

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K17665

研究課題名（和文）脳卒中片麻痺患者の屋外環境下における歩行障害のメカニズムの解明

研究課題名（英文）Clarifying the mechanism of gait disturbance under outdoor environment in patients with hemiparesis due to stroke

研究代表者

関口 雄介（Sekiguchi, Yusuke）

東北大学・大学病院・理学療法士

研究者番号：60535095

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：1つ目の研究は、歩行速度と下肢関節間の協調による力学的制御の関係について調べた。健康若年者の歩行中における下肢関節間の力学的な協調により、歩行速度の増加に伴い、推進の時間的制御が行われていた。一方で、歩行速度の速い脳卒中片麻痺患者の歩行中における下肢関節間の力学的な協調は、推進の制御ではなく下肢の支持性への制御が行われていた。

2つ目の研究は、脳卒中片麻痺患者の日常生活上での活動量と不整地を歩行した際の歩容との関係を調べた。活動量の多い片麻痺患者は、不整地を歩行した際、より麻痺側下肢のステップ長が増大し、非麻痺側膝関節を伸展させていることが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

健康者や脳卒中片麻痺患者において歩行速度により、下肢の各関節で発揮された力がどのように制御されているかを明らかにすることで、将来的に脳卒中片麻痺患者の歩行支援を行うウェアラブル型ロボット装具を作製する際の基礎的な知見となり得る。また、地域社会での身体活動量が高い脳卒中片麻痺の症例は、不整地でどのような歩き方をしているかを明らかにすることで、新たなトレーニング方法や装具を創出する知見となり得る。

研究成果の概要（英文）：The first study examined the relationship between walking speed and kinetic control by coordination among lower limb joints. Increase of walking speed caused temporal control of propulsion by kinetic coordination among lower limb joints during walking in healthy young adults. On the other hand, the kinetic coordination among lower limb joints during walking in patients with hemiparesis due to stroke with high walking speed showed control of lower limb support rather than control of propulsion.

The second study examined the relationship between the walking activity in daily life and the kinematics during gait in patients with hemiparesis when walking on uneven terrain. We found that the patients with high activity had a greater increase in step length on the paretic side and knee extension on the non-paretic side when walking on uneven terrain.

研究分野：歩行解析

キーワード：歩行 脳卒中片麻痺 非対称性 身体活動量 適応 不整地 協調性 歩行速度

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

脳卒中片麻痺患者にとって地域社会での自立した歩行による移動は社会参加を促し、生活の質を向上させる上で必要な能力である。しかしながら、脳卒中片麻痺患者の地域社会での自立した移動は制限されているとされており、実際に再び地域社会で自立し歩行可能な片麻痺患者は全体の 60% という報告がある[1]。先行研究では、脳卒中片麻痺患者において地域社会での自立した歩行が制限される要因として、歩行距離やバランス能力、歩行速度が低下することが挙げられている[2]。更に実環境の情報を得るために歩数計を使用して地域社会での歩行による移動量を調べた研究では、単一の要因というよりも、歩行距離やバランス能力の低下、麻痺の程度といった複数の要因が組み合わさって、地域社会での自立した歩行が制限されるとしている[3]。これは、脳卒中片麻痺患者において地域社会で自立した歩行が障害されるメカニズムは複雑であり、単一の簡易的な臨床評価を使用しただけではメカニズムの解明が困難であることを示唆している。

近年、3次元動作解析装置を使用した歩行解析の発展により、屋内環境下での脳卒中片麻痺患者の歩行障害におけるメカニズムについては、運動力学的観点から詳細に解明されつつある。人の歩行においては、下肢により前方への推進力を発生させることや下肢への荷重を維持することが必要とされる。このような歩行中の推進力や下肢への荷重は、健常者において単独での関節の力発揮だけではなく、下肢関節間の力学的な協調により維持されている[4]。一方で、脳卒中片麻痺患者においては異常共同運動により下肢関節間の協調的な力発揮が障害される。このような下肢関節間の力学的な協調の特性が、どのような歩行パラメーターの特性に影響を与えているかは明らかになっていなかった。

また、このような脳卒中片麻痺患者の屋内環境下における歩行測定の結果は、実際の地域社会における歩行測定の結果と異なることが予想される。屋外環境下では、屋内環境下と異なり平坦な路面ではなく不整地を有する路面が多い。健常者の屋外環境下での歩行の下肢の運動学的特性は、屋内環境下と異なることが指摘されている。脳卒中片麻痺患者の屋外環境下における歩行の力学的特性を明確にし、更にその力学的特性と地域社会での歩行による移動量との関連を明らかにすることで脳卒中片麻痺患者において地域社会で自立した屋外歩行が障害されるメカニズムの解明の一助となる可能性がある。本研究課題における問いは、「脳卒中片麻痺患者の地域社会での歩行による移動量は、屋外環境下の歩行中における麻痺側下肢の力学的特性とどのように関連するのか」ということである。

2. 研究の目的

本研究の目的は以下の2つである。

(1) 健常者における代表的な歩行パラメーターである歩行速度を変化させた際の下肢関節間の力学的な協調の特性を調べる。また、脳卒中片麻痺患者における下肢関節間の力学的な協調の特性と歩行速度による関係についても調べる。

(2) 健常者及び脳卒中片麻痺患者の屋外環境下の歩行時における運動学的特性を明らかにし、地域社会での歩行の移動量との関係を調べる。

3. 研究の方法

(1) 健常若年者 6 名 (29 ± 4 歳) 及び健常高齢者 7 名 (75 ± 4 歳) を対象とし、各被験者は 7m の歩行路を 0.3m/s, 0.6m/s, 1.0m/s, 1.3m/s, 1.6m/s と歩行速度を変えて歩行を行い、3次元動作解析装置(Motion Analysis 社製 MAC3D)と床反力計(90cm × 60cm ; アニマ社製)で計測した。下肢の股関節、膝関節、足関節の各関節モーメントの時系列データから主成分分析を用いて第 1 主成分と第 2 主成分を算出した(図 1)。各主成分の寄与率、最大値のタイミングを算出した。

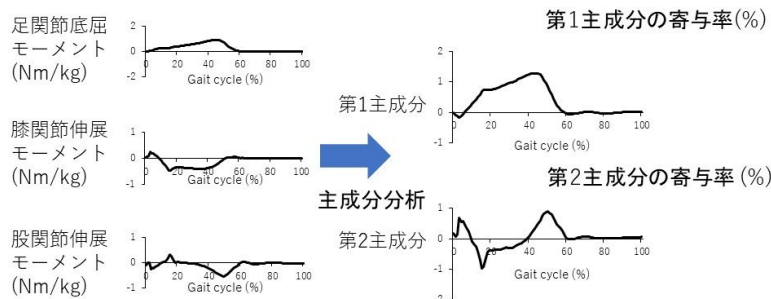


図 1. 下肢関節モーメントを用いた主成分分析

(2) 脳卒中片麻痺患者 29 名 (58 ± 11 歳, 発症後月数 43 ± 49 カ月) と健常者 12 名 (53 ± 10 歳) を対象とし、7m の歩行路を脳卒中片麻痺患者は快適歩行速度で、健常者は遅い歩行速度で歩行した。その際、研究(1)と同様の方法で測定及び解析を行った。

(3) 健常若年者 12 名 (24 ± 1 歳) を対象とし、各被験者は、快適歩行速度にて 7m の平地歩行路での歩行及び 3 種類の不整地(人工芝生, 柔らかいマット, 凹凸がある不整地)(図 2)が設置された 7m の歩行路での歩行を行った。測定方法は、(1)と同様の方法で測定を行った。研究計画当初、下肢関節の各モーメントの主成分を調べる計画であったが、通常の平地と異なりランダムに配置された凹凸の地面を考慮した上で不整地上での床反力を解析することが技術的に困難

であったため、歩行中の下肢の運動学的パラメーター及び歩行の時空間的パラメーターを解析することとした。



図 2. 3 種類の不整地. 左から柔らかいマット、人工芝生、凹凸がある不整地

(4)慢性期脳卒中片麻痺患者 14 名(59±9 歳; 発症月数 71±54 カ月)と健常者(59±14 歳)を対象とし、各被験者は、快適歩行速度で人工芝生上と平地歩行上での歩行を 7m の歩行路で行った。測定方法は(1)と同様の方法で測定を行った。動作解析の測定を終えた後、加速度(ActiGraph 社製 GT9X)を用いて 5 日間、歩数の測定を行った。歩行による移動量として 1 日あたりの歩数の平均値が算出された。二元配置分散分析を用いて、地面と被験者の特性を要因とし、運動学的パラメーター及び歩行の時空間的パラメーターを比較した。また、各パラメーターにおいて平地歩行時の条件と人工芝生上での条件間の差分を算出し、その差分と 1 日あたりの歩数との相関関係を、ピアソンの積率相関係数及びスピアマンの順位相関係数を用いて調べた。

4. 研究成果

(1) 年齢及び歩行速度による下肢関節モーメントにおける第 1 主成分の貢献度の違い

下肢関節モーメントの第 1 主成分の貢献度及び最大値のタイミングに対する、年齢(貢献度: $p = 0.001$, 最大値の時間: $p = 0.012$)及び歩行速度(貢献度: $p = 0.003$, 最大値のタイミング: $p = 0.023$)の有意な主効果を認めた。図 4 が示すように健常若年者より高齢者における第 1 主成分の貢献度が低く、第 1 主成分の最大値が出現するタイミングが早かった。また、歩行速度の増大に伴い最大値が出現するタイミングが遅くなり、第 1 主成分の貢献度が低下していた。

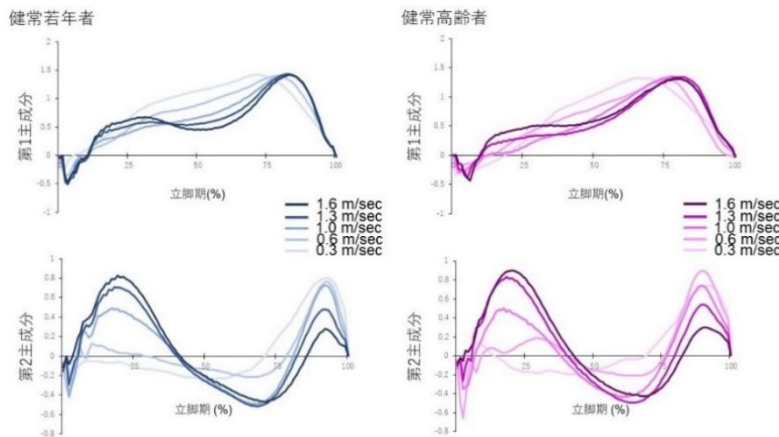


図 3. 各主成分の時系列データ

下肢関節モーメントの第 1 主成分は図 3 が示すように立脚期の後半にかけて最大値が出現した 1 峰性の波形であり、歩行中の推進力の波形と類似していた。そのため、下肢関節間の力学的協調性の主な役割として、推進力の発生に寄与することが考えられる。また、第 1 主成分の貢献度と最大値のタイミングの結果から、歩行速度の増加による推進力の増加は、下肢関節間

の力学的な協調性による時間的な制御が関与していることが考えられる。

これらの結果は、下肢関節間の力学的な協調性による歩行速度増大のメカニズムを示すとともに下肢関節間の力学的な協調性による時間的な制御が歩行速度増大にとって重要であることを示している。

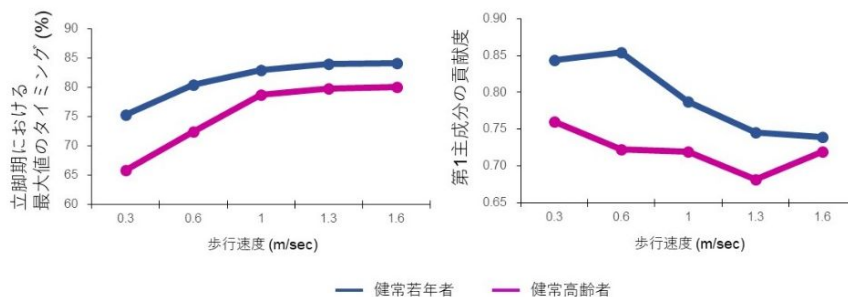


図 4. 立脚期における第 1 主成分の最大値のタイミング及び主成分の貢献度

(2) 脳卒中片麻痺患者における下肢関節間の力学的協調性の特性と歩行速度との関係

第 1 主成分及び第 2 主成分の寄与率において、麻痺側下肢、非麻痺側下肢、健常者の左側下肢間で有意な差は認められなかった。一方で第 1 主成分と第 2 主成分の累積寄与率は、有意に非麻痺側下肢において、麻痺側下肢及び健常者の左側下肢よりも低下していた ($p < 0.05$)。また、第 1 主成分の最大値のタイミングは麻痺側下肢において非麻痺側下肢や健常者の左側下肢よりも有意に早かった ($p < 0.05$)。

脳卒中片麻痺患者の歩行速度と麻痺側下肢における第 1 主成分の寄与率との間に有意な負の

相関関係を認めた ($r = 0.52, p = 0.004$)。また、第2主成分の寄与率との間に有意な正の相関関係を認めた ($r = 0.50, p = 0.005$)。一方で麻痺側下肢における第1主成分の最大値のタイミングとは有意な相関関係は認められなかった ($r = 0.15, p = 0.45$)。最大値のタイミングに関する相関関係の結果は、(1)で行った健常若年者における結果と異なっており、第1主成分の最大値のタイミングがより早くなっている麻痺側下肢は、下肢関節間の力学的協調性による時間的な制御が困難である可能性がある。また、相関関係の結果は、これまでの先行研究では脳卒中片麻痺患者の歩行速度にとって、推進力の制御が重要であることが考えられてきたが[5]、第2主成分の役割であることが予想される、下肢の支持性への制御が歩行速度にとって重要な要素であることが考えられる。本研究結果は、脳卒中片麻痺患者において下肢関節間の力学的協調性により歩行速度を増加させるメカニズムの一端を明らかにした。

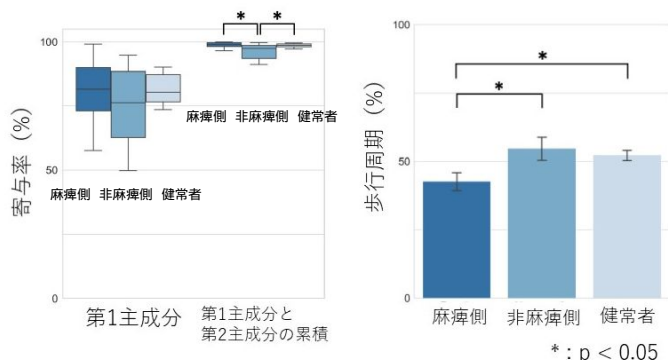


図4. 主成分の貢献度と第1主成分の最大値のタイミング及び時系列データ

(3) 健常若年者における不整地歩行時の歩行パラメーターに対する影響

凹凸のある不整地条件において、平地歩行条件と比較し、有意に歩行速度は遅く ($p = 0.013$)、歩行ステップ長は短く ($p = 0.043$)、歩行周期 ($p = 0.020$) 及び立脚期の時間 ($p = 0.013$) は増大した。また、右下肢の最大股関節屈曲角度 ($p < 0.001$) において有意に増大した。

左右の非対称性に関するパラメーターの結果については、凹凸のある不整地条件において、平地歩行条件と比較し、立脚期の時間 ($p < 0.001$) 及び遊脚期の時間 ($p = 0.001$) の非対称性が有意に増大したが、ステップ長の非対称性は有意な増大が認められなかった。また、凹凸のある不整地条件のみ遊脚期の股関節屈曲角度 ($p = 0.031$) 及び立脚期の股関節伸展角度 ($p = 0.006$) の非対称性が有意に増大した。

先行研究と同様に、より不安定を有する不整地条件においては、cautious gait を呈していた

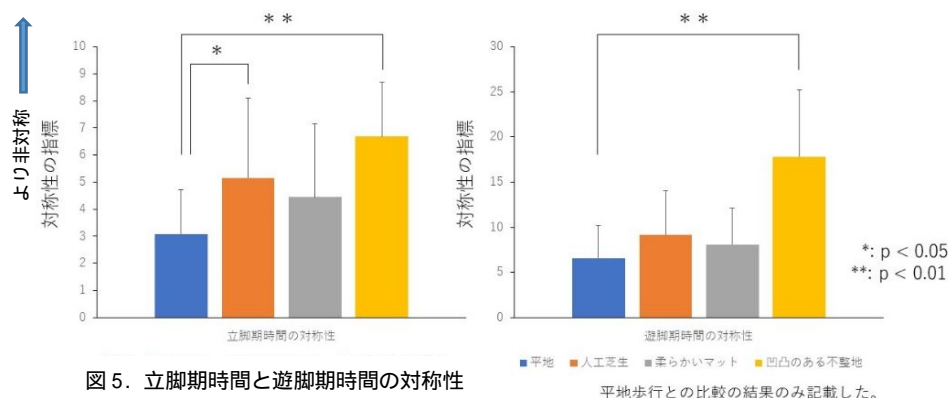


図5. 立脚期時間と遊脚期時間の対称性

[6]。また、同様の不整地条件において、歩行の距離因子の非対称性を有さず時間因子の非対称性を生じていた。この結果は、左右それぞれの地面が

動く速度が異なるスプリットレッドミル歩行時の非対称性を調べた先行研究と類似した研究結果を示していた[7]。空間的に制約された環境下では、先行研究に示された通り、エネルギー効率を最適化するため歩行の時間因子を非対称にすることで適応している可能性が示唆された。本研究は、歩行の対称性という観点から健常若年者の不整地歩行への適応を明らかにした。

(4) 人工芝生上での歩行の歩行パラメーターに対する影響

有意な交互作用を示したパラメーターは、ステップ長の対称性 ($F_{(1,24)} = 5.44, p = 0.028, p_2 = 0.19$) と代償動作である遊脚期の骨盤の挙上角度であった ($F_{(1,24)} = 12.63, p = 0.002, p_2 = 0.35$)。脳卒中片麻痺患者においてのみ人工芝生上での歩行時、有意にステップ長の対称性が増大した ($p = 0.013$) (図8)。一方で、人工芝生上において、脳卒中片麻痺患者の遊脚期の代償動作である骨盤の挙上角度は増大せず、健常者のみ有意に増大した ($p = 0.007$) (図9)。脳卒中片麻痺患者は、自らの歩行の特性を示す代償動作と非対称性を改善させ、歩行中、人工芝

生という不整地に適応することが明らかとなった。

(5) 芝生上での歩行における歩行パラメーターの変化量と歩行の移動量との関連

脳卒中片麻痺患者において、芝生上での歩行における麻痺側ステップ長($r = 0.65$, $p = 0.012$) (図6の左側の図)、非麻痺側立脚期の非麻痺側膝伸展角度 ($r = 0.59$, $p = 0.026$) (図6の右側の図)、麻痺側下肢の蹴り出し時の麻痺側足関節底屈角度 ($r = 0.68$, $p = 0.008$) の変化量と歩行の移動量との間に有意な正の相関関係を認めた。一方で、健常者において歩隔及び接地時の膝伸展角度と有意な正の相関関係を認めた。

本研究では、計画当初予定にあった、歩行時の下肢関節間での力学的協調性による不整地に対する適応と歩行の移動量との関係は明らかに出来なかったが、歩行時の左右対称性と代償動作という観点から、脳卒中片麻痺患者の歩行時の不整地への適応様式を明らかにした。更に歩行の移動量を増大させる、不整地上での適応様式が、脳卒中片麻痺患者と健常者で異なることが明らかとなった。脳卒中片麻痺患者の不整地上での歩行時において、非麻痺側下肢の代償動作による麻痺側ステップ長の増大が歩行時の移動量にとって重要な要素となり得る。今後、これらの知見を基に、脳卒中片麻痺患者の屋外歩行時において移動量増大に向け、これまでの歩行リハビリテーションにおいて着目されていなかった不整地への適応という新たな視点からのアプローチ方法を創造していく。

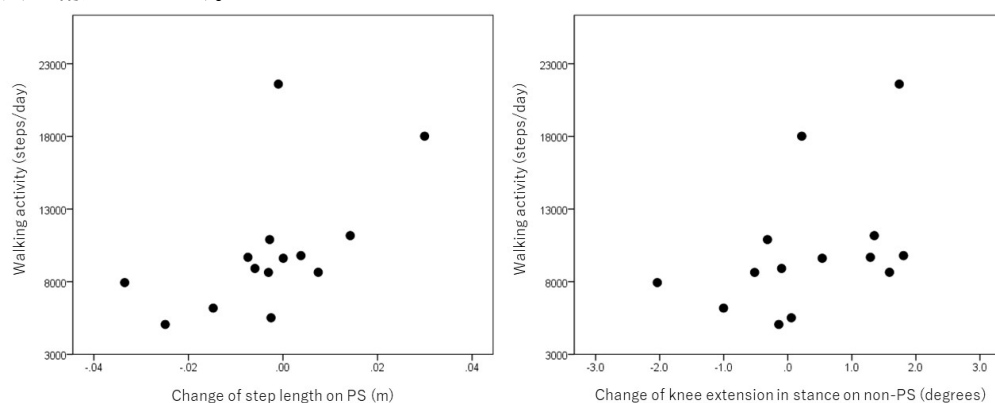


図6. 歩行の移動量と麻痺側下肢ステップ長及び非麻痺側膝伸展角度の変化量

- [1] S.E. Lord, K. McPherson, H.K. McNaughton, L. Rochester, and M. Weatherall, Community ambulation after stroke: how important and obtainable is it and what measures appear predictive? *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 85 (2004) 234-9.
- [2] G.D. Fulk, C. Reynolds, S. Mondal, and J.E. Deutsch, Predicting home and community walking activity in people with stroke. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 91 (2010) 1582-6.
- [3] G.D. Fulk, Y. He, P. Boyne, and K. Dunning, Predicting Home and Community Walking Activity Poststroke. *Stroke* 48 (2017) 406-411.
- [4] H. Sadeghi, S. Sadeghi, F. Prince, P. Allard, H. Labelle, and C.L. Vaughan, Functional roles of ankle and hip sagittal muscle moments in able-bodied gait. *Clin. Biomech. (Bristol, Avon)* 16 (2001) 688-95.
- [5] S.A. Roelker, M.G. Bowden, S.A. Kautz, and R.R. Neptune, Paretic propulsion as a measure of walking performance and functional motor recovery post-stroke: A review. *Gait Posture* 68 (2019) 6-14.
- [6] C. Wade, M.S. Redfern, R.O. Andres, and S.P. Breloff, Joint kinetics and muscle activity while walking on ballast. *Hum. Factors* 52 (2010) 560-73.
- [7] J. Stenum, and J.T. Choi, Step time asymmetry but not step length asymmetry is adapted to optimize energy cost of split-belt treadmill walking. *J. Physiol.* (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yusuke Sekiguchi, Dai Owaki, Keita Honda, and Shin-Ichi Izumi
2. 発表標題 The contribution of intralimb kinetic coordination in lower limb to control of propulsion and weight support at a wide range of gait speed in young and elderly people
3. 学会等名 ISPRG (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関口 雄介
2. 発表標題 カム-バネ式継手付き足関節装具による脳卒中片麻痺患者の歩行への効果
3. 学会等名 第2回日本神経理学療法学会 Special Interest Groups (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 関口 雄介, 大脇 大, 本田 啓太, 出江 紳一
2. 発表標題 関節の硬さから考える片麻痺患者の歩行再建
3. 学会等名 第50回日本臨床神経生理学会学術大会 (招待講演)
4. 発表年 2020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
研究協力者	大脇 大 (Owaki Dai)	東北大学 (11301)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	本田 啓太 (Honda Keita)	東北大学 (11301)	

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