

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H02145

研究課題名(和文) 結び目と3次元多様体の量子トポロジー

研究課題名(英文) Quantum Topology of knots and 3-manifolds

研究代表者

大槻 知忠 (Ohtsuki, Tomotada)

京都大学・数理解析研究所・教授

研究者番号：50223871

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 25,500,000円

研究成果の概要(和文)：結び目のKashaev不変量と双曲体積を関連づける体積予想は、量子トポロジーと双曲幾何を結びつける懸案の予想である。7交点以下の双曲結び目に対して、体積予想が成立することを筆者は示した。また、「3次元多様体の体積予想」も近年定式化されており、8の字結び目を整数係数手術して得られる3次元双曲多様体に対してこの予想が成立することを筆者は示した。

また、国際会議「East Asian Conference on Geometric Topology」と研究集会「Intelligence of Low-dimensional Topology」「結び目の数理」「トポロジーシンポジウム」を開催した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

幾何化定理により、3次元多様体の分類問題は、3次元双曲多様体の分類に帰着される。さらに、3次元双曲多様体の分類は、リー群 $PSL(2, \mathbb{C})$ のある種の離散部分群の分類に帰着されるが、しかし、その分類を実際に行うのは困難である。

一方、量子トポロジーにおいて、最強の量子不変量であるLMO不変量がホモロジー球面を分類することが期待されている。体積予想を手がかりにして、双曲幾何と量子トポロジーを融合させることが、3次元多様体の分類問題の観点からも重要であると認められる。

研究成果の概要(英文)：The volume conjecture relates the Kashaev invariant of knots and the hyperbolic volume, and it is an important conjecture which relates the quantum topology and the hyperbolic geometry. I showed that the volume conjecture holds for hyperbolic knots with up to 7 crossings. Further, "the volume conjecture for 3-manifolds" is proposed recently, and I showed that this conjecture holds for hyperbolic 3-manifolds obtained by integral surgery along the figure-eight knot.

Further, we hold the international conference "East Asian Conference on Geometric Topology" and the conferences "Intelligence of Low-dimensional Topology", "Mathematical Sciences of Knot" and "Topology Symposium".

研究分野：位相幾何学

キーワード：結び目 3次元多様体 不変量

1. 研究開始当初の背景

結び目と3次元多様体の不変量について研究を行っている。結び目とは、円周 S^1 の3次元球面 S^3 への埋め込みの像 (のイソトピー類) のことであり、結び目の (イソトピー) 不変量とは、イソトピックな結び目について同じ値をとる、結び目の集合からある集合への写像のことである。また、3次元多様体の (位相) 不変量とは、同相な3次元多様体について同じ値をとる、3次元多様体の集合からある集合への写像のことである。

3次元のトポロジーの発展について、3次元多様体の幾何構造による分類は、1970年代以来 Thurston の幾何化予想を指針として進展し、2000年代に Perelman の幾何化定理として決着した。とくに、双曲構造をもつ3次元多様体の分類は $PSL_2(\mathbb{C})$ のある種の離散部分群の分類に帰着されるが、しかし、その分類を実際に実行するのは依然として困難である。一方、1980年代にトポロジーと数理論が交流をして、3次元のトポロジーにおいては Chern-Simons 理論を背景として結び目と3次元多様体の大量の不変量をもたらされた。これらの不変量は量子群や共形場理論を用いて構成され、これらの不変量に関連するトポロジーの研究は量子トポロジーと呼ばれる。

体積予想は双曲幾何と量子トポロジーを結びつける予想である。これについて述べる。結び目 K の補空間 $S^3 - K$ に完備双曲構造がはいるとき、 K を双曲結び目という。Kashaev は、結び目 K の不変量 $\langle K \rangle_N \in \mathbb{C}$ (N は整数 ≥ 2) を定義し、1990年代後半に、任意の双曲結び目 K に対して $\langle K \rangle_N$ の漸近挙動に双曲体積が現れることを予想した (Kashaev の予想)。Kashaev の不変量は、 $(q)_n = (1-q)(1-q^2)\cdots(1-q^n)$ の関数を成分とする R 行列から定義され、 $(q)_n$ は量子2重対数関数で表示されるが、一方、双曲体積は2重対数関数を用いて表示される、ということがその予想の根拠である。さらに、村上斉-村上順 は1999年に、 $\langle K \rangle_N$ は色つき Jones 多項式 $J_N(K; q)$ の1の N 乗根での値 $J_N(K; e^{2\pi\sqrt{-1}/N})$ に等しいことを示し、 $J_N(K; e^{2\pi\sqrt{-1}/N})$ の言葉で予想を再定式化した (体積予想)。最近20年間、体積予想をテーマにした研究集会が国内外でしばしば開催されており、体積予想は世界的にもこの分野の中心的な話題になってきた。

2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、体積予想を中心として、結び目や3次元多様体の不変量について研究をすすめ、この分野の研究を進展させることである。とくに、体積予想や上述の漸近展開を多くの結び目について示し、漸近展開の係数を新しい結び目不変量として研究することをめざしている。数理論物理的には、色つき Jones 多項式は Chern-Simons 経路積分 ($SU(2)$ 接続全体の空間上の積分) で形式的に表示され、 $SL_2(\mathbb{C})$ 接続全体の空間の中で “無限次元鞍点法” を形式的に適用することにより、問題の漸近挙動が導出される。とくに、 K の補空間の完備双曲構造のホロノミー表現に対応する $SL_2(\mathbb{C})$ 平坦接続における Chern-Simons 汎関数の値が複素体積であり、その平坦接続の近傍の $SL_2(\mathbb{C})$ 接続からの寄与が問題の漸近挙動を与えていると (数理論物理的には) おもわれる。つまり、双曲構造を $SL_2(\mathbb{C})$ 接続の空間の中で摂動したことの寄与がその漸近挙動を与えているとおもわれ、何らかの意味で “双曲幾何の量子化” があることを示唆しているようにもおもわれる。このことが量子トポロジーと双曲幾何にまたがる新しい研究テーマとなり、双曲幾何と量子トポロジーを融合した研究領域をつくることは、3次元多様体の分類問題の観点からも意義深いとおもわれる。

(2) 本研究が支援する、国際会議と研究集会について、述べる。

本研究では、国際会議「East Asian Conference on Geometric Topology」の開催を支援する。筆者は、この国際会議の主催者の一員である。この国際会議は、1990年代に加藤十吉氏、河内明夫氏、Gyo Taek Jin 氏 (KAIST)、Ki Hyoung Ko 氏 (KAIST) によって始められた「結び目理論の日韓スクール」に、中国を加えて発展させる形で、2000年代から毎年開催されている。現在の主な主催者は、筆者と、河野俊丈氏 (明治大)、鎌田聖一氏 (大阪大)、逆井卓也氏 (東京大)、Hyungryul Baik 氏 (KAIST)、Jae Choon Cha 氏 (POSTECH)、Ruifeng Qiu 氏 (華東師範大)、Jiajun Wang 氏 (北京大) である。日本のトポロジー研究の現状は、自国で育成された研究者が大半であり、日本独自の研究文化をもち、それが国際的なレベルに成熟している。日本のトポロジー研究は、今まではそのようにして「ヨーロッパ」「アメリカ」に対する第3極になってきたが、将来的に日本社会全体が縮小傾向にあることをふまえると長期的な展望においては構造改革をしていくことが必要であるとおもわれる。そのため、日本のトポロジー研究の今後の健全な発展のための長期的な指針として、東アジア

ア諸国との連携が非常に重要であると筆者は考える。また、そのような連携の基盤として、研究者の個人レベルでの友好的な信頼関係を積み重ねることが根源的に大切であり、この国際会議のような活動を、今後も次の世代に引き継いで発展させていくことは非常に重要であると筆者は考える。また、本研究では、研究集会「Intelligence of Low-dimensional Topology」と「結び目の数理」と「トポロジーシンポジウム」の開催を支援する。これらについての詳細は後述する。

3. 研究の方法

(1) 体積予想について、双曲結び目 K に対するその証明の根幹部分は、たとえば、次のような形の計算である。結び目の交点数が多くなるほど、パラメータの数は多くなり、この計算の煩雑さは指数関数的に大きくなる。

$$\begin{aligned} \langle K \rangle_N &\sim \frac{1}{N^3} \sum_{i_1, i_2, i_3} \exp\left(\frac{N}{2\pi\sqrt{-1}} V\left(\frac{i_1}{N}, \frac{i_2}{N}, \frac{i_3}{N}\right)\right) \\ &\underset{N \rightarrow \infty}{\sim} \int_{t_1, t_2, t_3} \exp\left(\frac{N}{2\pi\sqrt{-1}} V(t_1, t_2, t_3)\right) dt_1 dt_2 dt_3 \\ &\underset{N \rightarrow \infty}{\sim} e^{Nv(K)} N^{3/2} \omega(K) \cdot \left(1 + \sum_{i=1}^{\infty} \kappa_i(K) \cdot \left(\frac{2\pi\sqrt{-1}}{N}\right)^i\right) \end{aligned}$$

ここで、結び目 K の図式に双曲構造パラメータをつけることにより結び目補空間に双曲構造が与えられ、 V はそのパラメータに関するポテンシャル関数である。また、 $v(K)$ は複素体積 (Chern-Simons 不変量を用いて複素化された双曲体積) であり、 $\omega(K)$ と $\kappa_i(K)$ はこの展開から定まる定数であり、これらは K の不変量である。証明の 1 つのポイントは、上式の 2 つ目の近似 “ \sim ” を示すことであり、この計算はポアソン和公式を用いることにより示される。ポアソン和公式を適用するにあたって、多くの技術的な不等式を数値的に示す必要があり、そこが計算の困難なポイントである。証明のもう 1 つのポイントは、上式の 3 つ目の近似 “ \sim ” を示すことであり、この計算は多変数鞍点法を用いることにより示される。多変数鞍点法を適用するにあたって、上述の場合、実 3 次元の積分領域を複素 3 次元空間の中で適切な条件をみだしながら動かす必要があり、そこがこの計算の困難なポイントである。

(2) 以下では、国際会議と研究集会の実施方法について述べる。

国際会議「East Asian Conference on Geometric Topology」について、参加者は、西日本から 25 名程度、東日本から 25 名程度、韓国から 25 名程度、中国から 25 名程度で、合計 100 名程度の規模である。2016 年度は、東京で開催することを計画した。韓国と中国からの参加者の滞在費を日本側から支援する予定で、これを西日本と東日本の主催者で協力して支援する。2016 年度以降の開催地は原則として西日本、東日本、中国、韓国を巡回する計画である。中国・韓国で開催される場合は、西日本からの参加者 25 名の渡航費を本研究から支援する計画である。日本で開催される場合は、中国・韓国からの参加者の滞在費を西日本と東日本で協力して支援することを計画した。

研究集会「Intelligence of Low-dimensional Topology」は、2003～2009 年度に鎌田聖一氏が毎年開催してきた研究集会を、2010 年度以降は筆者が引き継いで京大数理研で開催している。この研究集会を毎年 5 月頃に京大数理研において開催する。筆者は毎年研究集会の企画のテーマを設定しており、サーベイ講演やこのテーマで活躍中の外国人若手研究者の招待講演を行った。この研究集会の報告集を数理研講究録として出版する。この研究集会では、problem session で活発な議論を行っており、筆者はその内容を未解決問題集としてまとめており、それを講究録の一部として出版する。この研究集会は参加者 70 名程度の規模を見込んでいる。

研究集会「結び目の数理」について、この研究集会は結び目理論を中心とした低次元トポロジーの研究集会で、谷山公規氏 (早稲田大)、茂手木公彦氏 (日本大)、大山淑之氏 (東京女子大) がまわりもちで毎年 12 月に開催してきた。例年多くの若手研究者が講演して研究交流しており、多くの若手研究者が積極的に参加することを期待している。研究集会は参加者 100 名程度の規模を見込んでいる。「トポロジーシンポジウム」について、日本数学会トポロジー分科会が毎年開催しているシンポジウムであり、日本で最大のトポロジーのシンポジウムである。トポロジーの全分野の研究者が参加して、トポロジー全体の視点で研究交流をしており、日本のトポロジーを発展させるために最も重要なシンポジウムである。参加者は 200 名程度の規模である。

4. 研究成果

(1) 結び目の体積予想について、筆者は7交点以下の双曲結び目に対して Kashaev 不変量（色つき Jones 多項式の特特殊値 $J_N(K; e^{2\pi\sqrt{-1}/N})$ に等しい）が次の形に漸近展開されることを示した（6交点の場合は、横田氏との共同研究）。

$$J_N(K; e^{2\pi\sqrt{-1}/N}) \underset{N \rightarrow \infty}{\sim} e^{Nv(K)} N^{3/2} \omega(K) \cdot \left(1 + \sum_{i=1}^{\infty} \kappa_i(K) \cdot \left(\frac{2\pi\sqrt{-1}}{N}\right)^i\right)$$

とくに、このことから、7交点以下の双曲結び目に対して体積予想が成立することが示される。前述のポテンシャル関数 V の臨界値として双曲体積が与えられ、鞍点法により、その値で漸近展開の主要部が表される。さらに、漸近展開の次の項（準古典極限）はその臨界点における V の Hessian を用いて表される。それを計算することにより、筆者は7交点以下の双曲結び目に対して $2\sqrt{-1}\omega(K)^2$ は Reidemeister torsion（双曲構造を与えるホロノミー表現で係数をねじって定義されるもの）に等しいことを示した（高田氏との共同研究）。

3次元多様体の体積予想について、 N を奇数として、 $q = e^{4\pi\sqrt{-1}/N}$ における3次元多様体 M の量子 $SO(3)$ 不変量を $\hat{\tau}_N(M)$ とおく。8の字結び目にそって3次元球面を整係数手術して得られる3次元双曲多様体 M に対して、 $\hat{\tau}_N(M)$ は次の形に漸近展開されることを筆者は示した。

$$\hat{\tau}_N(M) \underset{N \rightarrow \infty}{\sim} \left(\begin{array}{l} |H_1| \text{ と } N \text{ からきまる} \\ 1 \text{ の } 8 \text{ 乗根} \end{array} \right) \cdot e^{Nv(M)} N^{3/2} \omega(M) \cdot \left(1 + \sum_{i=1}^{\infty} \kappa_i(M) \cdot \left(\frac{4\pi\sqrt{-1}}{N}\right)^i\right)$$

ここで、 $v(M)$ は複素体積であり、 $\omega(M)$ と $\kappa_i(M)$ はこの展開から定まる定数であり、これらは M の不変量である。とくに、このことから、そのような M に対して3次元多様体の体積予想が成立することが示される。さらに、筆者はそのような M に対して $\omega(M)^2$ は Reidemeister torsion の定数倍に等しいことを示した（高田氏との共同研究）。

(2) 本研究が支援した、国際会議と研究集会について、述べる。

国際会議「East Asian Conference on Geometric Topology」について、2017年2月に東京大学において、2018年1月に KAIST（韓国）において、旧名の“East Asian School of Knots and Related Topics”として開催された。さらに、現在の名称の“East Asian Conference on Geometric Topology”として、2019年1月に Peking University（中国）において開催され、2020年2月に京都大学数理解析研究所において筆者が開催し、2021年1月に東京大学においてオンライン開催された。各回の参加者は100名程度であった。

研究集会「Intelligence of Low-dimensional Topology」について、毎年5月に京都大学数理解析研究所において筆者が開催した。2016年5月に Floer homology をテーマとして開催し、2017年5月に3次元多様体の体積予想をテーマとして開催し、2018年5月に4次元多様体の trisection をテーマとして開催し、2019年5月に図式的代数をテーマとして開催し、2020年5月に色つき Jones 多項式のスロープ予想をテーマとしてオンライン開催し、2021年5月に指標多様体をテーマとしてオンライン開催し、2022年5月に Floer homotopy をテーマとしてハイブリッド型（対面とオンラインの併用）で開催した。コロナウィルス感染症の対策のため、2020年度と2021年度にオンライン開催をしたため、その年度の旅費を繰越して、2022年度にハイブリッド型で開催した。報告集を数理解析研究録として出版し、problem session で作成した未解決問題集を報告集の一部として出版した。各回の参加者は70名程度であった。

研究集会「結び目の数理解析」について、2016年12月に日本大学において、2017年12月に東京女子大学において、旧名の「結び目の数学」として、開催した。さらに、現在の名称の「結び目の数理解析」として、2018年12月に早稲田大学において開催し、2019年12月に日本大学において開催し、2020年12月に東京女子大学においてオンライン開催した。各回の参加者は100名程度であった。

「トポロジーシンポジウム」について、2016年7月に神戸大学において開催し、2017年8月に東海大学において開催し、2018年8月に信州大学において開催し、2019年8月に秋田市において開催し、2020年10月に東京大学においてオンライン開催し、2021年8月に広島大学においてオンライン開催し、2022年8月に北見工業大学において開催した。コロナウィルス感染症の対策のため、2020年度と2021年度にオンライン開催をしたため、その年度の旅費を繰越して、2022年度に対面で開催した。各回の参加者は200名程度であった。

これらの国際会議と研究集会では、国内外の研究者による活発な研究交流が行われ、十分な成果を挙げた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計46件（うち査読付論文 46件 / うち国際共著 9件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ohtsuki Tomotada, Takata Toshie	4. 巻 370
2. 論文標題 On the Quantum $SU(2)$ Invariant at $q = \exp(4\pi\sqrt{-1}/N)$ and the Twisted Reidemeister Torsion for Some Closed 3-Manifolds	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Communications in Mathematical Physics	6. 最初と最後の頁 151 ~ 204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00220-019-03489-2	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 -
1. 著者名 Ohtsuki Tomotada	4. 巻 18
2. 論文標題 On the asymptotic expansion of the quantum $SU(2)$ invariant at $q = \exp(4\pi\sqrt{-1}/N)$ for closed hyperbolic 3-manifolds obtained by integral surgery along the figure-eight knot	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Algebraic & Geometric Topology	6. 最初と最後の頁 4187 ~ 4274
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2140/agt.2018.18.4187	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 -
1. 著者名 OHTSUKI TOMOTADA, YOKOTA YOSHIYUKI	4. 巻 165
2. 論文標題 On the asymptotic expansions of the Kashaev invariant of the knots with 6 crossings	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society	6. 最初と最後の頁 287 ~ 339
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S0305004117000494	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 -
1. 著者名 Ohtsuki Tomotada	4. 巻 28
2. 論文標題 On the asymptotic expansions of the Kashaev invariant of hyperbolic knots with seven crossings	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 International Journal of Mathematics	6. 最初と最後の頁 1750096 ~ 1750096
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0129167X17500963	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 -

1. 著者名 Ohtsuki Tomotada	4. 巻 7
2. 論文標題 On the asymptotic expansion of the Kashaev invariant of the 5_2 knot	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Quantum Topology	6. 最初と最後の頁 669 ~ 735
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4171/QT/83	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 -

1. 著者名 Akimoto Yuta, Taniyama Kouki	4. 巻 29
2. 論文標題 Unknotting numbers and crossing numbers of spatial embeddings of a planar graph	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Knot Theory and Its Ramifications	6. 最初と最後の頁 2050095 ~ 2050095
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218216520500959	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 -

1. 著者名 Arai Masafumi, Taniyama Kouki	4. 巻 29
2. 論文標題 Knot diagrams on a punctured sphere as a model of string figures	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Knot Theory and Its Ramifications	6. 最初と最後の頁 2050071 ~ 2050071
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218216520500716	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 -

1. 著者名 Ichihara K., Jong I. D., Taniyama K.	4. 巻 39
2. 論文標題 Achiral 1-Cusped Hyperbolic 3-Manifolds Not Coming from Amphicheiral Null-homologous Knot Complements	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Lobachevskii Journal of Mathematics	6. 最初と最後の頁 1353 ~ 1361
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1134/S199508021809038X	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 該当する

1. 著者名 Huh Youngsik, Lee Jung Hoon, Taniyama Kouki	4. 巻 26
2. 論文標題 Stick number of tangles	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Knot Theory and Its Ramifications	6. 最初と最後の頁 1750094 ~ 1750094
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218216517500948	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 該当する

1. 著者名 Kanenobu Taizo, Sumi Toshio	4. 巻 32
2. 論文標題 Extension of Takahashi 's ribbon 2-knots with isomorphic groups	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Knot Theory and Its Ramifications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S021821652350013X	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 -

1. 著者名 Kanenobu Taizo, Takioka Hideo	4. 巻 31
2. 論文標題 4-Move distance of knots	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Knot Theory and Its Ramifications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218216522500493	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 -

1. 著者名 Kanenobu Taizo, Takahashi Kota	4. 巻 301
2. 論文標題 Classification of ribbon 2-knots of 1-fusion with length up to six	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Topology and its Applications	6. 最初と最後の頁 107521 ~ 107521
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.topol.2020.107521	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 -

1. 著者名 Kanenobu Taizo, Moriuchi Hiromasa	4. 巻 264
2. 論文標題 Coherent band-Gordian distances between knots and links with up to seven crossings	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Topology and its Applications	6. 最初と最後の頁 233 ~ 250
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.topol.2019.06.020	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 -

1. 著者名 Kanenobu Taizo, Sumi Toshio	4. 巻 28
2. 論文標題 Classification of ribbon 2-knots presented by virtual arcs with up to four crossings	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Knot Theory and Its Ramifications	6. 最初と最後の頁 1950067 ~ 1950067
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218216519500676	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 -

1. 著者名 Kanenobu Taizo, Komatsu Seiya	4. 巻 26
2. 論文標題 Enumeration of ribbon 2-knots presented by virtual arcs with up to four crossings	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Knot Theory and Its Ramifications	6. 最初と最後の頁 1750042 ~ 1750042
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218216517500420	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 -

1. 著者名 Breuillard Emmanuel, Fujiwara Koji	4. 巻 71
2. 論文標題 On the joint spectral radius for isometries of non-positively curved spaces and uniform growth	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Annales de l'Institut Fourier	6. 最初と最後の頁 317 ~ 391
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5802/aif.3374	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 該当する

1. 著者名 Bestvina Mladen, Bromberg Ken, Fujiwara Koji	4. 巻 4
2. 論文標題 Proper actions on finite products of quasi-trees	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Annales Henri Lebesgue	6. 最初と最後の頁 685 ~ 709
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5802/ahl.85	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 該当する

1. 著者名 Fujiwara Koji, Papasoglu Panos	4. 巻 374
2. 論文標題 Asymptotic dimension of planes and planar graphs	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the American Mathematical Society	6. 最初と最後の頁 8887 ~ 8901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1090/tran/8487	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 該当する

1. 著者名 Dahmani Fran?ois, Fujiwara Koji, Guirardel Vincent	4. 巻 29
2. 論文標題 Solvable groups of interval exchange transformations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Annales de la Facult? des sciences de Toulouse : Math?matiques	6. 最初と最後の頁 595 ~ 618
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5802/afst.1641	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 該当する

1. 著者名 Fujiwara Koji, Shioya Takashi	4. 巻 24
2. 論文標題 Graph manifolds as ends of negatively curved Riemannian manifolds	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geometry & Topology	6. 最初と最後の頁 2035 ~ 2074
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2140/gt.2020.24.2035	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 -

1. 著者名 Bestvina Mladen, Bromberg Kenneth, Fujiwara Koji	4. 巻 19
2. 論文標題 The verbal width of acylindrically hyperbolic groups	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Algebraic and Geometric Topology	6. 最初と最後の頁 477 ~ 489
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2140/agt.2019.19.477	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 該当する

1. 著者名 Fujiwara Koji, Kabaya Yuichi	4. 巻 28
2. 論文標題 Computing Kazhdan Constants by Semidefinite Programming	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Experimental Mathematics	6. 最初と最後の頁 301 ~ 312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/10586458.2017.1396509	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 -

1. 著者名 Ito Tetsuya	4. 巻 216
2. 論文標題 Applications of the Casson-Walker invariant to the knot complement and the cosmetic crossing conjectures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geometriae Dedicata	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10711-022-00722-6	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 -

1. 著者名 Ito Tetsuya	4. 巻 15
2. 論文標題 A quantitative Birman-Menasco finiteness theorem and its application to crossing number	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Topology	6. 最初と最後の頁 1794 ~ 1806
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1112/topo.12259	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 -

1. 著者名 Ito Tetsuya	4. 巻 31
2. 論文標題 On homogeneous quasipositive links	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Knot Theory and Its Ramifications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218216522500808	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 -

1. 著者名 Ito Tetsuya	4. 巻 33
2. 論文標題 A note on HOMFLY polynomial of positive braid links	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Mathematics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0129167X22500318	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 -

1. 著者名 Ito Tetsuya, Motegi Kimihiko, Teragaito Masakazu	4. 巻 -
2. 論文標題 Generalized torsion for hyperbolic 3 manifold groups with arbitrary large rank	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Bulletin of the London Mathematical Society	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1112/blms.12784	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 -

1. 著者名 Kazuhiro Ichihara, Tetsuya Ito and Toshio Saito	4. 巻 321
2. 論文標題 On constraints for knots to admit chirally cosmetic surgeries and their calculations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Pacific Journal of Mathematics	6. 最初と最後の頁 167-191
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2140/pjm.2022.321.167	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 -

1. 著者名 Ito Tetsuya	4. 巻 150
2. 論文標題 Cosmetic crossing conjecture for genus one knots with non-trivial Alexander polynomial	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the American Mathematical Society	6. 最初と最後の頁 871 ~ 876
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1090/proc/15654	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 -

1. 著者名 ITO Tetsuya	4. 巻 75
2. 論文標題 A NOTE ON KNOT FERTILITY	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Kyushu Journal of Mathematics	6. 最初と最後の頁 273 ~ 276
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2206/kyushujm.75.273	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 -

1. 著者名 Ito Tetsuya, Motegi Kimihiko, Teragaito Masakazu	4. 巻 301
2. 論文標題 Generalized torsion and Dehn filling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Topology and its Applications	6. 最初と最後の頁 107515 ~ 107515
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.topol.2020.107515	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 -

1. 著者名 Hamer Jesse, Ito Tetsuya, Kawamuro Keiko	4. 巻 31
2. 論文標題 Positivities of Knots and Links and the Defect of Bennequin Inequality	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Experimental Mathematics	6. 最初と最後の頁 199 ~ 225
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/10586458.2019.1596848	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 該当する

1. 著者名 ITO TETSUYA	4. 巻 243
2. 論文標題 A NONDEGENERATE EXCHANGE MOVE ALWAYS PRODUCES INFINITELY MANY NONCONJUGATE BRAIDS	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nagoya Mathematical Journal	6. 最初と最後の頁 205 ~ 208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/nmj.2019.38	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 -

1. 著者名 Ito Tetsuya	4. 巻 64
2. 論文標題 A Note on Chirally Cosmetic Surgery on Cable Knots	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Canadian Mathematical Bulletin	6. 最初と最後の頁 163 ~ 173
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4153/S0008439520000338	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 -

1. 著者名 Ito Tetsuya	4. 巻 28
2. 論文標題 On LMO invariant constraints for cosmetic surgery and other surgery problems for knots in S^3	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications in Analysis and Geometry	6. 最初と最後の頁 321 ~ 349
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4310/CAG.2020.v28.n2.a4	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 -

1. 著者名 ITO TETSUYA	4. 巻 243
2. 論文標題 A NONDEGENERATE EXCHANGE MOVE ALWAYS PRODUCES INFINITELY MANY NONCONJUGATE BRAIDS	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Nagoya Mathematical Journal	6. 最初と最後の頁 205 ~ 208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/nmj.2019.38	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 -

1. 著者名 Ito Tetsuya, Motegi Kimihiko, Teragaito Masakazu	4. 巻 147
2. 論文標題 Generalized torsion and decomposition of 3-manifolds	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the American Mathematical Society	6. 最初と最後の頁 4999 ~ 5008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1090/proc/14581	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 -

1. 著者名 Hamer Jesse, Ito Tetsuya, Kawamuro Keiko	4. 巻 31
2. 論文標題 Positivities of Knots and Links and the Defect of Bennequin Inequality	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Experimental Mathematics	6. 最初と最後の頁 199 ~ 225
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/10586458.2019.1596848	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 該当する

1. 著者名 ITO Tetsuya, KAWAMURO Keiko	4. 巻 71
2. 論文標題 Positive factorizations of symmetric mapping classes	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Mathematical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 309 ~ 327
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2969/jmsj/78827882	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 -

1. 著者名 Ito Tetsuya	4. 巻 27
2. 論文標題 Braids, chain of Yang-Baxter like operations, and (transverse) knot invariants	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Knot Theory and Its Ramifications	6. 最初と最後の頁 1843009 ~ 1843009
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218216518430095	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 -

1. 著者名 Tetsuya Ito	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Topological formula of the loop expansion of the colored Jones polynomials	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Trans. Amer. Math. Soc	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Tetsuya Ito	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 On LMO invariant constraints for cosmetic surgery and other surgery problems for knots in S^3	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Comm. Anal. Geom	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Tetsuya Ito	4. 巻 27
2. 論文標題 A characterization of almost alternating knot	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Knot theory Ramifications	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

1. 著者名 Ito Tetsuya, Kawamuro Keiko	4. 巻 17
2. 論文標題 On a question of Etnyre and Van Horn-Morris	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Algebraic & Geometric Topology	6. 最初と最後の頁 561 ~ 566
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2140/agt.2017.17.561	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 -

1. 著者名 Ito Tetsuya	4. 巻 216
2. 論文標題 On the 3-dimensional invariant for cyclic contact branched coverings	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Topology and its Applications	6. 最初と最後の頁 1~7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.topol.2016.11.007	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 -

1. 著者名 Ito Tetsuya	4. 巻 25
2. 論文標題 Framing functions and a strengthened version of Dehn's lemma	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Journal of Knot Theory and Its Ramifications	6. 最初と最後の頁 1650031 ~ 1650031
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218216516500310	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20件 (うち招待講演 20件 / うち国際学会 19件)

1. 発表者名 Fujiwara Koji
2. 発表標題 Asymptotic Dimension of the Arc Graphs
3. 学会等名 Topology fair (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ito Tetsuya, Motegi Kimihiko, Teragaito Masakazu
2. 発表標題 Generalized torsion in 3-manifold groups and normal closures of slope elements
3. 学会等名 Ordered Groups and Rigidity in Dynamics and Topology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ito Tetsuya
2. 発表標題 Garside theory and braid group representations
3. 学会等名 Expansions, Lie Algebras, and Invariants (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ito Tetsuya
2. 発表標題 Bennequin inequality and strongly quasipositive braids in annulus open books
3. 学会等名 Mini-Symposium : Knot Theory on Okinawa (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷山公規
2. 発表標題 Unknotting numbers and crossing numbers of spatial embeddings of a planar graph
3. 学会等名 Friday Seminar on Knot Theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金信泰造
2. 発表標題 Classification of ribbon 2-knots of 1-fusion with up to six crossings
3. 学会等名 Third Pan-Pacific International Conference on Topology and Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koji Fujiwara
2. 発表標題 Quickly generating a nice hyperbolic element
3. 学会等名 GAGTA-2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koji Fujiwara
2. 発表標題 Group actions on quasi-trees
3. 学会等名 International Congress of Mathematicians (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taizo KANENOBU
2. 発表標題 Twisted Alexander polynomial of a ribbon 2-knot of 1-fusion
3. 学会等名 The 10th KOOK-TAPU Joint Seminar on Knots and Related Topics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taizo Kanenobu
2. 発表標題 Twisted Alexander polynomial of a ribbon 2-knot
3. 学会等名 The 14th East Asian Conference on Geometric Topology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tetsuya Ito
2. 発表標題 Strongly quasipositive braids in general contact 3-manifolds
3. 学会等名 Braid groups, configuration spaces and homotopy theory (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tetsuya Ito
2. 発表標題 Right-veering type characterization of tightness
3. 学会等名 AMS Sectional Meeting Special Session on Three-dimensional Floer Theory, Contact Geometry, and Foliations (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 金信泰造
2. 発表標題 自明なアレキサンダー多項式をもつ2次元リボン結び目のある無限族の分類
3. 学会等名 拡大 K00K セミナー 2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 金信泰造
2. 発表標題 Classification of Ribbon 2-Knots
3. 学会等名 Self-distributive system and quandle (co)homology theory in algebra and low-dimensional topology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 金信泰造
2. 発表標題 Coherent band-Gordian distances between knots and links with up to seven crossings
3. 学会等名 The 2nd Pan Pacific International Conference on Topology and Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 金信泰造
2. 発表標題 Classification of a family of ribbon 2-knots with trivial Alexander polynomial
3. 学会等名 The 13th East Asian School of Knots and Related Topics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tetsuya Ito
2. 発表標題 Characterization of strongly quasi positive closed braids
3. 学会等名 Representation spaces, Teichmuller theory, and their relationship with 3-manifolds from the classical and quantum viewpoints (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kouki Taniyama
2. 発表標題 Realization of Knots and Links in a Spatial Graph
3. 学会等名 MAA MathFest 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Ohtsuki
2. 発表標題 On the asymptotic expansion of the quantum SU(2) invariant at $q = \exp(4\pi i/N)$ for closed hyperbolic 3-manifolds obtained by integral surgery along the figure-eight knot
3. 学会等名 Volume conjecture and quantum topology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Tetsuya Ito
2. 発表標題 Quasi-right-veering braids in transverse knot theory
3. 学会等名 International Conference on Low-dimensional Topology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 藤原 耕二	4. 発行年 2021年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 224
3. 書名 離散群の幾何学	

〔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
研究分担者	金信 泰造 (Kanenobu Taizo) (00152819)	大阪市立大学・大学院理学研究科・教授 (24402)	

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
研究分担者	伊藤 哲也 (Ito Tetsuya) (00710790)	京都大学・理学研究科・准教授 (14301)	
研究分担者	谷山 公規 (Taniyama Kouki) (10247207)	早稲田大学・教育・総合科学学術院・教授 (32689)	
研究分担者	藤原 耕二 (Fujiwara Koji) (60229078)	京都大学・理学研究科・教授 (14301)	
研究分担者	逆井 卓也 (Sakasai Takuya) (60451902)	東京大学・大学院数理科学研究科・准教授 (12601)	
研究分担者	大山 淑之 (Ohyama Yoshiyuki) (80223981)	東京女子大学・現代教養学部・教授 (32652)	
研究分担者	山下 靖 (Yamashita Yasushi) (70239987)	奈良女子大学・自然科学系・教授 (14602)	
研究分担者	茂手木 公彦 (Motegi Kimihiko) (40219978)	日本大学・文理学部・教授 (32665)	
研究分担者	森藤 孝之 (Morifuji Takayuki) (90334466)	慶應義塾大学・経済学部（日吉）・教授 (32612)	

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
研究分担者	玉木 大 (Tamaki Dai) (10252058)	信州大学・学術研究院理学系・教授 (13601)	
研究分担者	志摩 亜希子 (Shima Akiko) (50317765)	東海大学・理学部・教授 (32644)	

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4件

国際研究集会 East Asian Conference on Geometric Topology	開催年 2020年～2020年
国際研究集会 East Asian Conference on Geometric Topology	開催年 2019年～2019年
国際研究集会 East Asian School of Knots and Related Topics	開催年 2018年～2018年
国際研究集会 East Asian School of Knots and Related Topics	開催年 2017年～2017年

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