

研究終了報告書

「生命と認知の量子情報理論：圏論的定式化とその応用」

研究期間：2017年10月～2021年3月

研究者：丸山 善宏

1. 研究のねらい

自然科学が、モノの本性、物質の働きとその原理を解明してきた一方で、ココロの本性、理解・認識・感情の成り立ちとその原理は現在でも多くが根源的な謎に包まれたままであり、サイエンスの広大なフロンティアとなっている。かつて地理上のフロンティアに様々な開拓者が流れ込んだように、心という知のフロンティアでは、心理学などの経験科学、情報学や人工知能などの数理科学、そして哲学などの人文学に至るまで、様々な学問が文理のバウンダリを越境し、心という謎の解明に挑戦している。この学際科学は一般に認知科学と呼ばれ、本研究は特に認知科学への量子力学・量子情報的アプローチを問題とするものである。

量子力学を認知科学に応用する試みは、ペンローズ卿による量子脳理論などに始まるが、ペンローズは、脳の中のマイクロチューブルにおける量子効果を用いて意識の理論を構築したものの、テグマークらのデコヒーレンスレートの計算により物質的な脳の中の量子効果は否定された。量子認知科学は、ペンローズのアプローチとは異なり、量子力学の数学的モデルを認知科学における奇妙な実験結果の説明などに応用するものであるが、近年の急速に活発化した国際的研究動向の一方で、個別の実験結果のアドホックなモデル化研究が多いこともあり、未だ量子認知科学の理論的基盤は不明瞭なままである。また、Bell 定理や Kochen-Specker 定理のような No-Go 定理により示される、量子物理学における非局所性や文脈性依存性に該当する、認知科学における量子現象とされるものが、結局のところ認知の本性に対していかなる含意を持つものなのか、という点もまた詳細な議論がなされることなく、不明瞭なものとなっている。さらに、言語認知は様々な認知機能の中で人間の認知を特徴付ける肝要なものであるが、言語における文脈依存性やそれに基づく量子言語学についても同様の問題が存在している。

本研究の狙いは、こういった問題を、最も純粋な構造主義理論である圏論という抽象理論に基づく考えを方法論的基盤として、解決する事である。それにより、「知の断片化」という科学社会における分断状況を超克し、遍く種類の知を（人間がその一部である所の）この一つの宇宙の理解の為に有機的に統合する「圏論的統一科学」に向かって歩を進める事である。そしてそれにより、「知の断片化」が極限まで進行してしまった結果発生する壊滅的リスクを低減する事である。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究の成果は、15 編以上の単著論文として纏められ出版ないし出版受理されている（さらに投稿中のものが数編あり、また一般向けの雑誌にも数編の論考と概説を寄稿してきた）が、それらのうち特に基本的な幾つかのものの概要は以下のように纏められる。

まず量子認知科学が、正確に言って、量子と認知の何を関連付けているのか、という問題に対して、物質的量子効果に相対するものとして構造的量子効果というものを提唱し、ペンローズらの物質的量子マインド仮説と呼び得る考えに対して、構造的量子マインド仮説というものを提案した。これは圏論という抽象数学の構造主義的な見地を量子認知科学の文脈に適用した仮説である。

次に、近年急速に研究が進んでいる認知科学における文脈依存性の量子現象とされるものが結局のところ認知科学としてどのような含意を持つものであり、それが物理学における文脈依存性の量子現象とどこまで同じ種類のものと言えるのか、本研究を通じて明らかになった。両者は共にベル型不等式を破るという点においては相違のないものである(ただ同時に認知科学における相関の強さは量子相関を原理的には超え得るためベル型不等式がより強く破れ得ることが本研究の中で明らかになった)。しかしベル型不等式を破る統計的相関を生み出している機構が本質的に異なることが分かった。即ち、物理では単一の純粋状態が文脈依存性を生み出せるのに対して、認知では(テグマークらの結果が正しいとする限り)それは不可能であり、文脈依存性が生じるのは不確定な認知状態の集団的ダイナミクスのみにおいてであることが分かった。これは量子認知科学を主要な生業とする研究者にとってはネガティブな結果であるが、認知の構造的量子性の本性に関わる原理的な成果であると考えられる。

更に、人間の認知が従う論理は、モノイダル圏に基づく部分構造論理と相同的なものであり得ることがあることが分かった。これは量子の圏論的な論理構造が(圏論的量子力学において示されたように)部分構造論理であるのと平行なものであり、量子の論理と認知の論理の相同性を示すものである。さらに言えば、これはモノの世界とココロの世界を共に支配する圏論的メタ法則の存在を示し、モノの法則とココロの法則の邂逅を可能にするものであり、従って、両者を長らく分かってきたデカルト的二元論に対するアンチテーゼとして機能する。

(2) 詳細

研究テーマ A:「物質的量子効果と構造的量子効果」

本研究テーマでは、先にすでに述べたように、物質的量子効果に相対するものとして構造的量子効果を提唱し、ペンローズらの物質的量子マインド仮説を構造的量子マインド仮説で置き換えた。このような構造主義的な見地により諸科学と数理・物理モデルの関係性を捉える方法は、認知科学以外の他の領域にもおいても有用であり、例えば経済学などにおける数理・物理モデルにも同様の見方が適用可能である。このような理解は、量子認知科学がそもそも如何なる仕方で量子と認知を関連づけるのか明らかにするものであり、量子認知科学の理論的基盤として原理的に重要なものであると考えられる。

研究テーマ B:「量子物理学と量子認知科学における文脈依存性の本性とその相違」

本研究テーマについては先に詳しく述べたが、ここではその意義についてもう少し補足する。量子物理学におけるベル型の結果は、量子情報理論の基盤をなすものである。例えば、ベル型の結果が示す非局所性やその一般化としての文脈依存性(またその背後にあるベル状態などの概念)は、EPR(アインシュタイン・ポドルスキー・ローゼン)型のパラドクスでも重要であり量子力学の基礎論において根源的な重要性があるが、同時にそれは、量子テレポーテーションプロトコルや様々な量子アルゴリズムにおいて縦横無尽に普遍的に用いられるものであり、応用上のインパクトも甚大なものである(なお量子計算は量子論の哲学的パラドクスを発想の転換により計算のリソースとして利用することで成功したと言われることもある)。先に述べた本研究の成果は、量子認知科学における文脈依存性が理論面と応用面の両方における同様の甚大なインパクトを生み得るのかという問いを考える上できわめて重要なものである。

研究テーマ C:「量子の論理と認知の論理のモノイダル圏論的な相同性」

本研究テーマについても、先にある程度説明したものであるため、ここではその意義についてもう少し補足する。一般に本研究において提案してきた圏論的認知科学(認知科学への圏論的アプローチ)は、「物質としての認知(即ち脳機能)」ではなく、「構造としての認知」に光を当てることを可能にするものである。即ち、構造主義的視座から、モノの法則性とココロの法則性を共に統制する高次のメタ法則性の存在を明らかにするのである。先に述べた本研究テーマにおける成果は、このような圏論的認知科学の重要な一例として捉えられるものである。

注意:

以下の幾つかは、上には記載していない本資料において初出の研究テーマである。それらのテーマは、数学的によりデマンディングなものとなってくるため、上では先に直観的に内容の分かりやすい研究成果を記載してきたが、以下の成果のうちの幾つかは、数学や数理論理学それ自体としても、例えば論文賞の受賞などによって、その価値を認められている重要なものであり、先に述べてきた成果に比してマージナルな成果に過ぎないという意味で、あとから述べているわけでは決してない。むしろ数学的に深い、より専門的価値の高い研究成果である(ただ内容が高度になるためそれぞれの詳細についてはごく簡単に説明するに留める)。

研究テーマ D:「量子の論理と認知の論理を共に支配する部分構造論理の圏論的意味論」

量子の論理も認知の論理もある意味では部分構造論理的なものであることを先に述べたが、本研究テーマでは、それらに対応する論理構造を単なる一例として包摂する、極めて広大な一般の部分構造論理のクラスに対して(数学的なゲーデルの完全性定理の意味で)完全な圏論的意味論が構築可能であることを証明した。ローヴェアとグロタンディークによる最も深遠な圏論であるトポス理論は、直観主義論理に対してしか適用できないが、本研究ではこれを既存のほとんどの種類の論理構造に対して適用可能となるように拡張した(ほとんどの種類

の論理は部分構造論理の公理的拡張として表現できるためこれが可能になる)。直接的な拡張の困難は長く認識されてきたが、本研究ではその困難を、トポスという圏構造をトライポスという特別な反変関手として捉え直すことで乗り越え、ほとんどあらゆる種類の論理に対してトポス理論の類似が得られることを証明した。もちろんこれらは量子物理や認知科学で現れる部分構造論理に対しても適用可能なものであり、広大な応用可能性を有する結果である。

研究テーマ E:「量子無限論理を含む一般ファジィ論理の圏論的意味論と圏論的双対性」

クォンタールと呼ばれる量子無限論理は、ファジィ論理の代数と類似した構造を持っており、ファジィ論理の一般理論は量子的な論理構造を包含している。本研究では、一般ファジィ論理の圏論的意味論の完全性と、ハウスドルフ性やゼロ次元性を必ずしも持たないようなソーパー空間のクラスに対して、それらを双対空間として得られるような圏論的双対性の普遍的な形式を同定した。この普遍的な圏論的双対性はファジィ論理やその他多くの論理に対して適用可能なものであり、広範な応用可能性を持つものであると同時に、圏論的双対性の理論それ自体においてもきわめて基本的な原理的重要性を持つ成果であると考えられる。さらにクォンタールの特別な場合であるロカールの圏論的双対性について、点概念の相対性を利用して新種のスペクトラムの概念を定義することで新たな反変関手を構成し、それによりロカールの、既存のものとは全く異なる、新種の圏論的双対性を証明することに成功した。これは純粋数学の代数幾何への応用をも持つ数学的に有意義な基本定理であると考えられる。

研究テーマ F:「言語における文脈依存性と量子言語学、その人工知能への応用可能性」

人間の認知の中の中心的な要素である言語における文脈依存性に関する研究や、それと形式意味論における合成可能性の関係性の研究、またある意味では言語の文脈依存性に基づく意味論と合成可能性に基づく意味論を圏論的に融合させる、圏論的量子力学に基づく量子言語学とその人工知能への応用、また人間が持つ認知バイアスが人工知能に存在し得るかという問題についても基礎的研究を行った。

研究テーマ G:「統計的意味論と記号的意味論の圏論的融合と圏論的融合 AI パラダイム」

圏論的量子力学に基づく量子言語学は、統計的意味論と記号的意味論の圏論的融合と見做せる。圏論的融合を方法論として整備することで、自然言語処理を超えて、統計的 AI と記号的 AI の圏論的融合による次世代融合 AI パラダイムを構築して行くことができる。その準備研究を行った。さらに他の融合 AI 手法を整理して融合 AI の分類とその特徴づけを行った。

研究テーマ H:「圏論的量子 AI、汎用人工知能の条件、そしてシンギュラリティ問題」

現在の人工知能の主流は基本的に統計的 AI 一辺倒であるが、圏論的量子 AI は、人間理性の基本原則である帰納と演繹を兼ね備えたものであり、最終的に汎用人工知能へと至ってゆ

く可能性がある。しかし、そもそも如何なる条件が満たされたら汎用人工知能と呼び得るのか、全く明らかではない。そこで汎用人工知能の条件を特定する研究を行い、汎用人工知能の条件を定式化した。また、汎用人工知能はシンギュラリティの問題と結びつけて語られることが多いが、シンギュラリティはもともとフォン・ノイマンの思想に起源を持つものであり、そこから派生した様々なバージョンがある。それらについての研究も併せて行った。

研究テーマI:「不完全性定理に基づくペンローズの議論と人工知能におけるフレーム問題」

ペンローズは、ゲーデルの不完全性定理を用いて、人工知能の不可能性を論じた。そこには様々な問題が指摘されてきたが、ペンローズの議論の本質的な骨子を見てみると、フレーム問題との類似性が明らかになってきた。これを足がかりとして、ペンローズのゲーデル的議論と人工知能におけるフレーム問題の関連性を詳しく分析し両者が共有する構造を同定した。

研究テーマJ:「量子生物学と量子認知科学に基づく汎計算論とデータサイエンスの認識論」

脳は一種の計算機であり、人工知能は計算機として知能を実装する、というような立場は心の計算理論と呼ばれる。テグマークらの物理学者はさらに、宇宙は(自身の量子状態を計算する)巨大な量子計算機である、という主張を唱える。遍く万物を情報と捉えその時間発展を計算プロセスと捉えるのが汎計算論の立場である。量子生物学と量子認知科学が汎計算論に与える含意を分析し、また万物をデータとして扱うデータサイエンスの認識論を構築した。

研究テーマK:「多元的統一科学としての圏論的統一科学」

圏論的認知科学のような圏論的生命科学の試みは、一見すると無謀なもののようにも見えるが、このような取り組みを始めたきっかけは「圏論的統一科学」のためであり、生命や認知が捉えられずに「統一科学」とは言えないと考えた故である。ボトムアップに圏論的サイエンスを実践するとともに、圏論的統一科学とはそもそも何なのかというトップダウンの研究も行った。以上の全ては「圏論的統一科学」への(ごく小さなものであれ)ステップであるとも考えられる。

3. 今後の展開

量子認知科学(Quantum Cognitive Science)の研究は、情報学として応用することで、量子認知情報学(Quantum Cognitive Informatics)の研究に繋がってゆくことが期待される。特に、脳の神経細胞ネットワークが、人工知能のコネクショニズムの枠組みとしてのニューラルネットワークを生んだように、人間の認知の研究は新たな人工知能フレームワークに繋げてゆくことができる。

本研究の延長線上にある最も重要なテーマは、「記号的 AI と統計的 AI の圏論的統合」による「次世代量子融合 AI パラダイム」の創出である。これのプロトタイプを圏論的量子 NLP (圏論的量子自然言語処理) が与える。また量子認知科学は、人間の認知バイアスをバイアスとしてではなく(古典論的な合理性とは異なる)量子論的な合理性の現れとして理解することを可能にするが、認知バイアスは、それが時にヒューリスティクスとも呼ばれることがあるように、計算を効率化す

るポジティブな働きを持っており、これを利用することで新たな計算概念の構築へと繋がってゆくことが期待される。圏論的人工知能(特に圏論的量子 AI)は、記号的 AI により統計的 AI を補完可能なため、現在の統計的 AI におけるいわゆる説明可能性の問題、検証可能性の問題、またマシン・バイアスの問題を、それぞれ記号論理的説明の生成・形式手法によるプログラム検証・倫理原則の記号論理的定式化を通じて解決可能と考えられ、次世代の人工知能パラダイムとしてきわめて大きな可能性を秘めている。

4. 自己評価

本研究の目的は当初の予想を超えた形で達成され、数多くの論文成果として既に出版ないし出版受理されている。充実した研究実施体制の中で、有効に研究費執行ができたおかげである。研究成果は、量子論における文脈依存性に関する国際学会での複数の国際招待講演や圏論や人工知能におけるトップ国際会議のプログラム委員就任などに示されるように、科学技術界への大きな波及効果を生んでいる。同時に、一般向け学術誌や一般向け媒体におけるインタビュー依頼、一般向けの数理系雑誌と思想系雑誌における寄稿依頼、また、我が国の中学・高校、科学館、さらにはオーストラリアの高校における講演依頼などに示されるように、一般社会への大きな波及効果をも生んでいる。

本研究の延長線上にある「記号的 AI と統計的 AI の圏論的融合」による「圏論的人工知能」は、現在の統計的 AI のあとにやってくる「人工知能の次世代パラダイム」となる可能性を秘めており、本研究はそのための基盤構築としても肝要なものであったと考えられる。圏論的量子 NLP において既に一定の成果が示されているように、圏論的融合 AI としての圏論的量子 AI が人工知能のランドスケープに革新を引き起こしてゆくことが期待される。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 17 件

1. Y. Maruyama. Contextuality across the Sciences: Bell-type Theorems in Physics and Cognitive Science. Springer LNCS, vol. 11939, pp. 147-160, 2019.

物質的量子性に相対する概念として構造的量子性の概念を定式化し、物質的量子マインド仮説に対する構造的量子マインド仮説を提唱した。そして、ベル型不等式の破れによって示される量子物理における文脈依存性と、同じくベル型不等式の破れにより示される認知科学における文脈依存性の間の本質的相違を明らかにした。最後に、物質の法則と精神の法則の間に橋をかける量子認知科学はデカルト的二元論を乗り越える手段となり得ると論じた。

2. Y. Maruyama. Rationality, Cognitive Bias, and Artificial Intelligence: A Structural Perspective on Quantum Cognitive Science. Springer LNCS, vol. 12187, pp. 172-188, 2020.

量子認知科学は、人間の認知バイアスを単なるバイアスではなく、古典意思決定理論の提示する合理性概念とは異なる新しい種類の合理性として理解可能なことを示す。このとき、人間の認知の論理もまた古典的なものではなく、数理論理学の言葉で部分構造論理的なものとなる。圏論の言葉で言えば、モノイダル圏的なものとなる。両者は圏論的論理のカリー・ハワード・ランベック対応を通じて繋がる。さらに圏論的量子力学は、量子力学の論理も部分

構造的／モノイダル圏的なものであることを示し、量子と認知の論理の相同性を教える。

3. Y. Maruyama. Topological Duality via Maximal Spectrum Functor. Communications in Algebra, vol. 48, pp. 2616–2623, 2020.

より数学的な方面の関連研究として、ある種の量子論理であるクォンタールに対する圏論的
双対性を得るために、まずクォンタールの特別な場合であるロカールに対する圏論的
双対性を証明した。これは、人間の認知を超越した対象である「点」の概念を仮定しないトポロ
ジーであるロカール理論それ自体においても重要な結果であり、また応用面では代数幾何学
においても有意義な結果である。一連の新たな双対性を導出可能な基盤成果である。

(2) 特許出願

理論研究のため該当しない。

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- 1: FUZZ-IEEE (2020)における 5 つの Best Paper Award のうち 1 つを受賞 (5/466 = approx. 1%)
- 2: 量子物理と認知科学における文脈依存性に関する国際学会における招待講演3件
- 3: 一般向け学術系雑誌からの招待論文掲載依頼5件
- 4: 一般向け学術系雑誌やその他一般向け媒体からのインタビュー記事掲載依頼2件
- 5: 人工知能のトップ会議 IJCAI や圏論の科学応用の主要会議 SYCO のプログラム委員歴任