

平成 30 年 6 月 1 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K04977

研究課題名(和文)強制法の理論と連続体の濃度

研究課題名(英文)Forcing Theory and the Size of the Continuum

研究代表者

Brendle Jorg (Brendle, Jorg)

神戸大学・システム情報学研究科・教授

研究者番号：70301851

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、強制法の理論の先端技法を用いることによって連続体の組み合わせ論的構造を調べた。特に、フィルターによるMathias強制法などのccc強制法、強制法の洗練された有限台反復法、行列沿いの強制反復法や、実数における強制法の巨大基数への一般化などの技法を使って、連続体の基数不変量の間の大小関係や、極大フィルターや極大のほとんど交わりがない集合族などの極大性条件を満たす実数の集合族の存在について新しい独立性結果を得た。

研究成果の概要(英文)：We investigated the combinatorial structure of the continuum using novel techniques from forcing theory. In particular, we employed techniques like Mathias forcing with a filter and other ccc forcing notions, a sophisticated version of finite support iteration of forcing, matrix iterations of forcing, generalizations of forcing notions on the real numbers to large cardinals etc, to obtain new independence results about the order relationship between cardinal invariants of the continuum, and about sets of real numbers with maximality properties like ultrafilters and maximal almost disjoint families.

研究分野：集合論

キーワード：数学基礎論 集合論 トポロジー 測度論 強制法

### 1. 研究開始当初の背景

反復強制法によって連続体の濃度  $c$  を大きくするために、Solovay と Tennenbaum による  $ccc$  強制法の有限台反復 (finite support iteration of  $ccc$  forcing,  $fsi$ ) と Shelah による proper な強制法の可算台反復 (countable support iteration of proper forcing,  $csi$ ) という二つの技法が広く使われてきている。両方とも欠点をもつ。後者で  $c$  が  $w_1$  以下となるが、前者が必然的にコーエン実数を付け加えるので、 $P$ -points や  $Q$ -points などの極大フィルターの非存在の無矛盾性を示すために使えない。

近年は、 $fsi$  を複雑な方法で洗練や改造することによって、いくつかの大きい連続体のモデルが構成された。例えば、Blass と Shelah ( *Ultrafilters with small generating sets*, Israel J. Math. **65** (1989), 259-271 ) によって開拓された行列沿いの反復法 (matrix iterations) が本研究者のいくつかの論文において用いられてきた ( *Van Douwen's diagram for dense sets of rationals*, Ann. Pure Appl. Logic **143** (2006), 54-69 )。また、Shelah ( *Two cardinal invariants of the continuum ( $\mathfrak{d} < \mathfrak{a}$ ) and FS linearly ordered forcing*, Acta Math. **192** (2004), 187-223 ) によって発明されたテンプレート沿いの反復 (iterations along templates) が本研究によって洗練された ( *The almost disjointness number may have countable cofinality*, Trans. Amer. Math. Soc. **355** (2003), 2633-2649 )。

最近、Neeman ( *Forcing with sequences of models of two types*, Notre Dame J. Form. Log. **55** (2014), 265-298 ) や Asperó と Mota などの研究者は、モデルの列をサイド・コンディションとする反復強制法を開発し、その反復法の properness の証明によって、いくつかの大きな連続体のモデルを構成した。Properness を示すため強制法にモデルをサイド・コンディションとしてつける方法はもとに Todorćević によって発明された。

### 2. 研究の目的

この研究の目的は、連続体の濃度  $c$  を  $w_1$  より大きくするための、強制法の新しい反復法を開発し、既存の技法を洗練することによって、実数直線の構造についてのいくつかの問題を解決することであった。特に、連続体の基数不変量の間的大小関係に関する問題や、自然数全体  $\omega$  上のある種の極大フィルターの非存在のような、強い極大性条件を満たす実数の集合の非存在に関する問題に集中することを目的とした。結局、

この研究を通して、数学において一番重要かつ根本的な構造の一つである実数直線の構成をより深く理解することを狙った。

### 3. 研究の方法

本研究では、連続体の基数不変量、極大性条件を満たす実数の集合族などの実数の集合論のテーマについて新しい結果を得るために、主に反復強制法の既存の技法を洗練し、新奇な技法を開発した。例えば、 $ccc$  強制法の先端的な有限台反復法 (研究成果(1)を参照)、行列沿いの強制反復法の洗練された保存定理 (研究成果(9)を参照)、フィルターに対応する Mathias 強制法 (研究成果(2)と(6)を参照) 及び Laver 強制法 (研究成果(5)を参照) その他の中心化強制法 (  $\dot{-}$ -centered forcing ) や 連結強制法 (  $\dot{-}$ -linked forcing ) (研究成果(4)を参照) を用いた。また、Sacks 強制法などの実数における強制法の巨大基数のコンテキストへの一般化 (研究成果(7)を参照) や選択公理が成り立たないモデルの強制法による構成 (研究成果(10)を参照) という技法も使った。

強制法の理論や実数の集合論についての研究は、世界的に行われているため、海外の研究者との議論、特に共同研究は必要不可欠であった。研究成果の多くは、Michael Hrušák、Yurii Khomskii、Wolfgang Wohofsky、Andreas Blass、Will Brian、Joel Hamkins、Michael Hardy、Paul Larson、Victor Torres、Vera Fischer、Osvaldo Guzmán、Dilip Raghavan、Barnabas Farkas、Jonathan Verner、Andrew Brooke-Taylor、Sy Friedman、Diana Montoya、Luz García、Miguel Cardona、Diego Mejía、Fabiana Castiblanco、Ralf Schindler、Liuzhen Wu や Liang Yu らとのディスカッションや共同研究により得られた。また、本研究者は研究会及び国際会議に招待された際、様々な研究者との意見交換を行った。主な研究打ち合わせは下記通りであった。

- (1) 2015 年 4 月 : IMS プログラム「Sets and Computations」(シンガポール国立大学)の際、Barnabas Farkas、Jonathan Verner (研究成果(6)を参照)、Sy Friedman や Diana Montoya (研究成果(7)を参照)との共同研究。
- (2) 2015 年 4 月～7 月 : メキシコ国立自治大学 (メキシコシティ) を訪問した際、Michael Hrušák とのディスカッションを通して成果(1)と(2)についての研究を始めた。
- (3) 2015 年 9 月 : プエブラ栄誉州立自治大学 (メキシコ) を訪問した際、Iván Martínez とのディスカッション。
- (4) 2015 年 10 月～11 月 : INI プログラム「Mathematical, Foundational and

Computational Aspects of the Higher Infinite (ケンブリッジ、英国)の際、Andrew Brooke-Taylor (研究成果(7)を参照) Yurii Khomskii や Wolfgang Wohofsky (研究成果(3)と(5)を参照)との共同研究。

(5) 2016年2月: プエブラ荣誉州立自治大学(メキシコ)を訪問した際、Michael Hrušák や Victor Torres と研究成果(5)についての共同研究に着手した。

(6) 2016年9月: メキシコ国立自治大学(モレリア)への訪問と研究集会「Set Theory and its Applications in Topology」(オアハカ、メキシコ)の際、Michael Hrušák や Andreas Blass などの研究者とのディスカッション。

(7) 2016年11月: Diana Montoya と Jonathan Verner が神戸大学を訪問した際、彼らとのディスカッション。

(8) 2017年2月: オーバーヴォルフアッハ研究集会「Set theory」(ドイツ)の際、Michael Hrušák や Dilip Raghavan などの研究者とのディスカッション。

(9) 2017年5月: メキシコ国立自治大学(モレリア)を訪問した際、Michael Hrušák や Osvaldo Guzmán (研究成果(5)を参照)との共同研究。また Luz García と研究成果(8)についての共同研究に着手した。

(10) 2017年6月: ハンブルク大学(ドイツ)を訪問した際、Yurii Khomskii や Wolfgang Wohofsky (研究成果(3)と(5)を参照)との共同研究。

(11) 2017年7月: 国際会議「16<sup>th</sup> Asian Logic Conference」(デジョン、韓国)の際、Yurii Khomskii、Paul Larson や Diego Mejía とのディスカッション。

(12) 2017年9月: IMS「Workshop on Computability Theory and the Foundations of Mathematics」(シンガポール国立大学)の際、Dilip Raghavan (研究成果(5)を参照)との共同研究。

(13) 2017年10月: 「14<sup>th</sup> International Workshop in Set Theory」(マルセイユ、フランス)の際、Vera Fischer や Dilip Raghavan などの研究者とのディスカッション。

(14) 2017年11月: Fabiana Castiblanco が神戸大学を訪問した際、研究成果(10)についての共同研究を始めた。

(15) 2018年2月: ウィーン大学(オーストリア)を訪問した際、Vera Fischer (研究成果(5)を参照) Diana Montoya や Barnabas Farkas との共同研究。

#### 4. 研究成果

フィルターによる Mathias 強制法などの ccc 強制法、ccc 強制法の洗練された有限台反復法、行列沿いの強制反復法、実数における強制法の巨大基数への一般化などの先端

技法を用いることによって連続体の組み合わせ論的構造について幾つかの新しい結果を得た。特に、連続体の基数不変量の間の大小関係や、極大フィルターや極大のほとんど交わりがない集合族などの極大性条件を満たす実数の集合族の存在についての問題に焦点を絞った。主な研究成果は下記通りである。

(1) **その二乗が  $\mathcal{Q}$  でない  $\mathcal{Q}$  集合 (a  $\mathcal{Q}$ -set whose square is not  $\mathcal{Q}$ )**。実数の非可算部分集合  $X$  が  $\mathcal{Q}$  集合であるとは、すべての  $X$  の部分集合が相対的に  $G_d$  であるときをいう。つまり、 $2^{|X|} = \mathfrak{c}$  となり、連続体仮説 CH のもとで  $\mathcal{Q}$  集合が存在しないが、Martin の公理 MA のもとですべての真に連続体の濃度  $\mathfrak{c}$  より小さい実数の非可算部分集合が  $\mathcal{Q}$  集合である。本研究では、任意の非可算基数  $\kappa$  に対して、濃度が  $\kappa$  で二乗  $X^2$  が  $\mathcal{Q}$  集合とならないような  $\mathcal{Q}$  集合  $X$  の存在が無矛盾であることを証明することによって、Miller の問題を解決した。この証明において、まずコーエン実数を個付け加え、次に長さ  $\kappa^+$  の慎重な有限台の反復強制法を行うことによって、コーエン実数からなる集合  $X$  が  $\mathcal{Q}$  集合であるが、 $X^2$  が  $\mathcal{Q}$  集合でない。この仕事は雑誌論文として出版された。

(2) **極大樹木 (maximal trees)**。Monk のモノグラフ「Cardinal invariants on Boolean algebras」において、自然数全体  $\omega$  のべき集合  $P(\omega)$  と、 $P(\omega)$  の有限部分集合で割った商構造  $P(\omega)/\text{fin}$  という二つのブール代数における極大樹木が調べられ、前者に濃度が  $\omega$  と  $\mathfrak{c}$  となるもの、後者に濃度が  $\mathfrak{c}$  となるものが常に存在することが示された。Campero、Cancino、Hrušák と Miranda の研究では、連続体仮説が成り立たなくても、両方の構造においてその濃度が  $w_1$  となる極大樹木が存在することの無矛盾性が証明された。本研究では、連続体の濃度と関わらず、任意の非可算な正則基数  $\kappa$  に対して、両方の構造においてその濃度が  $\kappa$  となる極大樹木がフィルターによる Mathias 強制法の ccc 反復法によって付け加えられることを証明した。また、 $P(\omega)/\text{fin}$  において可算のレベルをもつ極大樹木が存在しないことも示した。両方の結果は Campero、Cancino、Hrušák と Miranda の問題を解決した。この仕事は雑誌論文として出版された。

#### (3) **Marczewski のイデアルとその同類イデアル (Marczewski's ideal and its relatives)**

本研究の開始の前に始まった、Yurii Khomskii と Wolfgang Wohofsky (ハンブルク大学、ドイツ)との共同研究で、Marczewski のイデアルとその同類イデアルをいくつかの観点から調べた。Marczewski のイデアル  $\mathcal{I}_0$  は、瘦イデアル  $\mathcal{M}$

や零イデアル  $N$  のコーエン強制法やランダム強制法との関係と同様に、Sacks 強制法と密接に関連している。Miller の昔の結果により  $s_0$  の共終数が連続体の濃度より真に大きいことがわかっている。本研究では Laver 強制法に対応する Laver イデアルと Miller 強制法に対応する Miller イデアルに対しても、これらの強制法が最小の非構成可能性の次数を付け加えることを用いて、それらの共終数が連続体の濃度より真に大きいことを示した。この仕事は雑誌論文として出版された。

また、実数全体  $2^{\mathbb{N}}$  上の移動不変な  $\sigma$ -イデアル  $I$  に対して、 $I^*$  をイデアル  $I$  のすべての元  $A$  に対して  $X+A \neq 2^{\mathbb{N}}$  となるような実数の部分集合  $X$  の全体として定義する。例えば、 $M^*$  は強零集合のイデアルであり、 $N^*$  は強瘦集合の全体である。本研究では、すべての  $s_0^*$  集合の濃度が連続体の濃度より真に小さいことを証明することによって、Marczewski イデアルに対するポレル予想が連続体仮説から導かれることを得た。この仕事は雑誌論文（掲載決定）として出版される予定である。

#### (4) リーマンの再配列定理に関する基数不変量 (cardinal invariants related to Riemann's rearrangement theorem)。

Andreas Blass (ミシガン大学、米国)、Will Brian (ノースカロライナ大学チャロット校、米国)、Joel Hamkins (ニューヨーク私立大学大学院センター、米国)、Michael Hardy (ハムリン大学、米国) と Paul Larson (マイアミ大学 (オハイオ州)、米国) との共同研究で、リーマン再配列定理と関連するいくつかの連続体の基数不変量を調べ、特に、その基数不変量を Cichoń の図式の基数不変量と比べた。

まず、Rearrangement number  $rr$  を、すべての条件収束する実数の級数に対して、そのによる再配列が同じ極限值に収束しないような置換が存在するような置換の族の最小の濃度として定義する。 $b$   $rr$ 、 $cov(\text{null})$   $rr$  と  $rr$  non(meager) が成り立つことを示し、洗練された ccc 強制法の有限台反復を用いることによって、 $rr$  のいくつかの変形も連続体の濃度  $c$  より小さいことの無矛盾性を証明した。この仕事は雑誌論文 *The rearrangement number* として投稿した。

また、Subseries number  $ss$  を、すべての条件収束する級数に対して、その  $A$  の元を指数とする部分級数が発散するような集合  $A$  が存在するような自然数  $\omega$  の部分集合族  $\mathcal{A}$  の最小の濃度として定義する。 $s$   $ss$ 、 $cov(\text{null})$   $ss$  と  $ss$  non(meager) が成り立つことを示し、Laver モデルにおいて  $ss = \mathfrak{w}_1$  なので、 $ss < b$  (つまり  $ss < rr$ ) の無矛盾性を証明した。この仕事は雑誌論文 *The subseries number* として投稿した。

#### (5) 極大のほとんど交わりがない集合族と

**その他の極大性条件を満たす実数の集合族 (Maximal almost disjoint families and other sets of reals with maximality properties)**、極大のほとんど交わりがない集合族 (maximal almost disjoint families, mad)、極大の独立な集合族 (maximal independent families, mif)、極大フィルター (ultrafilters) やタワー (towers) などのように極大性条件を満たす実数の集合族は集合論において重要な役割を果たしており、組合せ論的集合論の観点からも記述集合論の観点からも調べられてきている。この研究へ次の三つのテーマに分けて貢献した。

まず、Michael Hrušák (メキシコ国立自治大学、メキシコ) と Víctor Torres (ウィーン工科大学、オーストリア) との共同研究で、tower number  $t$ 、ultrafilter number  $u$  と almost disjointness number  $a$  の三つの連続体の基数不変量のゲーム理論的なバージョンを調べた。常に  $t \leq t(\text{game})$ 、 $u \leq u(\text{game})$  と  $a \leq a(\text{game})$  が成り立ち、適当なパラメータのつけられたダイヤモンド原理のもとで、すべての基数不変量のゲームバージョンが  $\mathfrak{w}_1$  であることを示し、 $t < t(\text{game})$  と  $u < u(\text{game})$  の無矛盾性も証明した。この仕事は雑誌論文（掲載決定）として出版される予定である。

また、Yurii Khomskii (ハンブルク大学、ドイツ) と Vera Fischer (Kurt Gödel Research Center for Mathematical Logic、ウィーン大学、オーストリア) との共同研究で、極大の独立な集合族 (mif) の定義可能性を調べた。例えば、 $\Sigma_2^1$  mif が存在するとき、 $\Pi_1^1$  mif も存在することを示し、コーエンモデルにおいて射影的 mif が存在しないことも証明した。つまり、コーエンモデルの内的モデルを用いて、mif の非存在が ZF のもとで無矛盾であることを得た。また、Sacks モデルにおいて  $\Pi_1^1$  mif の存在を示すことで、連続体仮説 CH の否定が  $\Pi_1^1$  mif の存在と無矛盾であることがわかった。この仕事は雑誌論文 *Definable maximal independent families* として投稿する予定である。

最後に、Osvaldo Guzmán (ヨーク大学、トロント、カナダ)、Michael Hrušák (メキシコ国立自治大学、メキシコ) と Dilip Raghavan (シンガポール国立大学、シンガポール) との共同研究で、極大のほとんど交わりがない集合族 (mad) に生成されたイデアルのような実数上のイデアルの、コーエン強制などの強制法による破壊可能性についていくつかの結果を得た。特に、非破壊性の一番強い概念である raving 性質をもつ  $\mathfrak{w}_1$  より大きい mad の存在が無矛盾であることを証明した。この仕事は雑誌論文 *Combinatorics of MAD families* として投稿する予定である。

#### (6) フィルターにおけるタワーと Luzin 型の集合族 (towers in filters and Luzin type

**families** 本研究の開始の前に始まった、Barnabas Farkas (ウィーン工科大学、オーストリア) と Jonathan Verner (プラハ・カレル大学、チェコ) との共同研究で、自然数  $\omega$  上のフィルターにおけるタワーの存在と、その連続体の基数不変量や Luzin 型の集合族の存在との関係を調べた。例えば、すべての瘦フィルターにタワーが存在しないことが無矛盾であることを証明した。この仕事は雑誌論文 (掲載決定) として出版する予定である。

**(7) 非加算基数に関する Cichoń の図式 (Cichoń's diagram for uncountable cardinals)** を非加算基数とすると、多くの連続体の基数不変量はカントル空間  $2^{\mathbb{N}}$  やベール空間  $\mathfrak{w}^{\mathbb{N}}$  の代わりに一般化されたカントル空間  $2^k$  や一般化されたベール空間  $k^k$  のコンテキストへ拡大できる。本研究の開始の前に始まった、Andrew Brooke-Taylor (リーズ大学、英国)、Sy Friedman と Diana Montoya (Kurt Gödel Research Center for Mathematical Logic、ウィーン大学、オーストリア) との共同研究で、Cichoń の図式における基数不変量の大小関係についての多くの結果や、いくつかの無矛盾性の証明を、到達不可能基数のコンテキストへ一般化した。例えば、一般化された Sacks 強制法の Sacks 性質を調べることによって、一般化された基数不変量について新しい独立性の結果を示した。この仕事は雑誌論文 (掲載決定) として出版する予定である。

**(8) 非対称的なゲームイデアル、evasion と prediction と strong porosity (unsymmetric game ideals, evasion and prediction, and strong porosity)** Luz García (アメリカ大学、プエブラ、メキシコ) との共同研究で、非対称的なゲームイデアル、evasion と prediction という組み合わせ論的概念と、実数解析における strong porosity の間の密接な関係を確認し、その三つの概念に対する基数不変量について新しい結果を得た。特に、ゲームイデアルの covering number が  $\text{non}(\text{meager})$  より大きく、その uniformity が  $\text{cov}(\text{meager})$  より小さいことを証明し、Newelski と Roslanowski の問題を解決した。この仕事は雑誌論文 *Evasion and prediction V: Unsymmetric game ideals, constant prediction, and strong porosity ideals* として投稿した。

**(9) 強制法の行列沿いの反復法と極大フィルター沿いの極限 (matrix iterations and ultrafilter limits)** Miguel Cardona (Kurt Gödel Research Center for Mathematical Logic、ウィーン大学、オーストリア) と Diego Mejía (静岡大学) との進行中の共同研究で、行列沿いの反復強制法における極大フィルター沿いの極限に基づいた洗練された保存

定理を用いて、Cichoń の図式における基数不変量などの多くの連続体の基数不変量が同時に異なる値を取り得ることが無矛盾であることを証明した。

**(10) 選択公理を満たさないモデル (models without choice)** Fabiana Castiblanco、Ralf Schindler (ミュンスター大学、ドイツ)、Liuzhen Wu (中国科学院、中国) と Liang Yu (南京大学、中国) との進行中の共同研究で、いくつかの実数の特殊部分集合が存在するが、実数の整列順序が存在しないモデルを構成した。

## 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 10 件)

Jörg Brendle, Michael Hrušák, and Víctor Torres, *Constructions with opposition: cardinal invariants and games*, Archive for Mathematical Logic, to appear. 査読あり

Jörg Brendle and Wolfgang Wohofsky, *Borel's conjecture for the Marczewski ideal*, Proceedings of the American Mathematical Society, to appear. 査読あり

Jörg Brendle, Barnabas Farkas, and Jonathan Verner, *Towers in filters, cardinal invariants, and Luzin-type families*, The Journal of Symbolic Logic, to appear. 査読あり

Jörg Brendle, Andrew Brooke-Taylor, Sy Friedman, and Diana Montoya, *Cichoń's diagram for uncountable cardinals*, Israel Journal of Mathematics, to appear. 査読あり

Jörg Brendle, *Maximal trees*, Archive for Mathematical Logic, **57** (2018) 421-428. 査読あり

Jörg Brendle, Yurii Khomskii, and Wolfgang Wohofsky, *Cofinalities of Marczewski-like ideals*, Colloquium Mathematicum, **150** (2017) 269-279. 査読あり

Jörg Brendle and Luz María García Ávila, *Forcing-theoretic aspects of Hindman's Theorem*, Journal of the Mathematical Society, **69** (2017) 1247-1280. 査読あり

Jörg Brendle,  $\mathcal{Q}$ , in: Sets and Computations, Proceedings of the IMS Program, Singapore 2015 (S. Friedman, D. Raghavan, and Y. Yang, eds.), World Scientific, Singapore, 2017, 1-10. 査読あり

Jörg Brendle, *Some problems in forcing theory: large continuum and generalized cardinal invariants*, 数理解析研究所講究録, 2042 (2017) 1-16. 査読なし

Jörg Brendle and Jana Flašková, *Generic ultrafilters on the natural numbers*, Fundamenta Mathematicae, 236 (2017) 201-245. 査読あり

〔学会発表〕(計 8 件)

Jörg Brendle, *Constant prediction, strong porosity, and unsymmetric game ideals*, The 2nd Pan-Pacific International Conference on Topology and Applications, 2017.11.15, 釜山(韓国)

Jörg Brendle, *Rearrangements and subseries*, 14<sup>th</sup> International Workshop in Set Theory, 2017.10.9, マルセイユ(フランス)

Jörg Brendle, *Rearrangements*, Workshop on Computability and the Foundations of Mathematics, 2017.9.8, シンガポール

Jörg Brendle, *Generalized cardinal invariants*, Mengenlehre-Tagung, 2017.2.15, オーバーヴォルフアッハ(ドイツ)

Jörg Brendle, *Maximal trees*, RIMS 研究集会「無限組合せ論と強制法理論」, 2016.11.28, 京都大学数理解析研究所(京都府)

Jörg Brendle, *Squares of  $Q$ -sets*, RIMS 研究集会「集合論的・幾何学的トポロジーとその応用」, 2016.10.17, 京都大学数理解析研究所(京都府)

Jörg Brendle,  $Q$ , BIRS-CMO workshop on Set Theory and its Applications in Topology, 2016.9.14, オアハカ(メキシコ)

Jörg Brendle, *Borel's conjecture for the Marczewski ideal*, Third International Conference on Mathematics and its Applications, 2016.9.6, プエブラ(メキシコ)

〔その他〕

ホームページ等

研究集会「反復強制法の理論と基数不変量」(神戸大学数理解析研究所、2017年11月6日～9日) :

<http://www2.kobe-u.ac.jp/~brendle/rims2017/e-home.html>

神戸大学・大学院システム情報学研究科・教授

研究者番号 : 70301851

(2)研究分担者

( )

研究者番号 :

(3)連携研究者

( )

研究者番号 :

(4)研究協力者

( )

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

ブレンドル ヤーグ (BRENDLE, Jörg)