

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 15 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21244005

研究課題名（和文） 結び目理論研究

研究課題名（英文） Studies of Knot Theory

研究代表者

河内 明夫（KAWAUCHI AKIO）

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：00112524

研究成果の概要(和文)：結び目理論は、現代数学のほとんどの最先端学問分野と関連し、また多くの科学とも関連する研究分野である。広範な結び目理論研究を大阪市立大学数学研究所の 21 世紀 COE の実績の基礎の上に立って全国規模で教育・研究両面で繰り広げようというのが、当研究の目的であった。国際・国内研究集会の支援事業は着実に実行され、多くの新知見を得ることができた。このような研究活動の中から、結び目理論の初等・中等・高等教育での教授法・学習法の英文著書の出版や結び目理論を応用した特許出願(3 件)等の独創的な研究も生まれた。

研究成果の概要(英文)：Knot theory is related to most advanced modern mathematics and also to many research fields in science. The purpose of this program was to develop, in a national scale, both education and study of an extensive knot theory on the basis of the accomplishments of the 21 COE program of Osaka City Advanced Mathematical institute. The support project of international and domestic meetings was carried out steadily, and many new findings on knot theory could be obtained. Among such research activities, unique studies of knot theory such as the publication of an English book of teaching and learning methods of knot theory in school mathematics and three patent applications of knot theory were born.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2010 年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
2011 年度	6,600,000	1,980,000	8,580,000
総計	20,500,000	6,150,000	26,650,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：数学・幾何学

キーワード：結び目理論、3次元多様体、トポロジー、空間グラフ、数理モデル

1. 研究開始当初の背景

結び目理論と関係する学問分野は、位相幾何学、微分幾何学、双曲幾何学、函数論、可積

分系、数論など現代数学のほとんどの最先端学問分野である。それは量子統計力学を中心とした理論物理学、環状DNAの遺伝子合成

研究、ポリマーネットワーク、複雑系の科学、天文学等の科学とも関連する広領域研究としての側面も持つ。これらの研究分野では、この30年の間に、結び目理論と関係した数々の発見があり、個別的にいろいろな研究の進展が図られてきた。

2. 研究の目的

この研究課題では、結び目をキーワードとして、結び目研究を総合的に発展させることをめざす。科学研究が細分化し横断的な分野が少ない中で、科学を俯瞰する上からも結び目理論は貴重な分野であり、世界をリードしている日本が、確固とした世界的拠点となるために基盤研究(A)に応募した。(物理、化学とも関連する)広範な結び目理論研究を、21世紀COEの事後評価(事前開示)の総合評価「設定された目的は十分達成された」の大阪市立大学数学研究所の21世紀COEの実績を基に、全国規模で、教育・研究両面で繰り広げようということが、当研究の目的である。

3. 研究の方法

(1) 個別研究

研究代表者は、全体の統括のみならず、こころを結び目で表現する研究、プリオンタンパクの位相的モデルを中心とする両端のあるひものトポロジーの研究、空間グラフの複雑度、3次元多様体の数え上げの研究等に従事する。研究分担者金信は、結び目のいろいろな局所変形理論を展開する。研究分担者森内は、一般的な3価グラフの空間埋め込みの性質を調べる。研究分担者岩切は、カンドルを用いて4次元空間内の曲面の研究を行う。連携研究者田中は、結び目不変量により4次元多様体の微分構造の多様性を解明する。連携研究者山本は、オープンブック分解の新たな解析手法の開発を目指す。研究分担者田山は、3次元多様体の数え上げの研究を行う。連携研究者作間は、3次元多様体のヘガード構造と幾何構造、特に双曲構造を研究する。連携研究者中西は、局所変形による結び目の研究に従事する。連携研究者鎌田は、2次元結び目・曲面結び目と4次元のトポロジーを幾何的側面と代数的側面から総合的に調べる。連携研究者寺垣内は、例外的デーン手術について現在までの研究を発展させる。連携研究者谷山は、空間グラフのトポロジー的な分類問題を中心に、関連する結び目、絡み目、空間グラフの射影図の研究やこれらの有限型不変量と局所変形の理論、空間グラフのブレイド表示、位相空間の別の位相空間上の多重度などを研究する。連携研究者茂手木は、ザイフェルト手術全体からなるネットワークを用いて、双曲結び目のザイフェルト手術がトラス結び目のザイフェルト手術から伝染されてくる様子を明らかにし、これまで

なされてこなかった新たな視点でザイフェルト手術の起源を解明する。連携研究者大山は、結び目や空間グラフのヴァッシリエフ不変量を正則表示や正則表示上の局所変形を通して研究し、仮想結び目においても不変量を局所変形を通して研究する。連携研究者合田は、多重値モース理論に付随して定義されるノビコフホモロジーを精密化し定義された、ねじれノビコフホモロジーを研究する。連携研究者橋本は、グリッド図の分割は境界つき3次元多様体のヘゴード・フレアホモロジーの記述に用いられるが、その際にあらわれる構造について研究する。連携研究者枘田は、代数幾何の理論であるトーリック幾何をトポロジーの立場から展開し、トーリック幾何の拡張を進める。連携研究者下川は、結び目のデーン手術の研究を行い、それをDNA組み換え酵素の研究へ応用する。連携研究者佐藤は、ダイアグラムを用いて、2次元結び目のステートサム型の不変量の発見、および3重点数・シート数に関する分類を行う。

(2) 平成21年度の研究発表等のための事業

国内外の若手研究者の活躍を積極支援するのみならず、次の定期会合への参加補助も予定する。① 本学と国外協定締結大学の大学院学生を主としつつ他大学大学院学生も参加するトポロジーを主体とした大学院学生の国際研究集会(平成21年度大阪市立大学開催予定)の滞在費補助、② 国外協定締結大学との国際合同研究発表会等の多数の国内外の交流事業、特に、TAPUセミナー、東アジアスクール等への参加補助、③ 種々の国内の定期会合：KOOKセミナー、拡大KOOKセミナー、研究集会ILDIT、トポロジー新人セミナー、結び目の数学、東北結び目セミナー等への参加支援を行う。

(3) 平成22年度の研究発表等のための事業

国内外の若手研究者の活躍を積極支援するのみならず、次の定期会合への参加補助も予定する。① 本学と国外協定締結大学の大学院学生を主としつつ他大学大学院学生も参加するトポロジーを主体とした大学院学生の国際研究集会(平成22年度韓国慶北大学開催予定)の飛行機代補助、② 国外協定締結大学との国際合同研究発表会等の多数の国内外の交流事業、特に、TAPU-KOOK合同セミナー、日本・メキシコトポロジー国際会議(メキシコColima開催)、東アジアセミナー(広島大)等への参加補助、③ 種々の国内の定期会合：KOOKセミナー、拡大KOOKセミナー、トポロジー新人セミナー、結び目の数学(日大)、東北結び目セミナー等への参加支援を行う。

(4) 平成23年度の研究発表等のための事業

国内外の若手研究者の活躍を積極支援する

のみならず、次の定期会合への参加補助も予定する。① 本学と国外協定締結大学の大学院学生を主として他大学大学院学生も参加する大学院学生の国際研究集会(平成23年度大阪市立大学開催予定)の滞在費補助、②国外協定締結大学との国際合同研究発表会等の多数の国内外の交流事業、特に、TAPU-KOOK合同セミナー(平成23年度大阪市立大学開催予定)の滞在補助、東アジアセミナー(韓国Taejon)等への飛行機代補助、③種々の国内の定期会合：KOOKセミナー、トポロジー新人セミナー、結び目の数学等への参加支援を行う。

4. 研究成果

(1) H21年度の成果

本研究と密接に関連した会議開催実績は以下の通りである。大阪市立大学数学研究所、韓国慶北国立大学 BK21・釜山国立大学 BK21合同の大学院学生ワークショップは、若干名の日本の他大学大学院学生も参加して、平成21年8月21-22日、大阪市立大学・学術情報総合センターで開催した。結び目理論に関する KOOK-TAPU 合同セミナー(= TOP セミナー)は、平成21年8月18-20日、大阪市立大学・学術情報総合センターで開催した。夏の学校「結び目とホモロジーおよびその周辺」は名大多元数理科学研究科理1号館において、8月24-28日、開催した。東北結び目セミナーは、平成21年10月17-19日、山形テルサ(山形市)で開催した。研究集会 ILDT は、平成21年11月12-14日、大阪市立大学学術情報センター10階において、村杉邦男先生のご傘寿を祝して、開催した。結び目の数学 II は、平成21年12月23-26日、早稲田大学14号館において、開催した。日本、中国、韓国3カ国の国際会議である「第6回結び目理論に関する東アジアスクール」は、平成22年1月25-28日、Chern Institute of Mathematics, China で開催した。KOOKセミナーやトポロジー新人セミナー(平成21年8月5-8日、支笏湖ユースホステル)への参加支援も行った。これらの会議を通して、研究代表者・研究分担者、連携研究者をはじめとした多数の結び目関連研究者(実際にはもっと多くのトポロジー関連研究者)の数多くの研究成果の発表が行われた。こうして、当研究の目的は、着実に実行された。

(2) H22年度の成果

本研究と密接に関連した会議開催実績は以下の通りである。大阪市立大学数学研究所、韓国慶北国立大学BK21・釜山国立大学BK21合同の第4回大学院学生ワークショップは第2回 KOOK-TAPU合同セミナーとの同時開催により、7月26-30日の間韓国慶北国立大学で開催された。それに先立6月2-4日の間研究集会 ILDT がOCAMI後援の下京都大学数理解析研究所で

開催された。研究集会E-KOOKセミナー2010は8月27-28日の間大阪市立大学学術情報センター10階で開催された。第5回日本メキシコトポロジー国際会議は9月27日-10月1日の間、メキシコColima大学で開催された。東北結び目セミナーは10月22-24日の間、遊学館 第5研修室で開催された。研究集会結び目の数学 III は12月20-23日の間日本大学文理学部百周年記念館で開催された。日本・中国・韓国の国際会議「第7回結び目理論に関する東アジアスクール」は広島大学学士会館と西条 HAKUWAホテルで1月10-13日の間開催した。KOOKセミナーやトポロジー新人セミナー2010(8月8-11日、国民宿舎王子ヶ岳)への参加支援も行った。これらの会議を通して研究代表者・研究分担者、連携研究者をはじめとした多数の結び目関連研究者、トポロジー関連研究者の数多くの研究成果の発表が行われた。当研究の目的は、このようにして着実に実行された。研究代表者・分担者は結び目、空間グラフ、曲面結び目、キャンドル、3次元多様体の数え上げ等で多くの新知見を得た。また、結び目理論の初等・中等・高等教育での教授法・学習法の英文著書“Teaching and Learning of Knot Theory in School Mathematics”を数学教育関係者の協力を得て、柳本朋子(大阪教育大)と共同編集・出版した。

(3) H23年度の成果

本研究と密接に関連した会議開催実績は以下の通りである。大阪市立大学数学研究所、韓国慶北国立大学BK21・釜山国立大学BK21合同の第5回大学院学生ワークショップは第3回 KOOK-TAPU合同セミナーとの同時開催により、7月25-29日の間、大阪市立大学学術情報センター10階(杉本キャンパス)で開催された。それに先立つ5月25-29日の間、Intelligence of Low-dimensional TopologyがOCAMI後援の下、京都大学数理解析研究所で開催された。東北結び目セミナーは10月14-16日の間、東北大学片平キャンパス 金属材料研究所講堂(14日)、さくらホール(15、16日)で開催された。研究集会4次元トポロジーは、11月7-9日の間、広島大学理学部で開催された。研究集会結び目の数学IVは、12月24-27日の間、東京女子大学24号館(安井てつ記念ホール)で開催された。日本・中国・韓国の国際会議「第8回結び目理論に関する東アジアスクール」は、1月9-12日の間、韓国科学技術院(KAIST)で開催された。KOOKセミナー、第48回トポロジー新人セミナー(8月11-14日、駒鳥山荘)、研究集会Hurwitz action(1月28-29日、大阪市立大学学術情報総合センター文化交流室)への参

加支援も行った。これらの会議を通して研究代表者・研究分担者、連携研究者をはじめとした多数の結び目関連研究者、トポロジー関連研究者の数多くの研究成果の発表が行われた。当研究の目的は、このようにして着実に実行された。研究代表者・分担者は結び目、空間グラフ、曲面結び目、キャンドル、3次元多様体の数え上げ等で多くの新知見を得た。また、結び目理論を応用した「領域選択ゲーム」、「領域点灯ゲーム」、「量子スイッチ」の3件の特許出願もなされた。

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 24 件)

- ① Akio kawauchi and Kayo Yoshida, Topology of prion proteins, 査読有, Journal of Mathematics and System Science, 出版受理 <http://www.sci.osaka-cu.ac.jp/~kawauchi/TopologyofPrionProteins.pdf>
- ② A. Ishii, K. Kishimoto, H. Moriuchi and M. Suzuki, A Table of Genus Two Handlebody-Knots Up to Six Crossings, Journal of Knot Theory and Its Ramifications, 査読有, Vol. 21, No. 4, 2012, 掲載確定 <http://math.tsukuba.ac.jp/~aishii/files/paper020.pdf>
- ③ Akio Kawauchi, On the Alexander polynomials of knots with Gordian distance one, Topology and its Applications, 査読有, Vol. 159, 2012, 948-958 DOI:10.1016/j.topol.2011.11.017
- ④ Taizo Kanenobu and Kaori Sugita, Finite type invariants of order 3 for a spatial handcuff graph, Topology Appl. 査読有, Vol. 159, 2012, 966-979 DOI:10.1016/j.topol.2011.11.016
- ⑤ Donghi Lee, Makoto Sakuma, Epimorphisms between 2-bridge links: Homotopically trivial simple loops on 2-bridge spheres, Proc. London Math. Soc., 査読有, Vol. 104 (2012), 359-386, DOI:10.1112/plms/pdr036
- ⑥ Yasutaka NAKANISHI and Yuki OKADA: Differences of Alexander polynomials for knots caused by a single crossing change, Topology and its Applications, 査読有, Vol. 159, 2012, 1016-1025. DOI:10.1016/j.topol.2011.11.023
- ⑦ S. Satoh and Y. Tomiyama, On the crossing numbers of a virtual knot, Proc. Amer. Math. Soc. 査読有, Vol. 140, 2012, 367-376 DOI:10.1090/S0002-9939-2011-10917-1

- ⑧ Akio Kawauchi, On transforming a spatial graph into a plane graph, Progress of Theoretical Physics Supplement, 査読有, Vol. 191, 2011, 235-244. DOI:10.1143/PTPS.191.225
- ⑨ Teruhisa Kadokami and Akio Kawauchi, Amphicheirality of links and Alexander invariants, SCIENCE CHINA Mathematics, 査読有, Vol. 54, 2011, 2213-2227. DOI: 10.1007/s11425-011-4217-6
- ⑩ Taizo Kanenobu, H(2)-Gordian distance of knots, Journal of Knot Theory and Its Ramifications, 査読有, Vol. 20, 2011, 813-835 DOI:10.1142/S0218216511008991
- ⑪ Mikami Hirasawa, Naoko Kamada and Seiichi Kamada, Bridge presentations of virtual knots, J. Knot Theory Ramifications, 査読有, Vol. 20, 2011, 881-893 DOI: 10.1142/S021821651100901
- ⑫ Masahide Iwakiri, Infinite sequences of mutually non-conjugate surface braids representing same surface-links, Proc. of the American Mathematical Society, 査読有, Vol. 139, 2011, 357-366 DOI: 10.1090/S0002-9939-2011-10893-1
- ⑬ A. Ishii and M. Iwakiri, Quandle cocycle invariants for spatial graphs and knotted handlebodies, Canadian J. Math., 査読有, Vol. 63, 2011, 102-122 DOI:10.4153/CJM-2011-035-0
- ⑭ Toshifumi Tanaka, An infinite family of Casson handles and the Rasmussen invariant of a knot, J. Knot Theory Ramifications, 査読有, Vol. 20, 2011, 1229-1236. DOI: 10.1142/S0218216511009297
- ⑮ Hiroshi Goda and Takuya Sakasai, Factorization formulas and computations of higher-order Alexander invariants for homologically fibered knots, J. Knot Theory Ramifications, 査読有, Vol. 20, 2011, 1355-1380, DOI: 10.1142/S0218216511009303
- ⑯ Kai Ishihara and Koya Shimokawa, Band surgeries between knots and links with small crossing numbers, Progress of Theoretical Physics Supplement, 査読有, Vol. 191, 2011, 245-255 DOI: 10.1143/PTPS.191.245
- ⑰ 寺垣内 政一, Cyclic surgery between toroidal surgeries, Canadian Mathematical Bulletin, 査読有, Vol. 54 (2011), 556-560 DOI:10.4153/CMB-2010-108-6
- ⑱ Y. Fukukawa, M. Masuda, Buchstaber invariants of skeleta of a simplex. Osaka J. Math., 査読有, Vol. 48, 2011, 549-582

http://projecteuclid.org/euclid.ojm/1315318353

⑭ R. Hanaki, R. Nikkuni, K. Taniyama, and A. Yamazaki, On intrinsically knotted or completely 3-linked graphs, Pacific J. Math., 査読有, Vol. 252, (2011) 407-425. DOI: 10.2140/pjm.2011.252.407

⑮ A. Kawauchi and I. Tayama, Enumerating 3-manifolds with lengths up to 9 by a canonical order, Topology Appl., 査読有, Vol. 157, 2010, 261-268

DOI: 10.1016/j.topol.2009.04.028

⑯ Taizo Kanenobu, Upper bound for the alternation number of a torus knot, Topology Appl., 査読有, Vol. 157, 2010, 302-318

DOI: 10.1016/j.topol.2009.04.025

⑰ Seiichi Kamada and Kanako Oshiro, Homology groups of symmetric quandles and cocycle invariants of links and surface-links, Trans. Amer. Math. Soc., 査読有, Vol. 362, 2010, 5501-5527

DOI: 10.1090/S0002-9947-2010-05131-1

⑱ 堀内澄子, 大山淑之, Almost alternating knots producing an alternating knot, J. Knot Theory Ramifications, 査読有, Vol. 19, 2010, 503-507.

DOI: 10.1142/S0218216510007942

⑲ Ryosuke Yamamoto, On Alexander polynomials of open book decompositions of 3-manifolds, Topology Appl., 査読有, Vol. 157, 2010, 173-178,

DOI: 10.1016/j.topol.2009.04.035

[学会発表] (計 12 件)

① 作間 誠, Prime amphicheiral knots admitting a free involution, 「結び目理論の展望」, 2012年3月18日, 早稲田大学

② Hiroshi Goda, Fibered knots and Seifert surfaces, International Week celebrating the 50th anniversary of University of Nantes University of Nantes, France, 2012年3月15日

③ 下川航也, Tangle analysis of unlinking by XerCD-dif-FtsK system, International conference "Discrete and Topological Models in Molecular Biology", 2012年3月13日, University of South Florida

④ Taizo Kanenobu, Band surgery on knots with applications to other local moves, アメリカ数学会春期西部会合, 特別会議『線形および環状ポリマーモデルにおける結び目』ハワイ大学, アメリカ合衆国, 2012年3月4日

⑤ Akio Kawauchi, Topology of prion proteins, AMS Special Session on Knotting in Linear and Ring Polymer Models, March 3, 2012, University of Hawaii at

Manoa, U. S. A.

⑥ Mikiya Masuda, Iterated circle bundles, アメリカ数学会特別会合 Transformation groups in topology, ハワイ大学(アメリカ), 2012年3月3日

⑦ S. Kamada, Twisted biquandles and invariants of twisted links, 国際研究集会 The Eighth East Asian School of Knots and Related Topics, 招待講演, KAIST, Daejeon, 韓国, 2012年1月10日

⑧ S. Satoh, Virtual graph presentations of ribbon surface-knots, The 8th East Asian School of Knots and Related Topics, 2012年1月9日, KAIST, Daejeon, Korea.

⑨ 河内明夫, 数学「結び目理論」を応用した電子ゲーム装置, 大阪府立大学・大阪市立大学新技術説明会, 科学技術振興機構JSTホール(東京・市ヶ谷), 2011年10月14日

⑩ 田山育男, 3次元多様体の列挙についての現状報告, 2011年(秋季)日本数学会トポロジー分科会, 信州大学, 2011年9月29日

⑪ 田中利史, On symmetry of the Jones polynomial of ribbon knots, The 3rd KOOK-TAPU Joint Seminar on Knot Theory and Related Topics, 2011年7月26日, 大阪市立大学

⑫ 河内明夫, 結び目理論を応用する(清水理佳氏との共同講演), 大阪市立大学学術戦略会議, 2011年6月14日, 大阪市立大学

[図書] (計 3 件)

① 鎌田聖一, 丸善出版株式会社, 曲面結び目理論, 2012, 247

② Arnaud Deruelle, Katura Miyazaki and Kimihiko Motegi, Networking Seifert surgeries on knots, Memoirs Amer. Math. Soc., Vol. 217, 2012, 130

③ 河内明夫・柳本朋子共編, Teaching and Learning of Knot Theory in School Mathematics, OCAMI Studies, Vol. 4, 2011, 188 (2版はSpringer Japan KKから2012年に出版予定)

[産業財産権]

○出願状況(計 3 件)

①名称: ゲーム装置、及びゲームプログラム
発明者: 河内明夫、清水理佳、岸本健吾
権利者: 公立大学法人大阪市立大学
種類: 特許
番号: 特願 2011-095520
出願年月日: 平成 23 年 4 月 21 日
国内外の別: 国内

②名称: ゲーム装置、及びゲームプログラム
発明者: 河内明夫、清水理佳、岸本健吾
権利者: 公立大学法人大阪市立大学
種類: 特許

番号：特願 2011-158263
出願年月日：平成 23 年 7 月 19 日
国内外の別：国内

③名称：スイッチングシステム
発明者：河内明夫、清水理佳、岸本健吾
権利者：公立大学法人大阪市立大学
種類：特許
番号：特願 2012-094282
出願年月日：平成 24 年 4 月 17 日
国内外の別：国内

[その他]

(ホームページ) <http://math01.sci.osaka-cu.ac.jp/OCAMI/index.html>

(報道)朝日新聞 2011 年 6 月 17 日・Asahi.com
2011 年 6 月 19 日、「結び目理論を応用した領域選択ゲーム」の記事

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河内 明夫(KAWAUCHI AKIO)
大阪市立大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：00112524

(2) 研究分担者

金信 泰造(KANENOBU TAIZO)
大阪市立大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：00152819

田中 利史(TANAKA TOSHIHUMI)

岐阜大学・教育学部・准教授

研究者番号：60396851

(H21→H23：連携研究者)

岩切 雅英(IWAKIRI MASAHIDE)

佐賀大学・大学院工学系研究科・講師

研究者番号：10453127

(H22→H23：連携研究者)

森内 博正(MORIUCHI HIROMASA)

大阪市立大学・大学院理学研究科・特任助教

研究者番号：20453128

山本 亮介(YAMAMOTO RYOUSUKE)

群馬大学・教育学部・准教授

研究者番号：80445006

(H21→H23：連携研究者)

田山 育男(TAYAMA IKUO)

大阪市立大学・大学院理学研究科・研究所員

研究者番号：00382036

(3) 連携研究者

作間 誠(SAKUMA MAKOTO)

広島大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：30178602

中西 康剛(NAKANISHI YASUTAKA)

神戸大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：70183514

鎌田 聖一(KAMADA SEIICHI)

広島大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：60254380

寺垣内 政一(TERAGAITO MASAKAZU)

広島大学・大学院教育学研究科・教授

研究者番号：80236984

谷山 公規(TANIYAMA KOUKI)

教育・総合科学学術院・教授

研究者番号：10247207

茂手木 公彦(Motegi Kimihiko)

日本大学文理学部・教授

研究者番号：40219978

大山 淑之(Ooyama Toshiyuki)

東京女子大学文理学部・教授

研究者番号：80223981

合田 洋(Gouda Hiroshi)

東京農工大学・共生科学技術研究院・教授

研究者番号：60266913

橋本 義武(HASHIMOTO YOSHITAKE)

東京都市大学・知識工学部・教授

研究者番号：20271182

栢田 幹也(MASUDA MIKIYA)

大阪市立大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：00143371

下川 航也(SHIMOKAWA KOUYA)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：60312633

佐藤 進(SATOU SHIN)

神戸大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号：90345009