

機関番号：54601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20500498

研究課題名（和文） 組込技術を活用した介護予防用高機能中敷きの開発

研究課題名（英文） Development of High Performance Shoes for Care Prevention by making use of a Embedded Technology

研究代表者

早川 恭弘（HAYAKAWA YASUHIRO）

奈良工業高等専門学校・電子制御工学科・教授

研究者番号：50180956

研究成果の概要（和文）：

本研究では日常的に使用する靴にバランス矯正機能を付加し、高齢者に安定した歩行を提供できる高機能靴の開発を行うことを目的とし、組込技術を活用した靴を試作した。具体的には、歩行時の足部圧力分布を計測する靴を試作し、歩行時の足部重心軌道を解析可能な靴を開発した。また、理想的な安定歩行を実現するために、個性的な歩行と理想的な歩行の差を足裏に提示する機能を有する中敷きを開発するために、中敷き要素剛性変化による足部提示に関する有効性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

In this study, we developed a new type of high performance shoes by making use of an embedded technology in order to realize a stable walking for elderly person. Since the shoes have soft rubber elements, pressure sensors, valves and compressors, the shoes can measure pressure change of each element in an insole. That is to say, we can estimate trajectory of gravity position of the foot by calculation of pressure values in elements. Further, the effectiveness of the proposed insole that indicates a difference between an ideal walking trajectory and an inherent walking trajectory of a subject is cleared through some experimental results.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：介護予防・支援技術

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、高齢者の歩行時における転倒事故が問題となっている。この原因の一つとして、高齢者は下肢の筋力低下に伴い、骨盤と大腿骨の角度に変化が生じるため、歩行時における足裏の重心位置が外側に移動することが

挙げられる。その結果、足の設置環境によって身体のバランスを崩し、転倒すると報告されている。そこで、この問題を解決するため、筋力向上トレーニングや転倒予防体操などの講習会が各自治体で実施され、介護予防の必要性が増している。

(2) 具体的に健康な身体を維持する介護予防のための運動として、日常的に気軽にできる運動（散歩やウォーキング）などが注目されている。その結果、ウォーキング用靴として様々な靴が市販されている。しかし、これらの靴は靴底の形状、剛性が一定であり、受動的要素から構成されている。そのため、歩行時の痛みを緩和するなどの効果は期待できるが、股関節など骨の歪みによる歩行障害の矯正、外反母趾などによる足部変形の矯正などの治療を能動的に行うことは難しいと考えられる。また、上半身の姿勢変動及び下肢筋力の衰えにより足裏部重心位置が足部外側に移動する転倒誘発歩行パターンを補正し能動的に安定歩行を実現することはできない。特に、高齢者の場合、転倒により大腿骨頸部が骨折すると、寝たきりになる危険性が増すことから、介護予防のための運動が逆に寝たきりの原因となる可能性がある。そこで、地面と靴の設置環境及び足部重心位置により中敷きの剛性及び形状を能動的に変化させ、安定・安心な歩行が可能な靴の実現が求められている。

## 2. 研究の目的

本研究では、受動要素である靴を能動要素化し、付加価値を増した靴の実用化に向けた開発を行うことを目的とする。ここで、人間親和性を有する高機能中敷きを開発するためには、靴底或いは中敷きの構造設計及び制御回路の小形化の開発が必要不可欠である。そこで、本研究では、下記の項目を目的とする。

- (1) 歩行時の中敷きアクチュエータ内部圧力の変動から歩行パターンの流れを推移するためのシステムを検討する。そして、内圧変動と身体の運動の相関関係を明らかにする。また、小型分布圧力センサ及び圧力センサを内蔵させ、センサ部とバランス調整部を分離した中敷き構造を開発する。
- (2) 中敷きの実用化を目的として、歩行に対し最適な各要素（加圧部、弁、制御回路など）の配置を検討する。また、踵部、土踏まず部、爪先部に配置する柔軟ゴム要素の最適な大きさと格納場所を検討する。さらに、安定・安心歩行に効果的な中敷き構造を決定する。
- (3) 試作した中敷きの圧力制御を行うための制御回路の試作と小形化を行う。具体的には、中敷き内に制御回路を搭載するために、dsPIC 及び AVR 小型マイコンを検討する。そして、アクチュエータ内圧測定により、歩行パターンの検出を行うための回路設計及び計測システムの構築を行う。また、

能動的にアクチュエータを制御し、歩行パターンの矯正を行うための制御システムの検討を行う。すなわち、中敷きに内蔵した圧力センサを使用することにより、使用者の歩行パターンを計測し、理想的な歩行との差異を中敷きに配置したアクチュエータの形状変形により足裏部に刺激を与える。これにより、使用者の歩行パターンの矯正を行うための有効性を検討する。さらに、本制御システムを実現するための組み込み技術を実現する。

- (4) 靴を評価する場合、足部各関節部に作用するトルク、回転角度を正確に測定することが難しいことから、官能試験が一般的に使用されている。そこで、開発した高機能中敷きの有効性及び身体への影響を定量的に評価するための足部評価試験装置の試作を行う。

## 3. 研究の方法

本研究では、歩行パターン（歩行の癖）を計測し、安定・安心な歩行を実現するための中敷きを開発するために、中敷き要素内部圧力変動と歩行パターンの相関関係を明らかにする。また、歩行の癖を計測しながら歩行の補正を行うために、要素内圧力及び分布圧力センサの利用による計測制御システムを構築する。さらに、効果的な足裏刺激部位を調べ、中敷きの最適形状及び構造について明らかにする。また、安定・安心な歩行を実現するための要素内圧力制御回路を中敷きに格納するための組込技術について検討する。これらを検討するために、以下の方法により研究を実施する。

### (1) 歩行パターン推定用中敷きの試作と歩行計測

靴底と地面との接地環境により上半身の動きが変化し、結果として、靴底に作用する重心位置が変動する。そこで、異なる接地環境における歩行動作を明らかにするため、センサを内蔵した中敷きを試作する。具体的には、中敷き部に使用するスポンジコア・ソフトラバーアクチュエータ内に圧力センサ及び小型圧力分布センサを組み込んだ中敷きを開発する（ここで、スポンジコア・ソフトラバーアクチュエータとは、研究代表者が開発したアクチュエータであり、発泡ゴムの外側をソフトゴムでコーティングした構造である）。そして、センサからの信号を汎用 SD メモリーに格納し、リアルタイムにセンサ信号を記憶する計測システムを構築する。また、計測用コンピュータとして、dsPIC 或いは AVR を検討する。さらに、中敷きに計測用基板を格納するために、柔軟な基板の製作が可能な **組み込み用回路製作装置** を用いて制御専用回路を製作する。そして、製作した回路を歩

行パターン計測用靴に内蔵し、歩行時における中敷き部圧力値の変動を測定する。それにより、歩行パターン及び圧力変動の関係を明らかにする。

これらの結果を踏まえ、能動的に中敷き部内圧を制御する中敷きを試作する。すなわち、歩行において足裏部が中敷きを印加する力を小型圧力分布センサで計測し、中敷き部アクチュエータ内圧力センサによりアクチュエータの圧力（剛性）制御を行う中敷きを試作する。

### **(2) 一体型中敷きの試作と改良**

足裏部外力を測定する小型圧力分布センサ及び圧力センサを内蔵し、歩行パターンを推定しながら、安定・安心歩行を実現する中敷きの改良を行う。具体的には、平成20年度に試作した中敷きの制御基板及び内圧制御システムの小型化を行う。すなわち、dsPIC 或いは AVR を CPU とする計測制御用基板を平成20年度購入した組み込み用回路製作装置を用いて、より小型化及び耐久性を実現した計測制御基板を製作する。また、様々な歩行パターンに関して、空気圧源部における加圧能力（発生圧力、流量）を調べ、必要な流量の切替を実現する切替弁の再選定を行う。さらに、弁の駆動及び中敷きアクチュエータ・ゴム要素内の圧力計測は、dsPIC 或いは AVR 回路の DA、AD 変換機能を用いて行う。空気圧源部に関しては、日常生活で重心バランス調整に必要な空気圧レベルを維持するためのゴム型圧縮部容量、回生システムを検討し、靴全体としてのデザインを再構築する。そして、歩行することにより身体バランス及び下肢部の骨の歪みを補正・矯正することが可能となる高機能靴を実現する。

### **(3) 歩行試験装置によるバランス調整試験と実地試験**

足首部に6軸力覚センサを取り付け、足部がピッチ方向・ロール方向に回転する歩行試験装置の試作を行う。具体的には、試作した中敷きの有効性を定量的に提示するために、人間の歩行を模擬する構造を検討する。そして、人間の柔軟な動作を実現するため、空気圧アクチュエータを活用する。また、足部模型が中敷き部を印加する外力を測定し、中敷き部印加外力、靴底が接地面に印加する外力及びアクチュエータ部内圧変動の関係を調べる。それにより、中敷き部内圧変動測定による足裏部バランス変化に関する推定の妥当性を明らかにする。また、歩行時、能動的なバランス調整を行うために、足部模型が中敷き部を印加する外力を圧力分布センサにより測定し、その外力による中敷き部バランス調整を中敷き部アクチュエータ内部の圧力制御により行う。すなわち、歩行時のバランス変化を圧力分布センサで推定し、バランス調整を中敷き内圧力制御により行う手法

の有効性を明らかにする。

これらの結果を踏まえ、開発した中敷きを格納した靴による歩行バランス実験（生体計測）を行う。そして、歩行に対する有効性を検証する。

## **4. 研究成果**

### **(1) 中敷き構造**

本研究では、中敷きのゴム要素の剛性を変化させることにより、踏み込み時に体重心位置を補正提示するトルクを発生する中敷きプレートおよび、その制御装置の開発を行う。ここではまず、試作を行う靴の中敷き構造について述べる。

図1に、本研究で提案する高機能靴用中敷

（以下、高機能中敷）の構成を示す。中敷き部には、低圧駆動用アクチュエータであるSCSRAを使用する。使用するSCSRAは中敷きに配置される各SCSRAの容積が均一になるように、図1に示すような、円形のものを使用する。この要素を踵部(SCSRA 1)、小指側(SCSRA 2)、親指側(SCSRA 3、SCSRA 4)、に配置し、これらをシリコンゴムで中敷き状に整形したものを高機能中敷きとする。また、各SCSRA要素には内圧計測用のセンサおよび、内圧制御用のソレノイドバルブをそれぞれ配置する。この内圧変化を計測することで歩行状態を検知し、バルブ制御によりアクチュエータ内の圧力制御を行う。今回、圧力源として低電圧駆動のエアポンプを使用する。

また、中敷き形状は、足裏部の荷重中心位置移動軌跡と、F-スキャン（ニッタ株式会社製）による歩行計測結果を参考に決定した。図2にF-スキャンによる歩行計測結果の一例を示す。F-スキャンとは、マトリクス状に測定ポイント（セル）が配置された薄型のセンサ用い、そのセルの電気抵抗の変化から圧力を計測することができる。図から歩行時において踵、小指、親指に特に大きな圧力変化が表れていることがわかる。このことから、これらの部位が足裏荷重を計測する上で有効な計測場所であることがわかる。また、これらのポイントは、足裏と中敷きが最も接触する部分であるため、中敷の剛性を変化する際に使用者が最も認識しやすい部位であると考えられる。

### **(2) 試作靴**

図3に試作を行った高機能靴を示す。製作で用いた靴には、足の甲で固定するタイプのサンダルを使用している。また、製作した制御回路とエアポンプは靴の踵部分の配置している。図4にシステム構成を示す。製作した試作靴は、左右の靴がそれぞれ同様のシステム構成を有しており、無線モジュールを用いることで計測の同期をとっている。また、各制御にはマイコンを使用し圧力センサの

データ処理およびバルブ操作を行う。歩行計測システムの流れとしては次のとおりである。歩行計測が開始されると無線モジュールによって左右の足圧計測が開始される。圧力センサにより得られた足圧データを制御回路のマイコンにより処理を行う。そして、歩行計測によって得られた歩行データは最終的に microSD に記録され、PC 上で確認する。

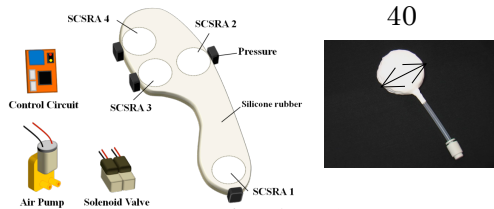


図 1 高性能中敷き

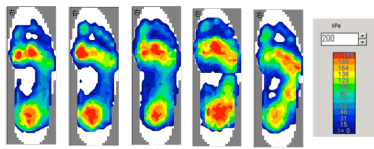


図 2 足部圧力分布測定結果

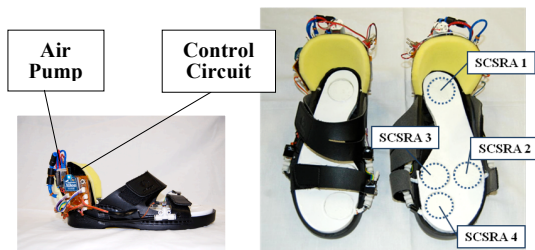


図 3 試作高性能靴

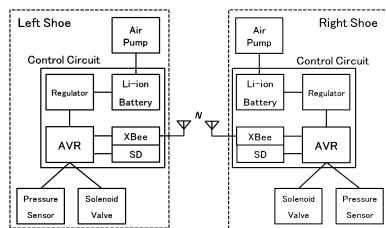


図 4 システム構成

### (3) 歩行計測

製作した計測装置を用いて歩行実験を行う。歩行時の足裏荷重の計測を行う。なお、歩行実験では、一定の速度で歩行を行うためにウォーキング・マシンを使用する。今回、被験者は健康者を対象とし、ウォーキング・マシンの速度を 2.5[km/h] で一定として、60 秒間歩行を行う。また、実験により得られた歩行データを、歩行に関する文献と比較し本装置の有用性を確認する。

実験結果の一例として、体重 55[kg] の被験者による計測結果を図 5 に示す。なお、実験結果において、横軸は計測開始からの経過時

間 [s] を示し、縦軸には計測装置による計測圧 [kPa] を示している。

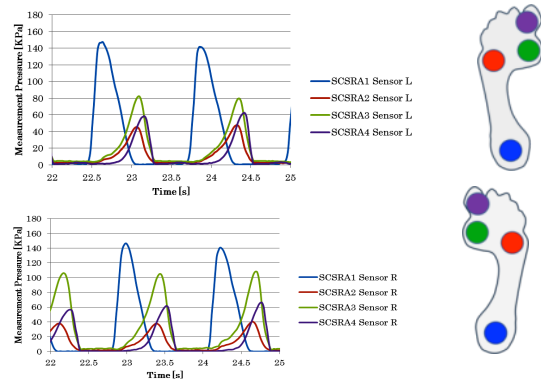


図 5 歩行時測定結果

歩行計測結果をより詳しく確認するため、それぞれの計測結果の立脚期を抜粋したグラフを図 6 に示す。横軸は歩行 1 周期を 100[%] としたパラメータで示しており、縦軸は計測装置による計測圧を表している。通常の歩行時の立脚期における足部支持面は、踵接地 (LR) → 足裏接地 (MSf) → 前足と足指接地 (TSf) → 内側足部接地 (PSw) といった流れで変化する。実験結果より、立脚期における一連の足部支持面に対応した荷重変化が得られていることがわかる。また、安定した歩行時に見られる踵から小指そして親指へと荷重移動する”あおり運動”の傾向が得られていることから、本装置の有用性が確認できた。

また、以上の歩行データを用いて足裏荷重の重心計算を行った。図 7 に求めた足裏重心軌跡を示す。グラフ上の円は SCSRA の位置を示し、プロットは重心位置を示している。左右の重心軌跡は足裏の中心を辿っている。そして、足裏重心が踵からつま先に向かって移動していることから、正常に踵による踏み込みが行われ、力強く蹴りだしが行われていることがわかる。今回得られたデータからも正常な歩行時にみられる重心軌跡を確認することができた。

以上の結果から、製作した靴を用いて正常な歩行計測が行えているといえる。また、今回の実験では健康者を対象としたが、異常歩行のみられる被験者の場合にはこの足裏重心が小指よりに傾くことが予想される。

### (4) 歩行試験評価装置

歩行時における中敷きの有効性及び身体への影響を明らかにする、図 8 に示す歩行評価試験装置を試作した。本装置は、足首部のロール運動及びピッチ運動を含め、合計 4 自由度を有している。

本装置により、足部を図 9 に示すように、(a) 足が外側に傾いたとき、(b) 足が内側に傾い

たときの 2 種類を想定して実験を行い，装置足首部に作用するバランス補正のトルクを測定した．その結果を図 10 に示す．グラフでは，4[s]で足形模型の踵が接地し，6.5[s]でピッチ角が  $0^\circ$  になる．その後，9[s]でつま先立ちの状態になり，蹴り上げ動作を行う．図 10 より，足が外側に傾いた状態で接地すると，押し付け力 70[N]でバランス補正のトルクが最大  $-0.33[\text{N} \cdot \text{m}]$ 発生し，反対に足が内側に傾いた状態で接地すると，押し付け力 70[N]でバランス補正のトルクが最大  $0.46[\text{N} \cdot \text{m}]$ 発生している．したがって，足が傾いた状態で接地しても，バランス調整部の内圧を調節することで安定した歩行を促すトルクが作用していることがわかる．

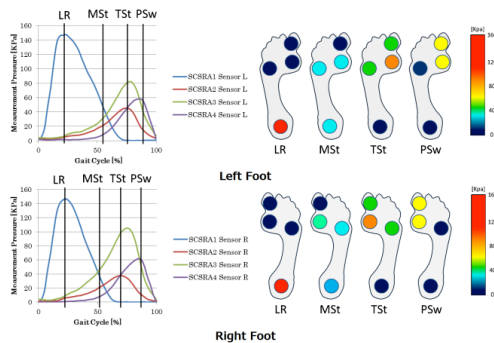


図 6 歩行時分布移動結果

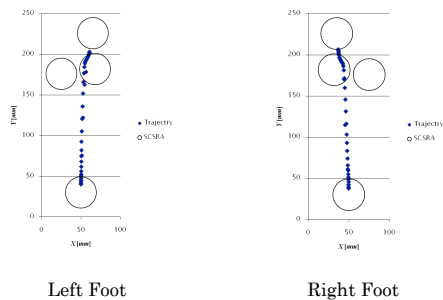


図 7 足裏重心軌跡推定結果

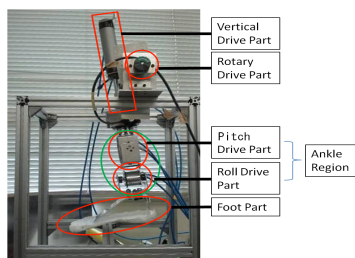


図 8 歩行評価試験装置

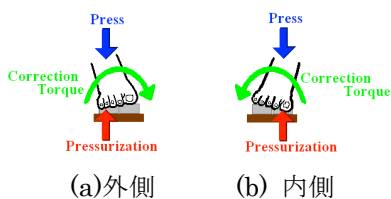


図 9 想定される歩行状態

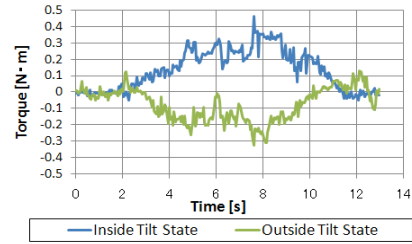


図 10 足首部バランス補正のトルク

また，つま先で蹴り上げているとき( 7[s] ~ 9[s] )にバランス補正のトルクが最大値をとる原因としては，足形模型の足首部との距離が関係している．すなわち，踵で接地した場合，足裏の重心はほぼ足裏の中心をとらえている．しかし，蹴り上げ時にはその重心が足裏の外側もしくは内側へと変化する．その結果，足首と足裏の重心との距離が広がり，補正トルクの増加につながっている．

以上の研究結果より，本研究で開発した高機能中敷き及び歩行評価試験装置の有効性を明らかにすることができた．

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

1 ) Yasuhiro HAYAKAWA and Yuya TAGUCHI, Development of High Performance Shoes to Measure Human Walking, International Conference on Control, Automation and Systems 査読有, 2010, pp. 1167-1170

2 ) Yasuhiro Hayakawa and Naoki Nishida, Study on a High Performance Shoes by using Silicon Rubber Elements with Human Compatibility, Proceedings of the World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, 25/IX, 査読有, 2009, pp.1-4ffs

3 ) Yasuhiro Hayakawa, Isao Hikita and Naoki Nishida, Study on a high performance insole with human compatibility, Proceedings of the Seventh International Conference on Fluid Power Transmission and Control in China, 査読有, 2009, pp.596-599

4 ) 早川 恭弘, 安定歩行用高機能靴の開発, 日刊工業出版, 油空圧技術, 査読無, 592 号, Vol. 48, No. 1, 2009, pp. 16-24

5 ) Yasuhiro HAYAKAWA Isao HIKITA, Maisya TUJIOKA and Naoki NISHIDA, STUDY ON A HIGH PERFORMANCE INSOLE WITH HUMAN COMPATIBILITY, Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power, 査読有, 2008, P1-46

6 ) Yasuhiro Hayakawa, Isao Hikita and Naoki

Nishida, "Study on a high performance insole by using a new type of pneumatic rubber actuator", Proceedings of 4<sup>th</sup> European Congress for Medical and Biomedical Engineering, 査読有, 2008, P122

7) 早川 恭弘, 高機能中敷きソフトゴムアクチュエータの基礎特性, 日刊工業出版, 油空圧技術, 査読無, 590号, Vol. 47, No. 12, 2008, pp. 28-33

〔学会発表〕(計10件)

1) 早川 恭弘, 人間親和性を有する高機能靴の開発, 日本機械学会, 第23回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, 2011年1月8日講演, 熊本

2) 早川 恭弘, 空気圧ソフトゴムアクチュエータを用いた高機能靴の開発, 日本フルードパワーシステム学会, 平成22年秋季フルードパワーシステム講演会, 2010年12月3日講演, 大分

3) 早川 恭弘, 福祉介護用高機能靴の開発, 日本機械学会, ロボティクス・メカトロニクス講演会'10, 2010年6月15日講演, 北海道

4) 早川 恭弘, 福祉介護用高機能靴の開発, 日本フルードパワーシステム学会, 平成22年春季フルードパワーシステム講演会, 2010年5月27日講演, 東京

5) 早川 恭弘, 組み込み技術を利用した高機能靴の開発, 日本機械学会, 第22回バイオエンジニアリング講演会, 2010年1月9日講演, 岡山

6) 早川 恭弘, 組み込み技術を活用した歩行計測用靴の開発, 平成21年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, 2009年11月26日講演, 宮城

7) 早川 恭弘, 空気圧ソフトゴムアクチュエータを用いた高機能靴の開発, 平成21年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集, 2009年6月26日講演, 東京

8) 早川 恭弘, 空気圧ソフトゴムアクチュエータを用いた新型高機能靴の開発, 日本機械学会, ROBOMECH2009, 2009年5月25日講演, 福岡

9) 早川 恭弘, 組み込み技術を活用した高機能靴開発のための基礎技術, 第9回システムインテグレーション部門講演会(SI2008)講演論文集, 2008年12月7日講演, 岐阜

10) 早川 恭弘, 高機能中敷き用ソフトゴムアクチュエータの基礎特性, 日本フルードパワーシステム学会, 平成20年春季フルードパワーシステム講演会, 2008年5月29日講演, 東京

〔産業財産権〕

○取得状況(計1件)

名称: 靴底及び靴

発明者: 早川 恭弘

権利者: 独立行政法人国立高等専門学校

種類: 特許

番号: 第4411439

出願年月日: 平成21年11月27日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

早川 恭弘 (HAYAKAWA YASUHIRO)

奈良工業高等専門学校・電子制御工学科・教授

研究者番号: 50180956

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: