

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06313

研究課題名(和文) 数学基礎論と量子基礎論の圏論的統合と機械学習における圏論的双対性へのその応用

研究課題名(英文) The Categorical Unification of Foundations of Mathematics and of Quantum Physics, and its Applications to Categorical Duality in Machine Learning

研究代表者

丸山 善宏 (Maruyama, Yoshihiro)

京都大学・白眉センター・特定助教

研究者番号：20761290

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本プロジェクトのタイトルである「数学基礎論と量子基礎論の圏論的統合と機械学習における圏論的双対性へのその応用」はその研究成果の観点から言って主として三つの内容を含む。特に「数学基礎論と量子基礎論の圏論的統合」には二つの意味がある。一つにはそれは「数学基礎論的な空間概念と量子基礎論的な空間概念の統合」である。もう一つの意味は「数学基礎論的な双対性と量子基礎論的な双対性の統合」である。そしてまた最初の統合は「伝統的量子論理と圏論的量子力学のLawvere的統合」をも含んだものである。残る一つが「機械学習(のカーネル法)における圏論的双対性(或は人工知能の双対性)」である。以上が主な研究成果である。

研究成果の概要(英文)：Our project is about the unification of mathematical and quantum foundations, and its applications to categorical duality in machine learning. Our result is nevertheless three-fold because "unification" has a double meaning. It is the unification of space conceptions in foundations of mathematics and of quantum theory (i.e., topos theory and categorial quantum theory); yet at the same time, it is the unification of (noncommutative) dualities in those two foundations. The first "unification" also implies the Lawverian unification of traditional quantum logic and categorial quantum mechanics. The remaining, third type of result is, of course, categorical duality in (the kernel method of) machine learning (or the duality of artificial intelligence). Overall, the project may be considered a stepping stone to what we call "categorical unified science" or "pluralistic unified science", which is the ultimate goal of "categorical logical positivism" as discussed in our recent Synthese paper.

研究分野：数理科学・哲学

キーワード：圏論的双対性 圏論の意味論 圏論的量子論 圏論的AI 圏論的普遍論理 諸科学の圏論的基礎 圏論的統一科学 圏論の哲学

1. 研究開始当初の背景

研究代表者はこれまで圏論に基づく数学基礎論(ないし論理学)と量子基礎論(英語で単に Quantum Foundations と呼ばれる量子物理の基礎論の意)を研究してきた。最も中心的なテーマは「圏論的双対性」であり、他の研究は双対性理論との関連において追求してきた。数学における「代数と幾何の双対性(例えば可換環とアファインスキームの双対性)」、論理学における「構文論と意味論の双対性(そしてその帰結としての完全性定理)」、計算機科学における「システムの観察可能な挙動とその内部状態の双対性」、量子物理学における「物理量と状態の双対性」など、様々な双対性の根源に潜んでいる普遍的な構造を、圏論や普遍代数の抽象言語を理論的な礎として表現しようと努めてきた。

双対性とはある意味では空間概念の探究である。広く言って二種類の空間概念がある。静的な点の集まりとしての、ニュートンの絶対空間のような空間概念と、点概念を仮定しない、事物間の相互関係の構造としての、ライプニッツの関係論的な空間概念である。点の集まりとしての集合論的な空間概念と、点概念(つまり素イデアルのような選択公理的な超越的原理を仮定しないと一般には存在が保証されないもの)を仮定しない代数的な空間概念の間に双対性が存在する。構成的数学は点を仮定せず排中律や選択公理を避けるが、双対性はその考えの基礎にありその意味でも基礎論的重要性がある。しかし現代数学における空間概念の探究には次のようなよく知られた困難がある。

トポスのような数学基礎論の空間概念と、ヒルベルト空間(のなすモノイダル圏)のような量子基礎論の空間概念をいかに統合するかは喫緊のチャレンジと考えられている。研究代表者は以前の論文で提案した Categorical Universal Logic (圏論的普遍論理)という枠組みの中で一つの見通しを示した。さらに別の論文では研究代表者の枠組みが実際に色々な(いわゆる部分構造)論理の圏論的意味論を統一的に与えるのに応用できるということを実証した。そういった研究の結果、双対性は圏論的論理のモデル、いわば一般化されたトポスのようなものとして現れ、一つは双対性それ自体が一つの空間であるという見方が可能となったのである。

本研究の端緒は、以上のような方向性をさらに推し進め、その帰結を理論面と応用面の双方から探るということであった。とりわけ本研究はその理論面においては圏論的量子論理と非可換双対性に、その応用面においては機械学習におけるカーネル法に焦点を当てたものであった。これらの詳細について次の研究目的欄でより具体的に記述しておく。

2. 研究の目的

本研究の目的は端的に言って以下の三つである。第一は、数学基礎論の空間概念と量子基礎論の空間概念の統合、すなわちトポス理論的な空間概念と圏論的量子力学的な空間概念の統合、そしてそこから自然に帰結すると考えられる、アブラムスキー・クックによる圏論的量子力学(新しい量子論理)とバーコフ・フォンノイマンの(伝統的)量子論理の融合である。第二は、数学基礎論の場合にも量子基礎論の場合にも機能する、非可換双対性の一般理論を、圏論的普遍代数の技法により(グロタンディークの)スキーム概念を拡張することで構築することである。第三は、量子論的双対性を包摂する、研究代表者の双対性理論を、機械学習における主要手法である、再生核ヒルベルト空間に基づく所謂カーネル法の理論に応用することで、近年のビッグデータ研究において圏論的双対性の果たす原理的役割を示すことである。

以上端的に述べた三つの目的について以下でより詳しくそれぞれの内容を敷衍する。

これまでアブラムスキー・クックによる圏論的量子力学は、バーコフ・フォンノイマンの量子論理に対するアンチテーゼのようなものとして主張され一般にもそのように理解されてきた。だが本研究では、両者が決して互いに排除し合うものではなく、両者の提示する構造は融和可能なものであり、それにより両者の利点を組み合わせ同時に欠点を補い合うことが可能になることを示す。そしてこれはより一般に、論理と型理論の関係、言い換えれば真理の理論と証明の理論の関係に関するさらなる含意を有するだろう。なぜならこの融合が意味するのは、量子力学の命題論理(バーコフ・フォンノイマン)と量子力学の型理論(アブラムスキー・クック)の融合だからである。それが可能になる背景には、研究代表者の先述の「圏論的普遍論理」の理論においては論理と型理論が、ローヴェアの hyperdoctrine の概念の拡張により、それぞれの性質によらず(カリー・ハワード的な同型対応がなくとも)自由に組み合わせ可能な普遍的仕方で統合されているという事実がある。この自由度を利用して量子論理に対する二つのアプローチを統合することができるのである。

非可換双対性はこれまで個別に幾つか研究されてきたものであるが、様々な存在する非可換双対性を統一する双対性の一般理論のようなものはほとんど考えられて来なかった。特に、数学基礎論の非可換双対性と、量子基礎論の非可換双対性を統一的に分析するための方法論は、これまでの研究においては全く構築されていない。本研究ではそういった論理と物理の双対性の統一理論

を与える。その一般理論の帰結として導出される、所謂 *quantale* に対する双対性や、論理に対するスキーム的双対性のほとんどは、一般理論とは独立したそれ自体で新しい結果になる。スキームの概念は代数幾何学に起源を持つがトポスの概念が論理と深い関係を持ったようにスキームの概念も(以上で述べたような仕方で拡張されれば)論理と深い関係を持つものと考えられる。こういった数学基礎論におけるスキームの概念の意義はこれまで見過ごされてきたものであり、本研究はそれに光を当てることで新たな地平を切り拓くものである。

以上二つは本研究の理論面での帰結であるが、応用面での帰結を見る為に、データマイニングにおいて実践的に使用され相当の実利的成果を挙げている、統計的機械学習における「カーネル法」に焦点を当てる。カーネル函数と再生核ヒルベルト空間がそこでの主要な登場人物であり、所謂「カーネル・トリック」は両者の関係を上手く利用することで成立している。本研究では、カーネル函数の圏と再生核ヒルベルト空間の圏を適切に定義して、両者の間に圏論的双対性が存在すること、そしてカーネル法はその双対性の帰結として理解可能になることを示し、それにより双対性理論が機械学習に基づくビッグデータ解析においても根源的な役割を果たすという新たな可能性を切り拓くことを目指す。流行の工学的解析手法の背景にある数学的原理は、リーマン面と代数函数体の双対性や、ガロア群と中間体の双対性のような、古き良き双対性において知られてきた双対性の数学的効用と何ら異なることがないことを示すわけである。

以上三つの方向性のいずれについても(部分的に言及してきたように)、本プロジェクト開始以前からすでに研究代表者による予備的な研究成果や肯定的な観察結果の継続的な蓄積があり、それらを利用して研究を進めることができる。以下で技術的により具体的な研究方法についてさらに詳しく述べる。

3. 研究の方法

上で挙げた三つの研究目的について、最初に研究の方針を手短に纏めたあと、順を追ってその研究方法を詳しく記述してゆく。

第一の研究目的である、数学基礎論の空間概念と量子基礎論の空間概念の統合(トポス理論的な空間概念と圏論的量子力学的な空間概念の統合)、そしてその帰結としてのアブラムスキー・クックの圏論的量子力学とバーコフ・フォンノイマンの量子論理の融合については、研究代表者がこれまで取り組んできた先述の「圏論的普遍論理」の理論のさらなる展開により達成可能となる。第二の研究

目的である、数学基礎論と量子基礎論を包摂する、非可換双対性の一般理論の構築については、グロタンディークによる近代的空間概念、すなわちスキームの概念を、環という特定の代数の層から任意のモノイドの代数を値とする層へと拡張することで達成可能と考えられる。第三の研究目的である、機械学習における双対性については、カーネル函数を *Chu* 空間と見なして研究代表者の双対性理論を再生核ヒルベルト空間に適用するという方法により達成可能となる。

論理の圏論的理解には、トポスのように「一つの圏」に基づく手法と、先にも述べた *hyperdoctrine* や *fibration* のように「二つの圏」の間の関係に基づく手法がある。トポスのなカルテジアンな構造と圏論的量子力学的なモノイダル構造を共にインスタンスとする、一つの圏の概念はおそらく存在しない(一定の条件下では不可能性定理が事実存在する)。従って、圏論的普遍論理は後者の方向性を論理の意味論のために発展させた枠組み(従来型の *hyperdoctrine* は直観主義論理のためのものだったがそれを任意の論理に適用可能にしたもの)であり、特に命題論理の圏をカルテジアン、型理論の圏をモノイダルとして組み合わせる自由度を含む。まさにこの特性によって、さきにも述べた目的であるところの、アブラムスキー・クックによる圏論的量子力学とバーコフ・フォンノイマンによる量子論理の融合が可能となるのである。

最も基本的な *hyperdoctrine* である *tripos* の場合には、Hyland-Johnstone-Pitts の構成法により、トポスのいわゆる *subobject hyperdoctrine* という構造のみから元のトポスを還元でき、それによりトポスの圏がじつは *tripos* の圏に埋め込めるので、その意味で先述の「圏論的普遍論理」の枠組みはトポス理論を含むものである。こういった方面での関連した課題として、以前の論文で示した述語論理の圏論的意味論の一般的な完全性定理を高階論理まで拡張し、トポス意味論の完全性を単なる一例と化してしまうことと、トポスの層表現を任意の論理のレベルまで拡張することがあるが、これらの結果も第一の研究目的を達成する中で同時に確立可能なものである。このような関連した派生的成果で独立した重要性を有するものが他にも数多く存在するが紙数的制限のためここでは割愛する。

圏論的論理の手法はその黎明期にローヴェアやランベックらにより整備された後、理論計算機科学における(論理や計算の)圏論的意味論の伝統の中で育まれてきた。その典型例が線型論理のモノイダル圏による意味論である。そうした研究の蓄積が、ジョヤルやストリートらの純数学的なモノイダル

ル圏研究と融合して、最終的にアブラムスキーとクックによる圏論的量子力学の構築に繋がった。圏論的量子力学は、パーコフ・フォンノイマンの量子論理を超える、新しい圏論的な量子論理として主張され、実際、エンタングルメントなどの従来の量子論理では表現できない重要な性質を捉えることに成功している。圏の計算を絵で行うグラフィカルな計算系も備える。その背景には、圏を一種の Information Flow(情報流)の構造と捉える概念的見地があり、近年発達著しい Information Physics (情報物理学) という、情報概念を基礎に物理を再編成する大きな潮流がある。圏論的量子力学も一種の情報物理学の理論と考えられる。

一方で、量子論的対称性などは現在の圏論的量子力学の枠組みではうまく捉えられないことが知られている。これは簡単に言えば、圏論的量子力学の基本構造が有界線型作用素を射とするヒルベルト空間の圏の抽象化であり、それ故ウィグナーが強調したような反ユニタリ作用素で表現されるような対称性が排除されてしまうことに伴って生じる困難である。上手な圏論的構成によって反ユニタリを含められるようにできる可能性はあるが創始者によるこれまでの試みは残念ながら全て失敗してきた。一方でパーコフとノイマンの古典的な量子論理では対称性は量子論理の自己同型ときっちり対応することが分かっている。勿論反ユニタリの排除の問題は生じない。このように両者には一長一短があるのである。

従って、十全な量子基礎論の構築のためにはパーコフ・フォンノイマンの量子論理とアブラムスキー・クックの圏論的量子力学を組み合わせるのが理想的と考えられる。まさにそれが先述した「圏論的普遍論理」の考えの量子論理の文脈における適用に他ならない。概念的に言えば、量子論理を量子系に関する命題の論理、圏論的量子力学を量子系たちのなす型理論と見なして、所謂“(quantum) logic over (quantum) type theory”を構築しそれにより両者を統合するのである。ここでは基礎圏におけるテンソル積の構造が命題の圏の間のテンソル積の構造に反映される仕方を論理的に公理化することが重要なステップとなる。これは量子の文脈を離れれば、アクゼルによる所謂“logic-enriched type theory”の考えとも近いものでホモトピー型理論の文脈でも近年一定の役割を果たしている。先行研究と比較すれば、存在量子化と全称量子化をともに持つ量子論理の体系は未だ構築されていないが、本研究はそこまで十分視野に入れられる射程を持っている。

次に非可換双対性の理論について述べる。論理における非可換性は部分構造論理にお

いて現れる。しかし単に通常の意味での非可換性に注目するのではなく、構造規則の不在というものを非可換性の一般化と捉える。それは部分構造的(例えば非可換的)な代数内部の構造的(例えば可換的)な「コア」のスペクトラムをとって層を適切に入れてスキーム的構造を構成することにより元の代数を双対化するというアイデアで非可換双対性(正確には部分構造双対性)の理論を構築するからである。枠組みとしては研究代表者の以前の論文の理論のように圏論と普遍代数の言語を組み合わせる。このような仕方では、環や作用素代数に対する非可換双対性と、様々な種類の部分構造論理に対する非可換双対性を統一的に扱える双対性理論が構築できる。両者の中間に位置する構造として quantale があるがそれらに対する双対性や、そのほか、論理に対するスキーム的双対性のほとんどは一般論とは独立した新しい結果になると考えられる。

最後に機械学習における圏論的双対性について述べる。研究代表者は以前に出版した論文において Chu 空間という抽象概念に基づく双対性理論を構築したが、じつはカーネル関数もまた Chu 空間と見なすことができそれによりカーネル関数の圏が定義される。このようにして得られたカーネル関数の圏と、もう一方の再生核ヒルベルト空間の圏の間には、以前の論文で構築した双対性理論を適用することで、カーネル関数の「真理値対象」を所謂「ヤヌス対象」とする双対随伴が存在することが分かる。さらに空間の内積による両者の対応を利用した仕方でも別の双対随伴が得られる。これらの圏論的随伴が圏同値になる部分の特徴付けることがキーとなる。

研究方法の概要は以上の通りである。

4. 研究成果

引き続き上で述べた三つの研究目的と対応する形で本研究の成果を以下に纏める。

まず本プロジェクトのタイトルである「数学基礎論と量子基礎論の圏論的統合と機械学習における圏論的双対性へのその応用」は三つの研究目的と対応したものであることを指摘しておきたい。というのは「数学基礎論と量子基礎論の圏論的統合」には二つの意味があるからである。一つにはそれは「数学基礎論的な空間概念と量子基礎論的な空間概念の統合」であるがもう一つの意味は「数学基礎論的な双対性と量子基礎論的な双対性の統合」である。そしてまた最初の統合は伝統的量子論理と圏論的量子力学のローヴェアの hyperdoctrine 的な統合を含んだものであることも併せて注意しておきたい。

そして本研究の主要な成果はまさにこれらの実現と考えられるものであり以下により詳しく纏める：

・本研究では研究代表者の「圏論的普遍論理」の理論に基づくトポス（数学基礎論の空間概念）とダガー・コンパクト圏（量子基礎論の空間概念；特に圏論的量子力学の基礎概念）の統合、それによるバーコフ・フォンノイマンの量子論理とアブラムスキー・クックの圏論的量子力学の統合を提案した。数学的には命題論理に対する完全性定理があれば、その一階論理的な拡張と高階論理的な拡張の両方に対して一般化された hyperdoctrine と tripos の概念を用いて完全性定理が得られること(Completeness Lifting)を示した。特にそれは所謂フル・ランベック計算上の任意の部分構造論理（古典論理、直観主義論理、ファジー論理、関連論理、線型論理）に対しても量子論理や様相論理に対しても同様に成り立つことを示した。これは特に高階直観主義論理のトポス完全性の直接的な拡張となっておりそういった圏論的論理のトポスのメカニズムが実は直観主義論理のような特定の論理体系には依存しないものであるという重要な洞察を与えるものである。量子論との関連においては論理部分と型理論部分を分離することにより圏論的量子力学のようなモノイダルな型理論を含む形で理論構築されている点も肝要である。またゲーデル翻訳やジラルール翻訳の構造を hyperdoctrine に対するローヴェア・ティアニー位相の利用により抽象化して非常に一般的なレベルで「普遍翻訳定理」を証明した。他にも様々な成果があるがここでは割愛する。

・非可換双対性の一般理論においてはグロタンディーク位相などの道具立てを用いることで Grothendieck situation と呼ばれるスキーム的ないし層論的な双対性が導かれるための一般概念を定式化し、いつ Grothendieck situation が生まれるか、その便利な十分条件を(特に structural core の概念を用いて)与える理論を構築した。それにより環や作用素代数に対する量子論的な双対性と、部分構造論理に対する論理的な双対性が統合されるような一般理論が完成した。この理論は既存の多くの双対性を含むと同時にすでに上で示唆されたように未知の双対性も数多く含むものであることが分かった(例えば quantale に対するスキーム的双対性は前例のない新規な結果である；それだけではなく可換な frame のレベルでも structural core の一般概念を通じて新たな双対性が示された)。これが意味するのは、スキーム論的な枠組みは単に代数幾何において有用であるだけでなく数学基礎論や論理学の文脈において有効な道具となるということである。スキームによる双対性のメカニズムは環論的な構造に依存したもので

なく論理などに対しても同様に適用可能なものであり、スキーム的双対性の射程はグロタンディーク的な代数幾何よりもずっと広い、特に量子や論理を問わない様々な非可換性の領域を含んだものなのである。

・機械学習のカーネル法における圏論的双対性については圏同値ではない双対随伴と圏同値である双対随伴の二種類の双対性が得られた。これら二種類の双対性は射の概念の選び方に依存している。代数構造や論理構造に対する双対性を考えるときにプライム・スペクトラムを取るかマキシマル・スペクトラムを取るかで射の概念が分岐して二種類の双対性が得られるというのと同種の現象である。一見不思議に見えるかもしれないが双対性理論的には十分にあり得る現象である。ただこのような双対性の分岐現象は一般にはあまりよく理解されてこなかったものでこれまでとは全く異なる文脈でも同種の現象が存在することが分かったのはある種意外なことでもある。こういった双対性理論的な見地から言えば所謂「カーネル・トリック」は二つの異なる世界(或は世界像)の間を双対性を通じて行き来することにより成立しているのである。機械学習の研究ではアルゴリズムの実践的な「効率性」だけが求められて、なぜそれが上手くいくか、そもそも偶然に上手く行っているだけではないと何故言えるのか、という「理解」や「解釈」の部分が見過ごされやすい為、理論的な見地から機械学習において何が起きているのか説明できるようになる意義は大きい。本研究は純粋に理論的なものであり効率性の向上それ自体を目的としたものではないが、今後さらなる研究を通じて効率性へと理論的理解を還元してゆければより意義深いと思われる。

これらのスピンオフとして得られた成果も多い。紙数の都合上一つの方向性だけを付言すれば、証明論的ハーモニーからカーリー・ワード対応を導く一般理論や、それを用いたパラドクスの分析が圏論的量子力学の圏構造と関連していること(圏論的量子力学の圏構造が論理的にはある意味で矛盾したものであることは知られていたがそれが数学的に厳密にパラドクスの構造解析を与えると分かったこと)などは、本研究の開始時点には全く予期しないものであったが、本プロジェクトが眼目とした「数学基礎論と量子基礎論のインタープレイ」をさらに促進する端緒となる重要な洞察となるものと思われる。

これら成果は代表者による最近の研究においてさらに新たな展開へと繋がっており今後さらなる深化が期待される。それは本プロジェクトが単なる単発プロジェクトではなく代表者が自身の研究キャリアを通じて追求してきた一貫した概念的視座の下に系統的に展開された研究プログラムの一部であ

ることの証左であると言っても良いだろう。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

Y. Maruyama, Prior's Tonk, Notions of Logic, and Levels of Inconsistency: Vindicating the Pluralistic Unity of Science in the Light of Categorical Logical Positivism, *Synthese*, vol.193, pp.3483-3495, Springer, 2016 (refereed). DOI: 10.1007/s11229-015-0932-9 <https://link.springer.com/article/10.1007/s11229-015-0932-9>

Y. Maruyama, Categorical Harmony and Paradoxes in Proof-Theoretic Semantics, *Advances in Proof-Theoretic Semantics*, Trends in Logic, vol.43, pp.95-114, Springer, 2016 (refereed). DOI: 10.1007/978-3-319-22686-6_6 https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-22686-6_6

Y. Maruyama, AI, Quantum Information, and External Semantic Realism: Searle's Observer-Relativity and Chinese Room, Revisited, *Fundamental Issues in Artificial Intelligence*, Synthese Library, vol.376, pp.115-127, Springer, 2016 (refereed). DOI: 10.1007/978-3-319-26485-1_8 https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-26485-1_8

Y. Maruyama, The Dynamics of Duality, *RIMS Kokyuroku on Mathematical Logic and its Applications*, RIMS, Kyoto University, forthcoming in 2017 (unrefereed).

〔学会発表〕(計7件;全15件の中から抜粋)

Y. Maruyama, Category Theory and Lightweight Ontology, *Oxford OASIS Seminar*, University of Oxford, UK, 20 January 2017 (invited).

Y. Maruyama, Machine and Causality, *Oxford Quantum Foundations Discussion*, University of Oxford, UK, 3 February 2017 (invited).

Y. Maruyama, Categorical Foundations of Big Data Analytics, *International Conference on Category Theory*, Dalhousie University, Canada, 9 August 2016.

Y. Maruyama, Harmony, the Curry-Howard Correspondence, and Higher Proof Theory, *JSPS Core-to-Core Workshop on Mathematical Logic and its Applications*, Kyoto University, Japan, 17 September 2016.

Y. Maruyama, Dynamics of Duality: How Duality Emerges, Changes, and Breaks, *RIMS Workshop on Mathematical Logic and its Applications*, Kyoto, Japan, 27 September 2016.

Y. Maruyama, Duality and Monoidal Structures on Sambin's Basic Pairs, *International Workshop on Formal Topology*, Institut Mittag-Leffler, Sweden, 9 June 2015.

Y. Maruyama, Higher-Order Categorical Substructural Logics, *International Conference on Category Theory*, University of Aveiro, Portugal, 18 June 2015.

〔図書〕(計2件)

Y. Maruyama, *Meaning and Duality: From Categorical Logic to Quantum Physics*, D.Phil. Thesis, Mathematical, Physical, and Life Sciences Division, University of Oxford, 296 pages, 2017.

丸山善宏, 『圏論の哲学』, NTT 出版、約 200 ページ、2017 年出版予定(出版受理済み)。

蓮尾一郎, 丸山善宏 et al., 『圏論の歩き方』, 日本評論社、約 304 ページ(二つの章を執筆)、2015 年。

〔その他〕

Webpage: <http://researchmap.jp/yamaruyama>

一般向けシンポジウムやNHKのテレビ番組への出演等により、本プロジェクトがその重要な一部である所の「圏論的統一科学」に関するアウトリーチ活動も活発に行ってきた。哲学の学会でも複数回講演するなど他分野における数理科学の正しい理解と数理哲学的な学際知の展開にも努めてきた。『数学セミナー』に圏論の記事を寄稿したこともあるが、同時に『ユリイカ』など人文系の一般向け雑誌にも数理哲学の立場から寄稿してきた。

6 . 研究組織

(1)研究代表者

丸山 善宏 (MARUYAMA, Yoshihiro)
京都大学・白眉センター・助教
研究者番号: 20761290