

量子場脳理論：その背景

田中 成典 (Shigenori Tanaka) ・ 西山 陽大 (Akihiro Nishiyama)

神戸大学大学院システム情報学研究科

脳の機能を記述する「物理モデル」とは何だろうか？ヒトの脳の構造は基本的に分子レベルまで大方わかっていると考えられるが、「脳のすべて」を説明できる第一原理的な物理モデルは現時点では存在しないと言える。そもそも、脳の「機能」と言ったとき、情報処理や記憶、意識、自由意志などの様々な切り口が考えられるが、情報処理機能について主にニューロン・シナプスモデルによる理解が進んでいる一方、それ以外の面でのモデル的理解は未だ「物理学的記述」からは程遠く、解剖学的記述あるいは哲学的議論の範疇に留まっていると言っても過言ではない。

一方、20世紀以降、主に量子力学に基づく宇宙の数多くの「物質」の物理学的・化学的理解は急速に進み、構成要素の分子・原子レベルの構造がわかっているならば、原子核と電子からなる多体系に量子論（主にシュレディンガー方程式）を適用することで、ほぼ全ての物性を第一原理的かつ定量的に記述したり予測したりすることが可能となっている。脳に関しても、このようなことは可能ではないのだろうか？我々がここで紹介する「量子場脳理論」の基本コンセプトは、脳内の、特に水と電磁場からなる系に注目し、現代物理学における理論的記述ツールの一つの到達点である場の量子論を適用して、その有限温度の非平衡量子ダイナミクスを解析し、そこから「脳機能の第一原理的記述」につながる何かを抽出できないかと試みるというものである。

我々の一つの目標は、「記憶」のメカニズムを解明できないかということである。ヒトの記憶機構はコンピュータのメモリとは様々な点で異なり、再生順序があること、情報の断片から自動連想が行われること、階層性や加工性があること、詳細によらない不変性をもつことなどの顕著な特徴を有している。また、記憶は脳内で広がりをもって存在していること（非局在性）を示す実験結果があり、大脳皮質の一部に損傷を受けたラットの記憶機能が非損傷部分によって補われる「等能性」やその際の「量作用性」が知られている。これらの経験的事実は、何らかの量子的機構の関与を直観させる。

なぜ「量子」なのか？記憶や意識には一人の人格と結びついた「単一性」や「全体性」があり、また、脳による情報処理における高いエネルギー効率や大容量性を鑑みて、脳機能における量子的作用の重要性（少なくとも介在）を指摘する科学者は今までも少なくなかった。古典力学の枠内での因果的決定論と自由意志の存在の「矛盾」の解消を量子論に求める動きもその一つである。ここで、エネルギー効率に関して付記すると、2016年に AlphaGo と対戦して敗れた囲碁のトップ棋士 Lee Sedol はおおよそ 20 W のエネルギー消費で、その 1 万倍以上のエネルギー消費をしたコンピュータと対等に戦うことができた。近年急速に開発が進められている量子コンピュータとのアナロジーを持ち出すことには現時点で飛躍があるが、脳機能のどこかに重ね合わせやコヒーレンス、エンタングルメントなどの量子的メカニズムの関与を期待したい心情も理解できる。

量子場脳理論の歴史は 1967 年、Ricciardi と Umezawa による、場の量子論における自発的対称性の破れによって生じる真空状態を脳の記憶機構のモデルとする提案を嚆矢とする。その後、1970 年代には、Stuart や Takahashi が協力者となり、皮質子 (corticon) と交換ボソンという 2 種類の仮想的な量子的自由度を導入して、記憶の想起、安定性、非局在性などを記述するモデルが提案された。この時期までは、量子場脳理論は「メカニズムの本質」を理解しようとするトイ・モデルの様相を帯びていたが、1980 年代になり、イタリアの Vitiello らのグループにより、脳の物質的実体として水に注目し、脳内環境下で水分子の力学的自由度に付随する Bose-Einstein 凝縮やレーザー現象の重要性が議論されるようになった。この流れの延長線上に、1990 年代、日本の Jibu と Yasue によって、水の電気双極子場と光子場 (電磁場) の結合系をモデルとした、超放射現象や Josephson 効果と脳機能の関係を議論する研究が進められた。

我々 (Nishiyama, Tanaka, Tuszynski) のアプローチも、基本的に脳内の水と電磁場からなる結合系 (一種のポラリトン) を脳機能を説明するためのモデルとして採用する。但し、それは有限温度の非平衡開放系として扱われ、近傍の微小管から (さらに元を辿ればミトコンドリアから) エネルギー供給を受けているとする。水は電気双極子の回転の基底状態と励起状態をもつ量子力学的自由度を有する分子として表現され、電磁場と結合したラグランジアン密度を考える。このラグランジアン密度を時空間積分して得られる作用に対する変分原理から (いくつかの近似を導入しつつ) 各種非平衡グリーン関数や場に対する時間発展方程式が得られ、有限温度での系の非平衡量子ダイナミクスが記述される。また、理論解析をさらに進めて、コヒーレントな超放射光によるホログラフィー機構に基づく記憶メカニズムのモデルを提案することができる。これらの話題は次の西山による講演で詳しく述べられる。なお、我々のモデルは微小管の関与を前提とするが、Penrose と Hameroff による Orch-OR 理論とは全く異なるものである。

我々の理論モデルは、脳内に現実に存在する水と電磁場という物理系を対象とした第一原理的な物質科学アプローチであり、今後、理論的帰結と実験的事実との整合性に関する検証が可能である。従来より、「量子脳理論」一般に対して、「デコヒーレンス時間の短さから非現実的である」という Tegmark らの批判があるが、しばしば引用される彼の 2000 年の論文にはいくつかの誤謬があり、また、そこで批判される量子状態の安定性に関し、近年、理論・実験両面で様々な肯定的見解も出されつつある。例えば、我々のモデルで実現可能なエヴァネッセント光のボース凝縮の臨界温度を見積もると体温を超えている可能性があり、「単一のマクロ量子状態としての意識」という描像も物理的には不可能ではない。「意識」モデルのいわば逆向きとも言える「麻醉」モデルに関しても、Pauling 以来、水の関与に注目する議論があるが、界面水の局所的な物性に麻醉薬が影響を与えるといった実験結果も存在する。さらに、近年心理学の分野で注目を集めている量子認知あるいは量子意思決定といったヒトのマクロな振舞いに見られる「量子性」とマイクロモデルとの関連性についても今後の研究の進展が待たれる。

(参考文献)

- ・保江邦夫「量子場脳理論入門」(SGC ライブラリ 25、サイエンス社、2003 年)
- ・A. Nishiyama, S. Tanaka, J.A. Tuszynski, Physica A 567 (2021) 125706.