

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 9 月 30 日現在

機関番号：34304

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24320008

研究課題名(和文) 計算の哲学 様々な展開に向けて

研究課題名(英文) Philosophy of Computation: Towards Various Developements

研究代表者

三好 博之 (MIYOSHI, Hiroyuki)

京都産業大学・理学部・教授

研究者番号：60286135

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、「計算の哲学」プロジェクトの展開として、様々な分野とのつながりを追求することを目的としたが、中でも物理学に関わる部分について成果を上げた。小澤、中原、小嶋、細谷による物理学に直接つながる内容については大きな成果をあげた。特に小澤の量子集合論、中原の量子計算、細谷の弱値、小嶋の双対性といった部分が深い関わりがあることがわかった。また論理においては、三好の圏論的量子論理の考察は細谷の弱値とのつながりが深いことがわかり、また新たにホモトピー型理論の有効性を見出した。郡司は生物現象において、矢田部は矛盾許容論理において、檜垣はフランス哲学や日本哲学において、本プロジェクトとの関連を深めた。

研究成果の概要(英文)：As a part of the "Philosophy of Computation" project, we concentrate various connections to other areas: physics, logic, mathematics, biology, music, etc. Among them, we found remarkable relation to quantum physics mainly by Ozawa, Nakahara, Ojima, Hosoya, Miyoshi. Such topics we picked up in this project are quantum set theory, quantum computing, weak values, and categorical quantum logic. On logical and Mathematical research, we investigated several non-standard logics and foundation of mathematics by Yatabe and Miyoshi. Higaki thought of and wrote about the relation to French and Japanese philosophy. More ambitiously we collaborated with a modern classical music composer Mr. Masakazu Natuda. This direction is still on the initial stage.

研究分野：数理論理学，理論コンピュータ科学，圏論，計算の哲学

キーワード：計算の哲学 量子論 論理学 圏論 音楽の哲学

1. 研究開始当初の背景

「計算の哲学」プロジェクトでは、過去2度にわたって採択された科研費の研究において次のような分野にわたって幅広い研究を行ってきた。

- (1) 分野0. 計算の形而上学:現象としての計算の存在論と認識論,
- (2) 分野1. 分析哲学・科学哲学への広がり: 計算と論理, 計算と情報, 現実とシミュレーション, 論理学・数学の哲学, 物理学の哲学, 心の哲学, 人工知能・人工生命の哲学
- (3) 分野2. 超越性への広がり: 時間論, スピノザ, ヒューム, ベルクソン, 西田, 精神医学, 現象学
- (4) 分野3. 歴史・社会からのアプローチ: 計算概念の発展史, 情報の社会学,

それまでの「計算の哲学」プロジェクトにおいて、分野0 についてある程度の成果が上がっているが、その次に問題として現れてきたのは、どのようにそれを「理解」してもらうかということである。他者への完全なる理解の伝達は(少なくとも広義の言語では)不可能であることは、それ自体が分野0 の成果に含まれている。しかし不完全な形では可能であることもまた示されており、次に問題となるのはそのチャンネルとしての様々な表現の可能性をどのように広げていくかということであった。

2. 研究の目的

本研究ではこれまでに「計算の哲学」プロジェクトにおいて展開されてきた「計算」に関係する様々な分野とのつながりについての研究のうち、主に、物理学、数学、理論コンピュータ科学の研究とのつながり、及び生命・音楽に関わる諸分野とのつながりについて重点的に研究を行う。

計算の哲学の基盤部分についてはこれまでの研究においてある程度の成果を上げてきたが、それにつれてその「理解」を促す手段をどのようにとればよいかの問題として浮かび上がってきた。よって次の段階として、比較的これまでの成果と相性の良い具体的な他分野と共同で研究を行い、その「表現」について様々な試みを行う。具体的には哲学研究者だけで閉じるのではなく、各分野の専門家との本格的な共同研究を行い、直接的な事例を構築するのが目的である。

今回は主に分野1,2 について、他分野のアクティビティとの接続をより具体化することを念頭において研究を進める計画である(ただしその他の分野との接続についての研究を排除するものではない)。

3. 研究の方法

研究計画・方法については、本研究は音楽関係を除き理論的研究が多くを占めるため、研究方法については、研究者間での議論、過去

も含めた他の研究成果の調査、本研究参加者自身による研究発表、論文執筆・投稿といった、通常の哲学、物理学、数学、コンピュータ科学、などで行われている方法を踏襲した。具体的には、本研究の研究組織は研究者が分散しているため、通常はインターネットを通じて情報交換や議論を行ない、年に1回以上は各研究者と直接顔を合わせて議論を行う予定である。また研究成果の発表については、本研究のような内容に精通している研究者は国内には申請時の研究計画調書に記載した研究者以外にはそれほど多くなく、関係する多くの研究者は海外の様々な研究機関に在籍しているため、海外での研究・調査・発表も積極的に行った。論文投稿については適切な学術誌を選択して行った。音楽関係については個々の作業以外に現代音楽の作曲家と共同でワークショップを行った。

4. 研究成果

(1) 平成24年度の研究成果:

小澤正直はハイゼンベルク不確定性原理の破れおよび小澤の不等式の成立を工学的偏光測定で観測するための理論を構築した。

戸田山は自然計算するシステムの物質レベルからの進化の帰結として科学の発展を促えるためのリサーチプログラム(「科学の科学」)の青写真を、カントが純粋理性批判で行った議論を、自然化・歴史化・社会化することで構想した。

中原は研究協力者のYidun Wan 博士および大学院生と量子系の時間発展の元で不変に保たれる「力学的不変量」を利用して、断熱時間発展を越える量子制御の研究を行った。特に今年度は4準位系の制御をLie代数 $su(4)$ を使って分類した。

小嶋は、複数の「慣性系 = 参照基準系」を一度に導入し、その相互関係を統制することで、対象系のintrinsicな性質を統制することによって、局所ゲージ不変性や繰り込み、熱力学的性質の本質に迫れることを見出した。

檜垣は、今年度は自分に関わりのあるフランス現代思想、身体論、認識論という観点や、そこでの偶然性や現実性という様相に関わる部分から、当該科研に関連する研究を行った。

郡司は動的な双対性と思弁的実在論の関係を構想し、研究発表を行った。

三好はAbramsky-Coeckeの量子論の圏論的な定式化とJacobsの圏論的量子論理との関係について小澤の測定理論を組み込むことを念頭に計算論的観点から研究を行った。

矢田部は矛盾許容論理の計算的な性質について研究を行った。

また研究協力者の細谷は弱値の数学的定式化を整備した。

(2) 平成 25 年度の研究成果：

小澤はハイゼンベルク不確定性原理の破れおよび小澤の不等式の成立についての理論に対する異論に反証し、また量子集合論による定式化の考察を発展させた。

戸田山は自然化を押し進めることより哲学の全体像を見直す著書を上梓した。

中原は、ノイズの影響下での高精度の労使ゲートの実装、すべての量子ビットが同じエラーを受けるときの量子誤り訂正、および非断熱量子制御の研究を行ったが、再帰的に量子回路が構成できる符号化の両方を研究した。また、非断熱量子制御では、力学的位相を完全に消去し、幾何学的位相 (Aharonov-Anandan 位相) のみで量子ゲートを構成した。

小嶋は、複数の参照基準系での現象記述から一意的帰結を抽出する機構が周知の「相対性」だが、時間発展と対称性変換の重複等に由来する動力学指定の不定性の扱いには、これと双対な関係に立つ「動的相対性」が必要であることを見出した。

檜垣は、ドゥルーズを中心とするフランス現代思想、身体論、認識論および、そこでの偶然性や現実性という様相に関わる部分から研究を行った。

郡司は動的な双対性と思弁的実在性の関係を構想し、研究発表を行った。

三好は研究協力者の細谷のアイデアを元に弱値の圏論的考察を行った。またホモトピー型理論に基づく数学の基礎についてのこのプロジェクトの観点からの考察を行った。

矢田部は、非古典的な真理概念について循環性の見地から研究を行った。構成主義的な素朴集合論で真理述語を定義可能であり、それを使用し縮約規則がある程度シミュレートできることを示した。また、その結果と関連し、自然数の集合についての結果をまとめ、論文として出版した。また、非標準的な真理理論を研究し、循環性により似た非確定性現象が起こることを示した。

(3) 平成 26 年度の研究成果：

小澤は量子集合論によって量子力学の確率解釈を系統的に拡張する方法を明らかにした。それにより量子力学の観測命題のなす言語が射影値真理集合および成立確率を変えずに量子集合論の言語に埋め込むことを示した。また、その埋め込みにより、ボルンの公式が量子論から視線に導かれること、及び 2 つの量子物理量の値が一致する確率が一般的に定義することを示した。

中原は、Noiseless Subsystem/Decoherence Free Subspace の研究を行った。また、エラーの存在下で正確なゲート操作を実現する Composite Pulse の研究を行った。小嶋は、非対称等質空有感を対称空間にするには「対称完備化」が必要であるが、その解明に成功した。この意味で圏論的量子論は、局所ゲージ不変性が自然に備わっていることが明らかになった。

三好は総報告正の情報変換の、形式的モデルについて CSCAT2015 において講演した。

戸田山は「計算可能な関数」という概念を題材に、数学の実験哲学が可能だとしたらどのようなものでありうるかを考察し、実験哲学が哲学的概念分析の理念に対して持つ正負のインパクトとされるものが、哲学とはいかなる営みかということについての誤解のもとに成り立っているかを明らかにした。

矢田部は、H25 年度の結果を応用し、古典的な真理理論を循環正の見地から分析を行い、証明論的意味論の立場を余帰納法の考え方で拡張することで、真理概念を論理結合子と見なせることを示した。

郡司はトークンとタイプの一般的立場の一般的概念としてモノとコトを構想し、その両者の間の動的インタフェースとして形成される意識や全体性について認知や群れ形成を題材にモデル化やデータ解析を進めた。思弁的実在論との関係も明らかにした。

檜垣はドゥルーズ哲学の検討を通じて生物学と哲学及び計算の科学についての検討を継続しており海外研究発表や外国語での論文投稿などを行った。

(4) 平成 27 年度の成果：

小澤は、量子論理では、含意の選択に任意性があり、佐々木含意、対偶的佐々木含意、相關論理的含意の 3 種が適切な候補とされている。本研究では、それぞれの含意に基づく量子集合論を展開し、量子集合論内の実数の全体は一致するが、その順序関係がそれぞれの含意によって異なることをその操作的解釈とともに明らかにした。

中原は,2015年度は非断熱量子制御の研究を主に行った。Demirplak, Rice, Berry らによって開発された非断熱量子制御の方法を冷却原子のスピン制御に用いて,渦のトポロジカル生成における原子数の減少を抑制した。しかし量子計算への応用はまだ見いだせない。また,球面 t デザインを専門とする代数学者と,スピンの Majorana 表示の研究をはじめ,今後その一般の $su(n)$ への拡張を模索している。幾何学者と Finsler 幾何学の量子制御への応用に関して共同研究を始めた。

三好は新しい数学の基礎として期待される Homotopy Type Theory (HoTT) / Univalent Foundation of Mathematics (UniMath) がコンピュータ科学でも有効であることを認識し,パッチ理論に引き続いて,複雑な双方向コミュニケーションの記述に適用する研究を行っている。また,弱高次元圏論における Batanin の定義と Leinster の定義の微妙な違いを明確化することについて一定の寄与を示した (CT2016 で講演予定)。

郡司は,内包と外延の双対性に外部が潜在するという形式で,観測が潜在する物理過程を構想し,これをもとに生物の群れや行動,認知過程の実験やモデル化を行った。またこのようなアプローチが,自然主義的二元論を乗り越える,汎心論でもない,中立一元論として展開されることにおいて,意識の科学という疑似問題が解決される道筋を示した。

檜垣はドゥルーズ哲学の国際学会を主催し,生物学の哲学および計算の科学についての検討を継続しており,海外研究発表や外国語での論文投稿なども精力的に行った。

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86件)

1. Tomaru, T., Murakami, H., Niizato, T., Nishiyama, Y., Sonoda, K., Moriyama, T., and Yukio-Gunji, YP., Information transfer in a swarm of soldier crabs, *Artif Life Robotics*, 査読有, 21, 2016, 177-180
DOI: 10.1007/s10015-016-0272-y.

2. 檜垣立哉, アンチ・ナルシスの射程 ヴィヴェイロス・デ・カストロ『食人の形而上学』に寄せて, 現代思想 (青土社), 査読有, 114-5, 2016, 210

3. Masanao Ozawa, Quantum Set Theory Extending the Standard Probabilistic Interpretation of Quantum Theory, *New Generation Computing*, 査読有, 34, 2015,

125-152

DOI: 10.1007/s00354_016_0205_2

4. 檜垣立哉, ドゥルーズ歿後二〇年の <世界の現在>, 『ドゥルーズ 歿後 20 年 新たな展開』(河出書房新社), 査読無, 2015, 25-33

5. I.Ojima, K.Okumura and H.Saigo, Derivation of Born Rule from algebraic and statistical axioms, *Open Systems and Information Dynamics*, 査読有, 21, 2014, 1450005-1450018

6. Masanao Ozawa, Quantum Set Theory Extending the Standard Probabilistic Interpretation of Quantum Theory (Extended Abstract), *Electronic Proceedings in Theoretical Computer (EPTCS)*, 査読有, 172, 2014, 15-26
DOI: 10.4204/EPTCS.172.2

7. Jori T, Yamachiyo M, Shirakara T & Gunji YP, Kaniza illusory contours appearing in the plasmodium pattern of *Physarum polycephalum*, *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 査読有, 2014
DOI: 10.3389/fcimb.2014.00010

8. H.Ando, I.Ojima, H.Saigo, Notes on the Krupa-Zawisza Ultrapower of self-Adjoint Operators, *Probability and Mathematical Statistics*, 有, 34, 2014

9. Shunsuke Yatabe, On the crispness of omega and arithmetic with a bisimulation in a constructive naïve set theory, *Logic Journal of the IGPL*, 査読有, NA, 2013
DOI: 10.1093/jigpal/jzt045

[学会発表](計67件)

1. Mikio Nakahara, Decoherence Free Subspace, Noiseless Subsystem and Group Representation, Workshop on Mathematical Aspects of Quantum Information Science (国際会議)(招待講演), 2015年7月13日~7月17日, 精華大学国際数学研究所(中国)

2. Tatsuya Higaki, Deleuze and Technology, Deleuze Studies in Asia Conference, India (招待講演)(国際学会), 2015年6月5日~6月7日, Mnipal University, India

3. 三好博之, ディレクトリ構造を扱うパッチ理論の圏論的モデル, CSCAT2015, 2015年3月14日~3月15日, 鹿児島県大学都元キャンパス(鹿児島県・鹿児島市)

4. Izumi Ojima, Local gauge invariance, and Maxwell Equation in Categorical QFT, QBIC

Workshop 2014 (招待講演), 2014年10月25日, 東京理科大学野田キャンパス(千葉県・野田市)

5. Izumi Ojima, Holonomy as Geometric Template in Physical Emergence of Macro Objects, 16th Workshop: Non-Commutative Harmonic Analysis (招待講演), 2014年7月12日, Banach Center, Bedlewo, Poland

6. Shunsuke Yatabe, Truth, omega-inconsistency and Harmony, Tokyo Forum of Analytic Philosophy, 2014年6月13日, 東京大学本郷キャンパス(東京都・文京区)

7. 三好博之, 数学のユニヴァレントな基礎付けについて - 数学と計算の観点から -, 日本科学哲学会 2013年度会, 2013年11月23日~11月24日, 法政大学市ヶ谷キャンパス(東京都・千代田)

8. Hiroyuki Miyoshi, Weak values as contextual values, categorically, Category Theory 2013 (CT2013), 2013年7月7日~7月13日, Macquarie University, Sydney, Australia

9. 戸田山和久, 哲学的自然主義の展開としての「科学の科学」, 自然科学研究機構 NINS Colloquium (招待講演), 2013年2月5日, ザ・プリンス・箱根(神奈川県・足柄下郡)

10. Kazuhiisa Todayama, How to Launch the "Science of Science": A Blueprint for Radically Naturalized Philosophy of Science, First Conference on Contemporary Philosophy in East Asia (招待講演 (Keynote)), 2012年9月8日, Academia Sinica, Taipei, 中国 +3000

〔図書〕(計17件)

1. 檜垣立哉, 郡司ペギオ幸夫, 田中久美子, 吉田茂生, 中尾央, 河野憲二, 岡部佳世, 黒田未寿, 足立薫, 西井涼子, 春日直樹, 青木滋之, 久保明教, 平理一郎, 中村恭子, 近藤和敬, (春日直樹編), 東京大学出版会, 『科学と文化をつなぐ アナロジーという思考様式』(第二章執筆), 2016, 337 (39-58)

2. 檜垣立哉, 人文書院, 『日本哲学言論序説』, 2015, 282

3. Tatsuya Higaki, Encre Marine, Corinne Enaudeau et Frederic Fruteau de Lacos, Difference, differend: Deleuze et Lyotard, Vistage, affective et figure の章を執筆, 2015, 18 (145-162)

4. 戸田山和之, 名古屋大学出版会, 科学的事実論を擁護する, 2015, 356

5. Tatsuya Higaki, Cambridge Scholars Publishing, Bogue, Chiu, Lee, Deleuze and Asia, Cap3 の執筆, 2014, 25 (48-72)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三好 博之 (MIYOSHI, Hiroyuki)
京都産業大学・理学部・教授
研究者番号: 60286135

(2) 研究分担者

小澤 正直 (OZAWA, Masanao)
名古屋大学・情報科学研究科・教授
研究者番号: 40126313

戸田山 和久 (TODAYAMA, Kazuhisa)
名古屋大学・情報科学研究科・教授
研究者番号: 90217513

中原 幹夫 (NAKAHARA, Mikio)
近畿大学・理工学部・教授
研究者番号: 90189019

郡司 幸夫 (GUNJI, Yukio)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 40192570

檜垣 立哉 (HIGAKI, Tatsuya)
大阪大学・人間科学研究科・教授
研究者番号: 70242071

矢田部 俊介 (YATABE, Shunsuke)
京都大学・文学研究科・講師
研究者番号: 70379337

(3) 研究協力者

小嶋 泉 (OJIMA, Izumi)
(平成24年度 - 平成26年度 研究分担者、平成27年度 研究協力者へ変更)

細谷 暁夫 (HOSOYA, Akio)
東京工業大学名誉教授
(主に物理学および物理学の哲学について共同研究を行った)

Yidun Wan (YIDUN, Wan)
Perimeter Institute of Theoretical Physics
(量子計算について共同研究を行った)

村上 裕子 (MURAKAMI, Yuko)
東北大学国際交流室准教授
(主に論理学および音楽の哲学について共同研究を行った)

夏田 昌和 (NATSUDA, Masakazu)

作曲家
(音楽の哲学について共同研究を行った)

塩谷 賢 (SHIOTANI, Ken)

哲学者
(主に科学哲学について共同研究を行った)