桑井智彦
2. 発表標題 青銅の磁化-微量不純物の研究
3. 学会等名 日本情報考古学会論文集, Vol. 45, 45-49.
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 村上 豊和、原 隆史、竜田 尚希
2. 発表標題 グラウンドアンカーが施工されたのり面の定量的な健全度評価 手法の検討及び検証
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 道路の段差抑制構造	発明者 竜田尚希, 山本剛	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、6807590	取得年 2020年	国内・外国の別 国内

〔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	酒井 英男 (Sakai Hideo) (30134993)	富山大学・理学部・客員教授 (13201)	

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