

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 生命と認知の量子情報理論：圏論的定式化とその応用

2. 個人研究者名

丸山 善宏（オーストラリア国立大学コンピューターサイエンス学科 講師）

3. 事後評価結果

本研究では、圏論的基礎論を媒介とすることで量子物理・情報の論理と生命・認知の論理の邂逅を可能にし（デカルト的二元論で分離された）物理学（物質世界）と生命・認知科学（生命・心の世界）が共有する高次の構造的法則性を明らかにし、その原理的繋がりを利用して量子の知を生命・認知の世界へとトランスポートすることで生命・認知の根源的理解に資する洞察を得ると共に量子情報の生命・認知科学的な応用を目指した。

[どのような量子性をどのように扱ったのか]

- ・物質的ではない数学的・圏論的な「構造的量子性」
- ・意識の起源は物質としての脳の中の「物質的量子性」にあると考えたペンローズの「量子脳理論」

[達成状況とインパクト]

丸山研究者は、量子認知科学が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對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と呼び得る考えに対して、構造的量子マインド仮説、すなわち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を示した。ペンローズの「物質的」な量子脳仮説を「構造的」な量子マインド仮説として再定式化するなど、量子認知科学とは何かを明確にした点は評価できる。また、認知科学における文脈依存性の量子現象とされる対象について、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について検討を試みている。これらは共にベル型不等式を破る。しかし、認知科学における相関の強さは、量子相関の強さを原理的に超え得ることから、ベル型不等式がより強く破れ得ることを明らかにし、ベル型不等式を破る統計的相関を生み出している機構において、両者が本質的に異なることを見いだした。この点は、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を示している。これは量子認知科学を研究する研究者にとっては相反する結果ではあるが、認知の構造的量子性の本性に関わる原理的な考察を与えている。

本研究からどのような生命現象の量子現象にアプローチできる手法もしくは理論であるかの方向性について、丸山研究者は、認知科学における文脈依存性に対する圏論的論理学に基づく理論基盤、認知科学における量子現象一般に対する包括的な構造的量子性の理論のきっかけ、認知科学における文脈依存性に対する圏論的層理論に基づく理論基盤、圏論的量子 AI による記号的 AI と統計的 AI の圏論的統合のきっかけ、を挙げている。これら生命と認知の量子情報理論はアドバイザーを含む領域参加者全体や分野全体に深い洞察を与えた。一方、具体例で端的に説明することで非専門家とコミュニケーションする点については、領域会議などを通じて努力している様子は見られるものの、未だ十分ではない。今後の発展のためには必須な能力だと思われるので、一層の努力が望まれる。今後、新しい量子生体分野の理論家の世界的なリーダーとして成長することを期待したい。

(2021年9月追記 丸山研究者のコロナ延長6ヶ月に関する事後評価)

本課題は、新型コロナウイルスの影響を受けて研究期間を6ヶ月間延長し、理論研究の推進、研究成果の学会発表や出版、延期されていた文脈依存性に関する国際ワークショップへの参加を計画した。

その結果、トライポス理論の広大な一般化を与えた論文を数理論理学のトップジャーナルである The

Journal of Symbolic Logic 誌に本課題の成果を発表することができた。さらに、このトライポス理論を意識の理論に応用し、圏論で記述するための基盤を確立した。延長により、意識の時間変化や質的側面を捉えるために重要な理論展開をより一層後押しする成果が得られており、その成果が数多くの原著論文の発表につながっている。