

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02003

研究課題名(和文) 新しく開発した超高压変形装置を用いたD''層のレオロジーに関する実験的研究

研究課題名(英文) Experimental study on the rheology of D'' layers using a newly developed ultra-high pressure deformation apparatus

研究代表者

東 真太郎 (Azuma, Shintaro)

東京工業大学・理学院・助教

研究者番号：60771293

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,700,000円

研究成果の概要(和文)：地球マントルの最下部に位置するD''層の変形特性を解明するため、開発した変形装置「回転式ダイヤモンドアンビルセル」とD''層を構成する鉱物(ポストペロブスカイト、ペリクレーズ)を用いた超高压大ひずみ変形実験に挑戦した。D''層の圧力条件(120 GPa)でペリクレーズの変形実験を行うと、変形とともに結晶の方位が特定の方向に揃っていくことが確認された(結晶方位選択配向)。この結果から、観測で確認されているD''層の地震波異方性にペリクレーズの変形が大きく寄与している可能性が示された。一方ポストペロブスカイトの結果は、回転式ダイヤモンドアンビルセル中での合成の成功に留まった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震波観測から最下部マントル(D''層)では、地震波の異方性(地震波の伝わる方向、振動方向によって速度が異なる現象)が認められている。この一因として、D''層を構成するとされるポストペロブスカイトやペリクレーズの変形による結晶方位が揃うこと(結晶方位選択配向)が考えられてきた。その中で、我々はペリクレーズを実際のD''層の超高压条件(120 GPa)で変形実験をすることで、変形によって発達する結晶方位選択配向を明らかにし、ペリクレーズはD''層を占める体積が比較的小さいにも関わらず、観測される地震波異方性に大きく寄与していることを示すことができた。

研究成果の概要(英文)：To evaluate the rheological properties of the D'' layer, which is located at the lowest part of the Earth's inner mantle, we challenged the ultrahigh-pressure large strain deformation experiments using the developed deformation apparatus 'rotational diamond anvil cell' and minerals constituting the D'' layer (post-perovskite and periclase). Deformation experiments of the periclase showed that the crystallographic preferred orientation developed with strain. Our analysis of seismic anisotropy based on the deformation experiments indicates that the deformation of the periclase contributes significantly to the observed seismic anisotropy of the D'' layer. On the other hand, the post-perovskite results were only successfully synthesized in a rotational diamond anvil cell.

研究分野：高温高压変形実験、岩石レオロジー

キーワード：レオロジー 高温高压 変形実験 D''層 ポストペロブスカイト ペリクレーズ

1. 研究開始当初の背景

地震波観測の進展によって、下部マントルと液体核の境界である D''層における動的構造 (ダイナミクス) が次々と明らかになっている。例えば、D''層における地震波異方性(Vinnik et al., 1996. *GRL*), 地震波反射面(地震波速度の不連続)(Hutko et al., 2006. *Nature*), 超低速度層(ULVZ)の存在(Willams and Garnero, 1996. *Science*)など多くの地震学的観測が報告されている。D''層は沈み込んだプレートが行き着く最終地点であり、また新たに上昇流(プルーム)が生まれる領域でもあるため、これらの地震波観測の鉱物学的、かつ物理学的背景を紐解くことがマントルダイナミクスとその進化を明らかにするための鍵である。しかし、これらの地震波観測の解明に向けた実験的研究からのアプローチは非常に限定的なものに留まっていた。その最たる要因は、D''層の圧力を再現できる変形実験装置が無く、定量的な変形実験データが乏しかったためである。具体的には、これまでの先行研究では D''層の主要構成鉱物であるポストペロブスカイト(MgSiO_3)を用いて、既存のダイヤモンドアンビルセルにより一軸圧縮試験を行うことで検証がされてきたが(例えば Merkel et al., 2007 *Science*), ダイヤモンドアンビルセルは変形実験用にデザインされていないため、変形特性に大きな影響を及ぼす圧力、ひずみ(変形の程度)、ひずみ速度(変形する速度)を制御下に置き、実際の圧力下で変形実験が行われた例はない。これらの問題を打開するために、我々研究グループは既存のダイヤモンドアンビルセルを変形実験用に改良することで、これまで行えなかった圧力条件(D''層や核)での定量的な(変形特性に影響を及ぼすパラメーターを制御下においた)変形実験が可能な回転式ダイヤモンドアンビルセルの開発を行っていた(Nomura, Azuma et al., 2017. *RSI*; Azuma, Nomura et al., 2018. *HPR*)(図 1)。本研究は、この新しく開発された回転式ダイヤモンドアンビルセルを D''層のレオロジーに応用することで、その流動場とダイナミクスに直結する問題である (1) D''層の地震波異方性の原因と、(2) D''層における流動強度(変形のしやすさ) を明らかにするための実験的研究に取り組むことを目的として開始した。

2. 研究の目的

本研究は、独自に開発した回転式ダイヤモンドアンビルセルを下部マントルと核の境界である D''層の超高压条件に応用することで、これまで行えなかった実験的研究に着手し、D''層を構成する鉱物の流動特性を理解することを目的として行った。特に D''層のダイナミクスの理解に直結する問題である「(1) D''層の構成鉱物における微細組織の発達(結晶方位選択配向)」, 「(2) D''層における流動強度の決定」という 2つの問いに焦点を当てた。

(1) D''層の構成鉱物における微細組織の発達(結晶選択配向)=地震波異方性の検証

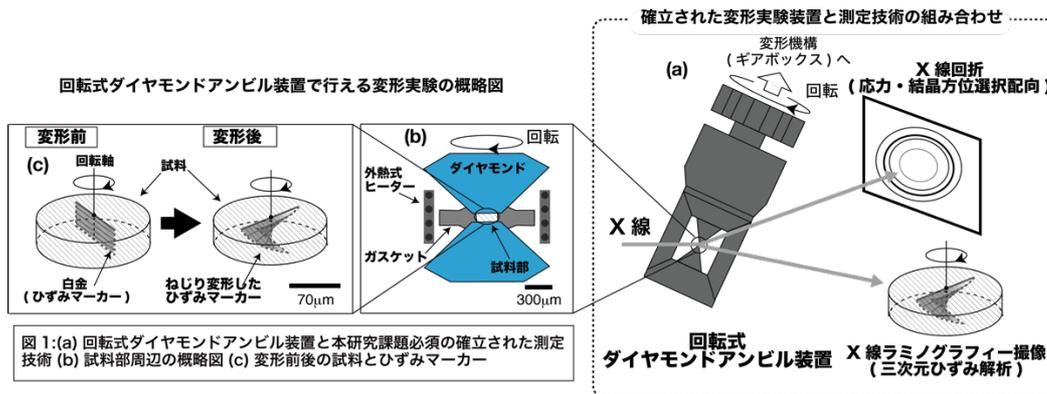
先行研究から D''層の地震波異方性の原因は、構成鉱物であるポストペロブスカイトの結晶方位選択配向(結晶のすべり面とすべり方向の活動のしやすさの違いから、変形によって結晶方位がある特定の方向に揃う現象)であることが示唆されている(例えば Miyagi et al., 2010. *Science*)。本研究では、回転式ダイヤモンドアンビルセルを用いて、D''層を構成するポストペロブスカイト($(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$)とフェロペリクレーズ($(\text{Mg}, \text{Fe})\text{O}$)の超高压大ひずみ変形実験を行うことで、D''層の結晶方位選択配向の発達を検証する。

(2)D”層における流動強度の決定

地球内部の下部マントルより深い領域での流動強度については、これまで未踏の領域としてほとんど手つかずの状態に残っている。特に D”層以深における流動強度は、その技術的困難さから定量的な変形実験からの力学データは皆無である。そこで我々の開発した回転式ダイヤモンドアンビル装置を用い、ポストペロブスカイトとフェロペリクレスの大ひずみ変形実験を行うことで、超高压下(>125 GPa)における歪-応力曲線(流動強度)の取得し、それに対して圧力、ひずみ速度、温度を変化させることでその影響の調査を試みた。

3. 研究の方法

変形実験装置と実験手法及び測定技術について



使用した変形装置である回転式ダイヤモンドアンビル装置の圧力発生機構は既存のダイヤモンドアンビルセルと同じく、上部のネジを回転させダイヤモンドアンビルを押し込むことによって高圧力を発生させる。それとは別に上部のダイヤモンドアンビルは超高压回転式変形速度制御システム(ダイヤモンドアンビルの回転速度を制御するギアボックス)と連結しており、独立に回転することで、超高压下において試料を変形させる(図1a-b)。試料に与えるのはねじり変形であるため、ひずみは無限に与えることが可能となっている(図1c)。この回転式ダイヤモンドアンビルセルを用いることで、既に D”層に相当する圧力(=125–136 GPa)での大ひずみ変形実験が可能となっている。この回転式ダイヤモンドアンビルセルは大型放射光施設 SPring-8(BL47XU)に導入、技術開発を行っており、高輝度放射光 X 線によって実験中の試料の二次元回折パターンの取得による応力測定、結晶方位選択配向の決定と、ラミノグラフィー撮像の技術(Nomura and Uesugi, 2016 *RSI*)により試料内部に埋め込まれたひずみマーカーの三次元撮像が可能となっている(図2)。特にポストペロブスカイトについては常圧回収できないことから、変形特性を調べる上で X 線回折のその場観察が必要不可欠になる。そのことを踏まえ、回転式ダイヤモンドアンビル装置を用いて、圧力 125–135 GPa という超高压下でのねじり変形実験を大型放射光施設 SPring-8 にて行う(図1)。上記の変形実験技術と測定技術を D”層を構成する鉱物に対して応用し、実際の下部マントルの圧力条件での流動特性(流動応力、結晶方位選択配向)を検証する。

変形試料と実験準備

出発物質を合成するために、まずマルチアンビル装置を用いてブリッジマナイト(Mg, Fe)SiO₃とフェロペリクレス(Mg, Fe)Oを合成する。その合成物質を回転式ダイヤモンドアンビルセル

の試料室(レニウムガasketに空けた直径~40um の穴)に圧媒体と共に封入し、キュレットサイズが 0.12 mm の直径をもつ対になったダイヤモンドアンビルによって 120 GPa 以上に加圧する。加圧されたサンプル全体を均質にレーザー加熱していくことによって圧力 120 GPa、温度 2500 K においてブリッジマナイトをポストペロブスカイトに相転移させて出発物質とする。ひずみを決定する Pt マーカーは集束イオンビーム(FIB)によって、あらかじめ試料のねじり方向に対して垂直に蒸着しておく。一方で高温実験には外熱式抵抗加熱法を用いる。高温技術の向上を目標としたオフライン (SPring-8 では行わない室内実験) での予備実験で、ヒーターの最適化(主にヒーター自体の形状や抵抗加熱線 (Pt, Ir, W) の選定や温度較正など) も並行して行う。

4. 研究成果

まず本研究を遂行する過程において、回転式ダイヤモンドアンビルセルのいくつかの問題点を見出すことができた。以下に示す問題点については、解決策を見出し、現在解決に向けて対応している。

まず初めにブリッジマナイトとフェロペリクレスの2相系の出発物質を回転式ダイヤモンドアンビルセル中で合成することを試みたが、困難を極め断念した。SPring-8 における XRD 測定により試料の一部はポストペロブスカイトに相転移していることが確認できたが、想定以上にブリッジマナイトの結晶の芯のような部分が残る、ポストペロブスカイトの応力を決定できるほどの XRD におけるピーク強度を得ることができないと判断した。この要因としては、ブリッジマナイトからポストペロブスカイトへの相転移に対して、回転式ダイヤモンドアンビルセルの片側レーザー加熱では効率的ではなかったことが考えられる。これについて、温度勾配の小さい均質なレーザー加熱を実現すべく、回転式ダイヤモンドアンビルセルを両側レーザー加熱が可能な構造に修正し導入予定である。加えて、この結果を踏まえ、本研究ではポストペロブスカイトとペリクレス(MgO)の単相での変形実験からデータを得るという方針に転換した。

さらに回転式ダイヤモンドアンビルセルでは、高温実現のため金属線を利用した外熱式抵抗加熱を採用していたが(図 1)、熱電対によって測定していた試料周囲のレニウムガasketの温度と試料室内の温度のギャップが非常に大きいことがわかった。これについては、加熱方式を一から見直し、ハロゲンランプによる近赤外線を試料に集光させる近赤外イメージ炉の導入を予定している。

ペリクレスについて D''層を含む下部マンツルの超高压(45-120 GPa)で変形実験をした結果、各温度圧力における応力-歪曲線(図 2)と結晶方位選択配向(図 3)を得ることに成功した。応力-歪曲線からは全ての変形実験においてペリクレスがひずみ > 50-100% において塑性変形の定常状態に達していることが確認できた。そして、ひずみが大きくなるにつれて結晶方位選択配向の発達も観察された。ペリクレスの結晶方位選択配向は低圧低温(< 63 GPa, 室温)では、{110} <1-10> が支配的なすべり系であるのに対して、高压高温(65-120 GPa, > 500 K)では、{100} <011> が支配的なすべり系へと遷移することが確認された。本研究で着目している D''層で発達する結晶方位選択配向について、この結果は過去の先行研究で指摘されたスリップ面とも整合的である(Girard et al., 2012; Amodeo et al., 2012)。その一方で、従来の DAC による 1 軸圧縮実験の検証で、ペリクレスの支配的なスリップ面が圧力の上昇とともに {110} が活性化する可能性を論じている先行研究とは矛盾している(Lin et al., 2019)。この矛盾については、従来の DAC では結晶選択配向が十分に発達するほどのひずみを試料に与えることができていないことが一因として考えられる。本研究で得られた D''層の圧力条件下におけるペリクレスの結晶方位選択配向

と弾性定数から、地震波異方性の計算を行った(図4)。この結果から、D''層において観察される $V_{SH} > V_{SV}$ と本研究結果から得られた地震波異方性は整合的であることと、ペリクレスによるS波の偏角異方性は、剪断方向に約5%、剪断面の剪断方向に垂直な方向に約9%以上起きる可能性が示された。ペリクレスはD''層を占める体積はそれほど大きくはないと予想されるが(~15-20 vol%), その地震波の異方性に大きく寄与することが予想される。一方で、ポストペロプスカイトについては、回転式ダイヤモンドアンビルセル中で合成の成功に留まってしまい、変形実験を成功させることはできなかった。しかし、本研究によりポストペロプスカイトの合成と大ひずみ変形実験を行うためのノウハウはほぼ確立されつつあり、引き続きポストペロプスカイトの応力-歪曲線と結晶方位選択配向の取得を目指したい。

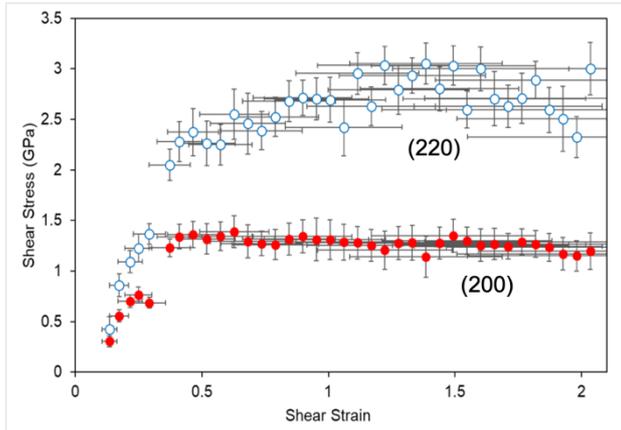


図2. 圧力45 GPa, 室温で行った変形実験の応力-ひずみ曲線. 白丸と赤丸シンボルはそれぞれペリクレスの(220)面と(200)面におけるせん断応力を示している。

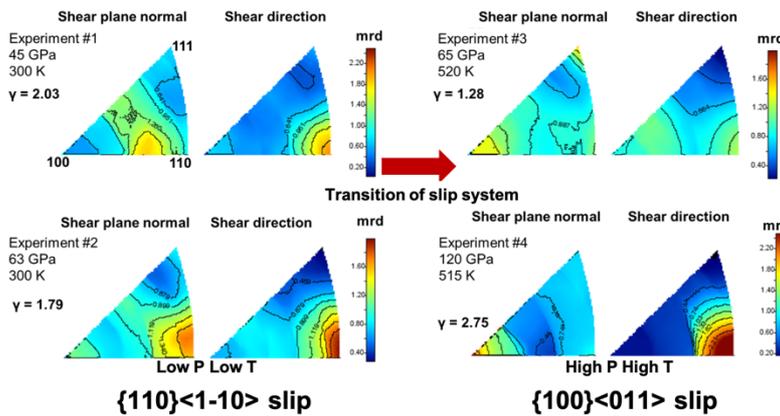


図3. 各温度圧力条件における変形実験で得られたペリクレスの結晶方位を示した逆極点図. せん断面に垂直方向とせん断方向について示している。

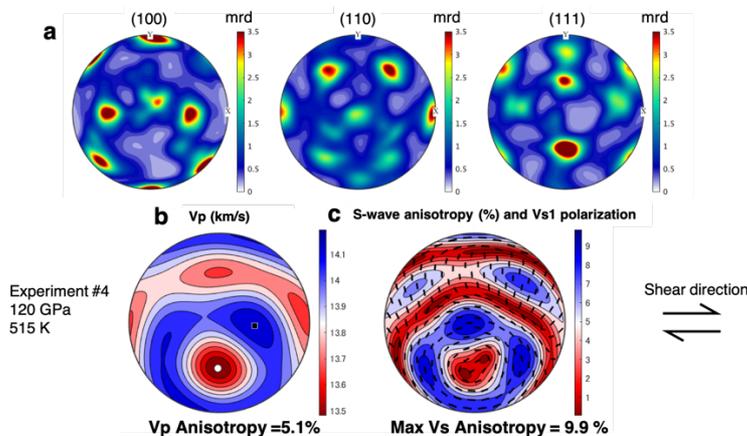


図4. (a)120 GPaにおける変形実験で得られたペリクレスの結晶方位を示した極点図と、(b)極点図を基に計算されたVpとVsの異方性を示した図。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Kurosawa Kosuke, Genda Hidenori, Azuma Shintaro, Okazaki Keishi	4. 巻 48
2. 論文標題 The Role of Post Shock Heating by Plastic Deformation During Impact Devolatilization of Calcite (CaCO ₃)	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020GL091130	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 Katayama Ikuo, Matsuoka Yuhki, Azuma Shintaro	4. 巻 6
2. 論文標題 Sensitivity of elastic thickness to water in the Martian lithosphere	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Progress in Earth and Planetary Science	6. 最初と最後の頁 51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40645-019-0298-6	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 Kousa M., Iwasaki S., Ishimatsu N., Kawamura N., Nomura R., Kakizawa S., Mizumaki M., Sumiya H., Irifune T.	4. 巻 40
2. 論文標題 Element-selective elastic properties of Fe ₆₅ Ni ₃₅ Invar alloy and Fe ₇₂ Pt ₂₈ alloy studied by extended X-ray absorption fine structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 High Pressure Research	6. 最初と最後の頁 130 ~ 139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/08957959.2019.1702175	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 Caracas Razvan, Hirose Kei, Nomura Ryuichi, Ballmer Maxim D.	4. 巻 516
2. 論文標題 Melt-crystal density crossover in a deep magma ocean	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth and Planetary Science Letters	6. 最初と最後の頁 202 ~ 211
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.epsl.2019.03.031	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 KUWAHARA Hideharu, NOMURA Ryuichi, NAKADA Ryoichi, IRIFUNE Tetsuo	4. 巻 29
2. 論文標題 Melting Phase Relations of KLB-1 Peridotite and Mid-Ocean Ridge Basalt and Gravitational Stabilities of Partial Silicate Melts at the Uppermost Lower Mantle	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Review of High Pressure Science and Technology	6. 最初と最後の頁 75 ~ 85
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4131/jshpreview.29.75	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9件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 Park Yohan, 東 真太郎, 岡崎 啓史, 上杉 健太郎, 安武 正展, 野村 龍一
2. 発表標題 High pressure shear deformation experiments on MgO periclase under pressure up to 120 GPa: Toward understanding anisotropy in the lowermost mantle
3. 学会等名 JpGU2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鎌戸 隆行, 東 真太郎, 岡崎 啓史, 藤崎 俊平, 黒澤 耕介, 玄田 英典
2. 発表標題 炭酸塩岩の高歪速度変形実験と衝突現象における降伏強度と昇温の推定
3. 学会等名 JpGU2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福原 大二郎, 東 真太郎, 片山 郁夫, 猿谷 友孝
2. 発表標題 低温環境における氷摩擦実験と火星内部レオロジー構造への応用
3. 学会等名 JpGU2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 東真太郎、野村龍一、上杉健太郎、靄聡子、西原遊、土居峻太、有本岳史、入船徹男
2. 発表標題 回転式DACを用いた超高压変形実験から考察する下部マントルとスラブの強度コントラスト
3. 学会等名 第7回愛媛大学先進超高压科学研究拠点(PRIUS)シンポジウム(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shintaro Azuma, Ryuichi Nomura, Kentaro Uesugi, Yu Nishihara, Shunta Doi, Takeshi Arimoto, Testuo Irifune
2. 発表標題 Two phase deformation experiments of bridgmanite and ferropericalse under high pressure and large strain
3. 学会等名 Feedbacks between Mantle Composition, Structure and Evolution(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Azuma, R. Nomura, K. Uesugi, Y. Nishihara, T. Arimoto
2. 発表標題 Deformation experiments of bridgmanite and ferropericalse; Implication for the strength of the subducted slab in the lower mantle
3. 学会等名 American Geophysical Union Fall Meeting(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東真太郎、野村龍一、上杉健太郎、西原遊、土居峻太、有本岳史、入船徹男
2. 発表標題 Development of the rotational diamond anvil cell for high-pressure deformation experiments and its measurement systems
3. 学会等名 JpGU 2019(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東真太郎, 野村龍一, 上杉健太郎, 西原遊, 土居峻太, 有本岳史, 入船徹男
2. 発表標題 回転式ダイヤモンドアンピルセルの開発と下部マントル物質の大歪変形実験
3. 学会等名 JpGU 2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東真太郎, 野村龍一, 上杉健太郎, 西原遊, 土居峻太, 有本岳史, 入船徹男
2. 発表標題 下部マントルに沈み込んだスラブ内レオロジー
3. 学会等名 鉱物科学会2019年年会
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	野村 龍一 (Nomura Ryuichi) (40734570)	京都大学・白眉センター・特定准教授 (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
---------	---------