

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：35403

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05158

研究課題名（和文）ショットピーニングにおけるショット速度計測と残留応力へのショット材質の影響の解明

研究課題名（英文）Shot Velocity Measurement and the Effect of Shot Material on Residual Stress in Shot Peening

研究代表者

太田 高裕（Ohta, Takahiro）

広島工業大学・工学部・教授

研究者番号：00759160

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：アルミニウム合金に対して、4種類の直径のジルコンショットと3種類の直径のスチールショットを用いた空気式ショットピーニングを実施した。ショット速度に及ぼす空気圧、ショット径、材料の影響を、高速度カメラと粒子画像流速計（PIV）を用いた直接測定技術に基づき実験的に検討した。また、厚み方向の残留応力分布をX線回折（XRD）法により系統的に測定し、ショット速度、ショット径、ショット材料を考慮した逆同定式により定量的に評価し、産業応用につなげた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ショットピーニングはショットが高速で金属に衝突することで金属表面に圧縮残留応力を与える加工法である。簡便に疲労強度を向上できるため、航空機・自動車をはじめ多くの製品の部品に適用されている。ショットピーニングの主な施工条件はショット速度、ショット径、材料などである。本研究ではショットの運動エネルギーを決定するショット速度を高速度カメラと粒子画像流速計を用いて広い領域で計測し、セラミックとスチールショットに対してショット速度と空気圧、ショット径の関係を明らかにした。さらに、残留応力分布とショット速度、ショット径の関係式を構築し、ショットピーニング条件と残留応力分布の関係を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Pneumatic shot peening with zircon shot of four different diameters and steel shot of three different diameters was performed on an aluminum alloy. The effects of air pressure, shot diameter, and material on shot velocity were experimentally investigated based on direct measurement technology using a high-speed camera and a particle image velocimetry (PIV). The residual stress distribution through the thickness direction was systematically measured by X-ray diffraction (XRD) method and then quantitatively evaluated by an inversely identified equation considering the shot velocity, diameter, and materials for industrial application.

研究分野：加工学

キーワード：ショットピーニング 残留応力 ショット速度 ショット径 アルミニウム合金 粒子画像流速計

1. 研究開始当初の背景

ショットピーニングはショットが高速で金属に衝突することで金属表面に圧縮残留応力を与える加工法である。ショットピーニングは簡便に疲労強度を向上できるため、航空機・自動車をはじめ多くの製品の部品に適用されている。しかし、ショット速度の計測は難しく、過去の計測結果はピンポイントで測定した結果のみであり、計測したショット速度と残留応力分布の関係を定量的に調査した結果は見当たらない。

2. 研究の目的

ショットピーニングにおいて、最も重要な物理量であるショット速度の計測が十分に行われていない。特に、ノズルからの距離によるショット速度の変化は計測された事例が報告されていない。また、ショット径とショット速度の関係およびショット径と残留応力の関係を明確にすることが疲労強度向上効果を評価する上で重要であるが、実測された事例はない。

本研究では、ショット速度の計測に近年開発された高速ビデオカメラと粒子画像流速測定 (PIV) を適用し、ノズルから供試体までの広い領域でショット速度の変化を計測し、ショット径・ショット材質のショット速度に及ぼす影響を定量的な関係式を明らかにする。また、実験により、計測したショット速度と供試体の残留応力分布の定量的な関係式を明らかにする。

3. 実験方法

3.1 ショット速度の計測

空気式ショットピーニングは吸引式の装置を用いた。ノズル径は 4 mm である。試験装置を Fig. 1 に示す。実験に使用したショットの仕様を Table 1 に示す。ジルコンビーズ FZB20, FZB40, FZB100 およびスチールショット ASR70, ASR170, ASR230 を用いた。空気圧を 0.1 ~ 0.6 MPa でショットを投射した。

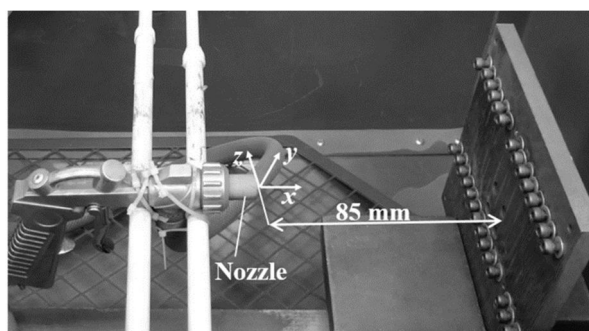


Fig. 1 Experimental set up [2].

nac Image Technology 社製高速度カメラ MEMRECAM ACS-1 を使用した。シャッタースピード 1/250000 秒、フレームスピード 1/500000fps の画像解像度は 1028 × 720 ピクセルで、約 120mm の領域をカバーした。撮影時に試料を設置しなかった。試料に衝突したショットが跳ね返るため、ショットの動きが複雑になり、ショット速度の測定が困難になったためである。PIV は、フローテック・リサーチ社の FtrPIV を使用した。ショットの動きを推定するために、粒子追跡法を用いた。取り込み窓は 24 × 24 ピクセルとした。合計で 234 組の画像を解析し、中央値を用いてショット速度を決定した。

Table 1 Specifications of shots [2].

Material	Shot	Diameter (average)	Hardness	Specific gravity
Zircon	FZB20	0.850-0.600 mm (0.73 mm)	650-800 HV	3.85
	FZB40	0.425-0.250 mm (0.34 mm)		
	FZB100	0.180-0.125 mm (0.15 mm)		
Low alloy steel	ASR230	0.850-0.500 mm (0.71 mm)	45-52 HRC	≤7.0
	ASR170	0.600-0.335 mm (0.50 mm)		
	ASR70	0.335-0.125 mm (0.30 mm)		

3.2 ショットピーニング方法

実験には、空気吸引式サンドブラスト装置を使用した。試験片を移動速度 4.2 mm/s で複数回往復移動させ、全面にピーニングを行った。ショットピーニングは試験片の片面全面にカバーレージが 200% となるように約 8 s/mm で施工した。ノズル孔の直径は 5 mm であった。スタンドオフ距離は 100 mm であった。空気圧は 0.2 ~ 0.6 MPa で行った。0.1 MPa ではショットを投射することができなかった。

3.3 残留応力の計測

残留応力測定に使用した試験片は、硬度 68 ~ 70 HV、耐力 188 MPa、引張強度 244 MPa のアルミニウム - マグネシウム合金 (A5052-H34) である。試験片の厚さは 5 mm、幅は 19 mm、長さは 75 mm である。ショットピーニング後の残留応力分布は、X 線回折法で測定した。測定にはポータブル X 線残留応力測定装置 μ-X360 (株式会社パルステック) を用いた。試験片の残留応力は、表面を電解研磨した後の試験片の表面で測定した。電解研磨した部分は直径 8 mm である。各ショットピーニング条件に対して 1 枚の試験片を使用し、同じ深さの 2 方向で残留応力を測定した。2 つの応力が異なる場合は、追加で測定した。測定された残留応力の最大標準偏差は 15 MPa であった。

4. 実験結果

4.1 ショット速度の計測

Fig. 2(a)(b) は高速度カメラで撮影した飛行中のジルコンショット FZB20 と FZB100 の画像である。空気圧は 0.6 MPa の場合である。両画像とも、ブレのない撮影ができるようにシャッター速度 1/250000 秒を選択した。直径が小さい FZB100 のショットは、ショット数が多く映し出され、ショットの流れの広がりも FZB20 より大きくなる。

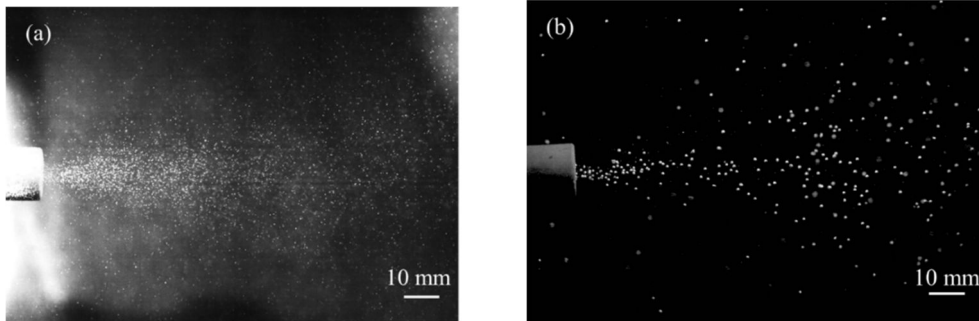


Fig. 2 Images captured by the high-speed camera of the in-flight zircon shots at 0.6 MPa: (a) FZB100 and (b) FZB20 [2].

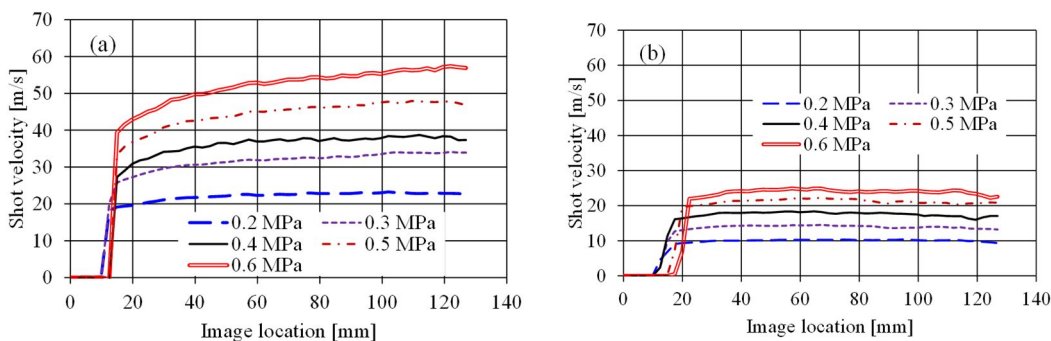


Fig. 3 Shot velocity distribution via PIV at the nozzle center line using zircon shots. The horizontal axis shows the position in the high-speed camera image (Fig. 2) in the shot travel direction: (a) FZB100 and (b) FZB20 [2].

Fig. 3(a)(b)には FZB100, FZB20 のノズル中心での速度分布を示す。FZB100 のショット速度は、ノズルから投射された後、急速に上昇し、ノズルから 120 mm の位置で定常速度に達する。さらに、空気圧の上昇に伴い、定常速度も上昇した。ノズル内では、高圧の空気を音速近くまで加速させることができるが、ノズルの長さが短いため、十分な加速ができず、ショットの速度はノズルから噴射される空気速度よりも低くなる。ノズルからショットが射出した後、高圧空気でもショットを加速させた。空気速度は急激に低下するが、ショットの質量は空気質量よりも大きいため、ショットは慣性によって一定の速度で飛行する。

FZB20 は FZB100 の速度分布と同じ傾向を示したが、ショット速度は FZB100 より遅くなった。FZB40 でも同様の傾向が見られた。

Fig. 4(a)にはジルコンショットにおけるショット速度、空気圧、ショット径の関係を示す。空気圧 0.1 MPa でショットが照射されなかったため、0.1 MPa でショット速度を 0 とした。プロットされた線は、式(1)から得られる近似結果である。式(1)の係数は実験結果と予測結果の誤差の二乗和を最小化する係数を決定した。

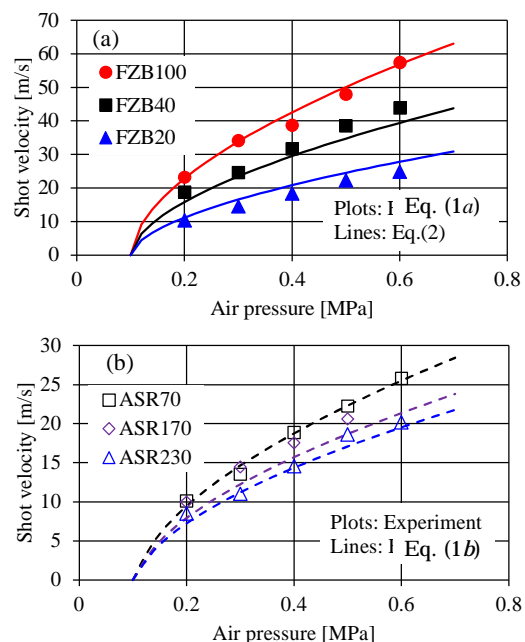


Fig. 4 Effect of air pressure and shot diameter on shot velocity using steel shots. Plotted experimental data are fitted with lines calculated using equation (1): (a) Zircon shots and (b) Steel shots [2].

$$v = 35.54(p - 0.1)^{0.567} D^{-0.457} (1a)$$

ショット速度は、空気圧($p-0.1$)の0.567乗に比例している。ショット径が大きくなるとショット速度が低下するため、ショット速度はショット径の約-0.457乗に比例する。

Fig. 4(b)にはスチールショットにおけるショット速度、空気圧、ショット径の関係を示す。比重が大きいため、ジルコンショットに比べて、ショット速度は遅い。式(2)に係数式を示す。

$$v = 28.46(p - 0.1)^{0.588} D^{-0.256} (1b)$$

ショット速度は、空気圧($p-0.1$)の0.588乗に、ショット径の約-0.256乗に比例することがわかった。ジルコンショットに比べて、スチールショットではショット径の感度が小さい。

4.2 残留応力の計測結果

Fig.5 に、ショットピーニング後の残留応力分布の測定結果を示す。残留応力は、試験片の長手(x)方向と幅(y)方向の2方向で測定した。 x 方向と y 方向の残留応力に有意な差は見られなかった。FZB20の深さ0.1mmなど、残留応力が大きく異なる場合は、同じ深さで異なる位置で2回測定した。いずれのショットにおいても、空気圧やショット径が大きくなるにつれて、圧縮残留応力の範囲が深くなっている。FZB100では、最大圧縮応力は表面で0.2MPaと0.4MPa、残留応力分布はほぼ同じで、最大圧縮残留応力は内部で0.6MPaであった。FZB40とFZB20は、最大圧縮応力が表面で0.2MPa、最大圧縮残留応力が内部で0.6MPaと0.4MPaであった。最大圧縮残留応力は両者とも-200~-150MPaであり、大きな差はなかった。

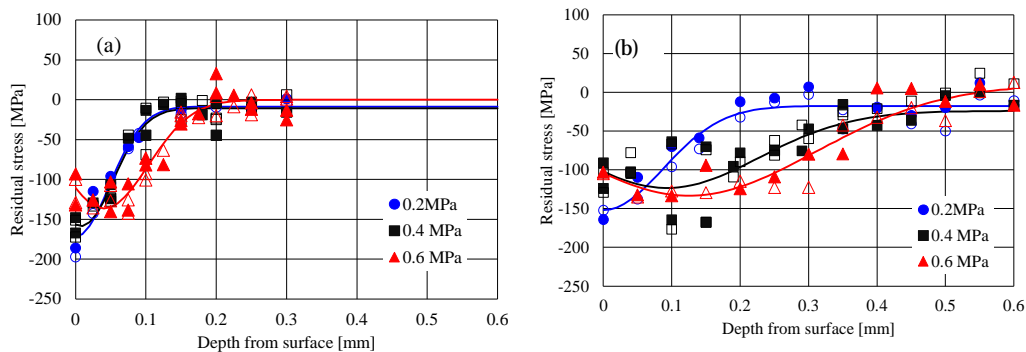


Fig. 5 Residual stress distributions after shot peening using zircon shots. Experimental data plotted are x -stress (solid) and y -stress (open) points fitted with lines calculated using equation (2): (a) FZB100 and (b) FZB20 [2].

Robertson はショットピーニング後の残留応力分布の実験式として式(2)を提案した[1]。

$$\sigma_{(z)} = A \exp \left[\frac{-2(z - Z_d)^2}{W^2} \right] + B \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_{(z)}$ は深さ方向 z の面内残留応力分布、 $A+B$ は最大残留応力に等しく、 Z_d は最大残留応力の深さ、 W は残留応力が飽和する深さである。係数 A, B, Z_d, W は、計測結果を用いて最小二乗法で同定した。Fig. 5には、式(2)によって計算された残留応力分布を実線でプロットした。実験の残留応力分布をよく模擬している。

5. 残留応力分布へのショット径とショット速度の影響

残留応力分布に対するショット速度 v とショット径 D の影響を調べるため、式(2)の係数とショット径と速度の影響を簡単な形で表現するために、式(3)を提案する。

$$\sigma_{(z)} = (K_A v^{N_A} D^{M_A}) \exp \left[\frac{-2\{z - (K_Z v^{N_Z} D^{M_Z})\}^2}{(K_W v^{N_W} D^{M_W})^2} \right] + (K_B v^{N_B} D^{M_B}) \quad (3)$$

ここで、 $K_{(A,B,Z,W)}$, $N_{(A,B,Z,W)}$, and $M_{(A,B,Z,W)}$ は係数を示す。

Fig. 6には式(3)の係数とショット速度およびショット径の関係を示す。プロットされた点はFig. 5に用いた係数であり、ワイヤフレームは式(3)を用いて回帰した結果である。最大圧縮残留応力 $A+B$ は、ショット径およびショット速度に依存せず、アルミニウム合金の降伏応力によって決定される。最大圧縮応力の深さ Z_d は、ショット速度およびショット径が大きくなるにつれて増加した。残留応力の深さ W は、ショット速度およびショット径の増加とともに増加した。

式(3)を検証するために、ショット径の異なるジルコンショット FZB30を用いた場合の残留応力分布を計測した。FZB30の平均直径は0.51mmである。FZB30のショット速度は式(1a)を用いて算出すると、空気圧0.2MPaで13m/s、0.4MPaで24m/s、0.6MPaで32m/sである。

Fig. 7にはFZB30について、式(3)を用いて予測した残留応力分布と実測結果を比較を示す。実測結果と式(1)および式(3)を用いた予測はよく一致した。実験条件の範囲内であれば、試験を行っていないショット径、ショット速度でも(3)式による残留応力分布の予測方法が検証できた。

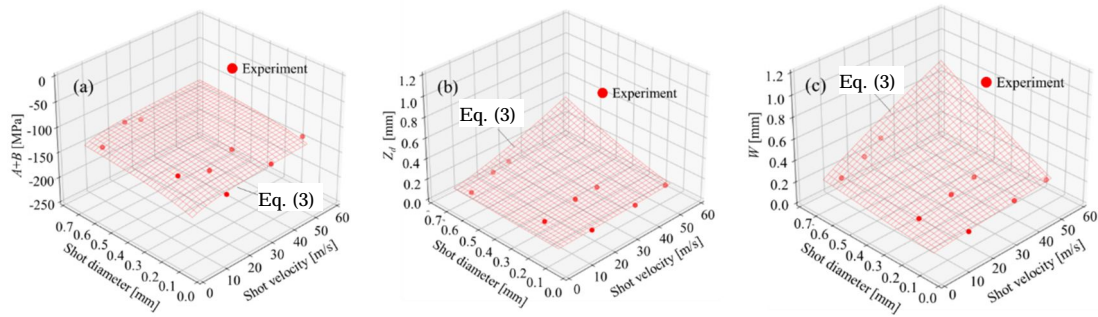


Fig. 6 Relationship between the coefficients in equation (2) and the shot velocity and diameter. The plots are the data using in Fig. 5, and the wireframes are the results of regression using equation (3): (a) $A+B$, (b) Z_d , and (c) W [2].

6. まとめ

アルミニウム合金 A5052 板の板厚方向の残留応力分布について、ショット速度とショット直径の影響を考慮した予測式を作成した。その結果、以下のような結論が得られた。

- (1) ショット速度は、高速度カメラで撮影した画像から PIV で直接測定した。ショット速度に対する空気圧とショット径の影響は開発した式で表された。ジルコンショットでは、ショット速度は空気圧の約 0.567 乗とショット径の -0.457 乗に比例する。スチールショットでは空気圧の 0.588 乗とショット径の約 -0.256 乗に比例する。ジルコンショットに比べて、スチールショットでは同じ空気圧とショット径でもショット速度が遅く、ショット径の感度が小さい。
- (2) ジルコンショットにおいて、厚み方向の残留応力分布とショット速度、ショット径との間に定量的に対応する予測式を開発した。この式の係数は、系統的に測定されたデータを用いて逆同定された。
- (3) 同定した予測式を用いて、FZB20、FZB40、FZB100 の各ショット速度及び直径における板厚方向の残留応力分布を予測した。また、FZB30 を用いた新たなショットピーニング条件において、この予測式の妥当性を実証した。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科研費番号 20K05158 の助成を受けた。X 線残留応力計測では大阪大学接合科学研究所教授 麻 寧緒先生にご協力頂いた。東海大学大学院生の岡田理紀さん、He Jiaxin さん、東海大学学部生の河野直季さん、水島滉貴さんには、実験にご協力いただいた。

参考文献

- [1] Robertson, G.T., 1997, The effect of shot size on the residual stresses, resulting from shot peening, Shot Peener Magazine., 11(3), 46–47.
- [2] Ohta, T., He, J., Takahashi, S., and Ma, N., 2023, Measurement and Identified Prediction Equation for Residual Stress Distribution in Aluminum Alloy A5052 under Various Pneumatic Shot Peening Condition, Journal of Materials Engineering and Performance, <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08031>.

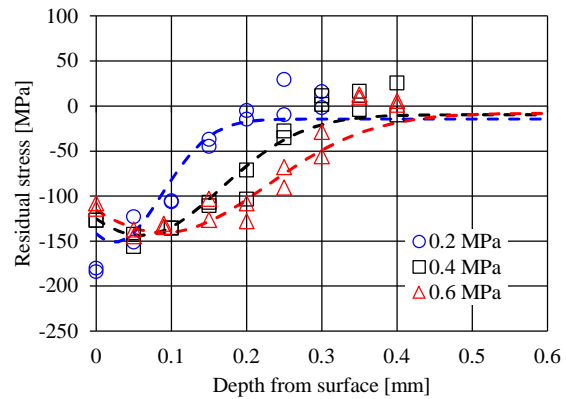


Fig. 7 Verification of the residual stress distribution for FZB30. Plotted experimental data are fitted with lines calculated using equations (1a) and (3) [2].

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Ohta Takahiro, Sato Yoshihiro	4. 巻 119
2. 論文標題 Effect of saturation peening on shape and residual stress distribution after peen forming	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The International Journal of Advanced Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 4659 ~ 4675
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s00170-021-08473-6	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4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 He Jiaxin, 水島 滉貴, 太田 高裕
2. 発表標題 空気式ショットピーニングにおけるピーニング強度に及ぼすショット径の影響
3. 学会等名 第72回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 太田高裕
2. 発表標題 高強度アルミニウム合金板のピーン成形
3. 学会等名 塑性加工学会 板材成形分科会：第84 回SMF セミナー（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 太田 高裕
2. 発表標題 空気式ショットピーニングの数値解析 - ショット速度と残留応力分布の関係 -
3. 学会等名 2021年度塑性加工春季講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 He Jiaxin, 太田 高裕
2. 発表標題 空気式ショットピーニングにおけるショット速度とアークハイトの関係
3. 学会等名 第71回塑性加工連合講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

2023年4月に成果を投稿した論文が早期公開されました。

Ohta, T., He, J., Takahashi, S., Ma, N., 2023, Measurement and Identified Prediction Equation for Residual Stress Distribution in Aluminum Alloy A5052 under Various Pneumatic Shot Peening Condition, Journal of Materials Engineering and Performance, <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08031>.

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	麻 寧緒 (Ma Ninshu) (10263328)	大阪大学・接合科学研究所・教授 (14401)	

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