

特集

量子生命科学による精神神経疾患のメカニズム解明に向けた挑戦

8. 信念更新における量子ゼノン効果

玉木賢太郎*, 山田真希子*

抄録：本総説は、信念更新における量子ゼノン効果についての理解を深めるため、妄想に関連する認知バイアスを紹介し、量子認知モデルを用いたアプローチを探る。統合失調症を中心とする精神疾患における妄想の形成と訂正不能性にかかわる jumping to conclusion バイアスと bias against disconfirmatory evidence (BADE) の2つの主要なバイアスについて論じる。特に BADE に焦点を当て、量子認知モデルの概要とその最近の動向、さらに量子ゼノン効果の理論的背景とその実証的研究について詳述する。これらを通じて、妄想の形成と維持に対する理解を深め、将来的な研究の方向性を示すことを目的とする。

日本生物学的精神医学会誌 35 (3) : 141-145, 2024

Key words : quantum cognition, beads task, belief-updating, delusion, bias against disconfirmatory evidence

1. 妄想に関連する認知バイアス

統合失調症を中心とする精神疾患では、事実と乖離した信念を強く抱く妄想がみられる。たとえば、自分の考えが盗聴されているといった非現実的な信念を一度保持すると、その妄想が現実でないことを説明しても修正が難しい。このような妄想を確信し、維持してしまう背景には、主に2つの認知バイアスが寄与していることが示唆されている。

1つは、情報を精査せずに自分の考えに確信をもつ結論への飛躍 (jumping to conclusion : JTC) バイアスである⁹⁾。このバイアスの程度を評価する方法として、ビーズ課題⁵⁾とよばれる推論課題が広く用いられる。ビーズ課題では、2色のビーズが一定の割合で入れられた2つの瓶を被験者に提示し、ランダムに取り出されるビーズの色を元に、どちらの瓶からビーズが取り出されたかを推測させる。たとえば、一方の瓶 A には黄色のビーズを 80 個、青色のビーズを 20 個、他方の瓶 B には割合を反転させ黄色が 20 個、青色が 80 個入っている (図 1)。その後2つの瓶のうち1つを被験者に見えないよ

うに実験者が選び、選んだ瓶を隠す。各試行では隠した瓶からビーズを1つずつ取り出して見せ、被験者にどちらの瓶から取り出しているのか推測させ、毎回ビーズを瓶に戻していく。被験者にはビーズをランダムに取り出しているように思い込ませるが、実際に取り出す順番は黄、黄、黄、青・・・とあらかじめ決められており、特定の信念が形成され更新される過程を観察することができる課題となっている。

妄想症状患者では平均して2試行で結論に達することが報告されており、健常者が平均4試行を要するのに比べて早期に結論に至る傾向がみられる⁴⁾。これは、JTC バイアスが妄想の形成に寄与していると考えられ、バイアスの改善による妄想の緩和も試みられている⁸⁾。また、近年では JTC バイアスに関連する脳活動も明らかになりつつある¹¹⁾。

もう1つは、信念に反する情報を無視する傾向を示す bias against disconfirmatory evidence (BADE) である⁶⁾。このバイアスの評価方法として BADE 課題が用いられ、被験者に絵を順に見せ、その状況を説明する文を評価させる。妄想患者やスキゾタイプ

Quantum Zeno effect in belief-updating

* 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 量子生命科学研究所 量子生命システムグループ 量子認知脳科学チーム (〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1 量子生命棟 3F) Kentaro Tamaki, Makiko Yamada : Quantum Cognitive Neuroscience Team, Quantum Life System Group, Institute for Quantum Life Science, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology. Quantum Life Building 3F, 4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba 263-8555, Japan

【山田真希子 E-mail : yamada.makiko@qst.go.jp】

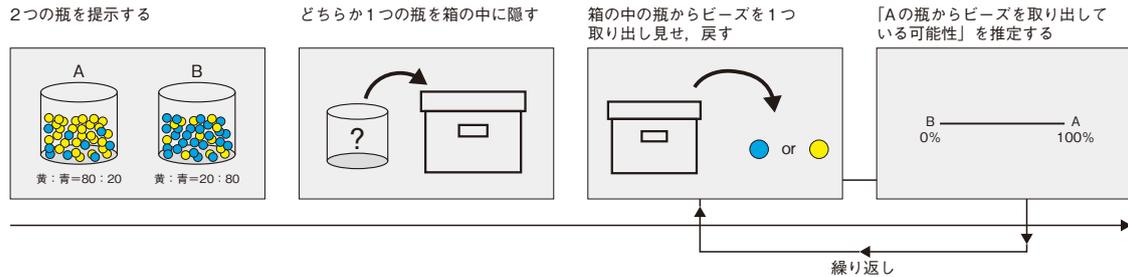


図1 ビーズ課題の実験手順

のパーソナリティをもつ健常者は、最初に抱いた信念を更新しづらいことが報告されている²⁾。

近年では、数理モデルを用いたアプローチから、なぜバイアスが生じるのかについても検討が進められている。先行研究では、意思決定過程を主観確率のベイズ更新とみなし、ビーズ課題の数理モデルが提案されている¹¹⁾。これらの研究では、ビーズの情報の価値（重みづけ）が妄想群と健常群で異なることがJTCバイアスにつながっていると示唆されている。しかし、BADEについては、バイアスの背景にある認知過程の詳細な検討が不足しており、数理モデルも提案されていない。そこで、以下ではBADEの数理モデルとして、量子認知モデルを紹介する。

2. 量子認知モデル

量子認知モデルは、行動データのモデリングに量子確率論を取り入れた革新的な手法である³⁾。信念更新の数理モデルとしては、これまでベイズモデルが広く用いられ、大きな成功を収めてきた。しかし、近年ではベイズモデルに代わるアプローチとして量子認知モデルが注目されている。両モデルは被験者の反応が生じる確率を算出する点では共通しているが、想定する認知プロセスには顕著な違いがある。

確率推定課題のベイズモデルでは、ある試行の被験者の推定値（事後確率）は、直前の試行の推定値（事前確率）に新たな情報を掛け合わせることで更新される。この過程では、被験者の推定値が被験者の信念状態を正確に反映していると仮定している。すなわち、被験者の反応は信念状態を読み出すプロセス（read-out）と位置付けられる。

これに対して、量子認知モデルは被験者の反応と信念状態を明確に区別する点で異なる¹²⁾。量子認知モデルでは、信念（精神）状態は複数の信念が量子的に重ね合わさっている状態（重ね合わせ状態）として表現される。ビーズ課題においては、瓶Aの

信念と瓶Bの信念が同時に存在し、その状態は量子状態ベクトルの線形結合として記述される。被験者に質問が与えられると、信念状態に対して観測が行われる。

量子認知モデルの観測のモデルには主に2つの方法がある：射影測定とインストルメント。射影測定は量子力学で標準的に用いられる観測方法で、観測結果に応じて量子状態が特定の基底状態に収縮する過程を表す。一方、インストルメントはより一般的な観測モデルであり、観測結果に応じて状態が確率的に変化する過程を記述する。インストルメントでは、観測後の状態が観測結果に依存して確率的に分布するため、射影測定よりも柔軟なモデル化が可能である。

量子認知モデルでは、観測結果が信念状態にフィードバックされるため、観測結果に応じた信念状態の更新が行われる。このようにして、量子認知モデルは精神状態に対する観測（質問に対する回答のプロセス）を通じて反応が生成され、その反応が再び精神状態にフィードバックされると考える。これにより、ある試行の回答は直前の回答の影響を受けることが予測される。この特性により、異なる質問への回答がどちらの質問に先に回答するのかによって変わるという事実を説明することが可能である⁷⁾。

量子認知モデルは、観測行為が信念の更新に与える影響を定量的に評価するため、意思決定理論や認知バイアスの理解に重要な示唆を与える。

3. 量子ゼノン効果

量子力学において、観測の繰り返しは特別な意味をもつ。量子ゼノン効果（quantum Zeno effect : QZE）は、2つの状態間で時間発展する量子系に対して、頻繁に観測を行うことで、系の状態を初期状態に固定し続ける現象である。具体的には、頻繁な観測によって系がほかの状態に遷移する前に再び観

測が行われるため、系の状態が遷移する機会が制限され、結果として初期状態にとどまる。この現象は、観測行為が量子系の動的な進行を「凍結」という意味で、ゼノンのパラドクスに由来して名付けられている。

Yearsley と Pothos¹³⁾ は、この量子ゼノン効果が意思決定プロセスにも適用できることを示した。彼らの実験では、被験者に容疑者の無罪を暗示するストーリーを読ませた後に、容疑者が有罪である証拠を繰り返し提示し、有罪か無罪かの判断を求めるといったデザインが用いられた。この実験では、中間判断の回数を変動させることにより、信念の固定化に対する影響が検証された。

量子認知モデルは、質問に回答することが精神状態の変化を留める役割を果たすため、中間判断が多いほど信念が変化しにくくなることを予測する。一方、ベイズモデルでは、信念更新は証拠の蓄積によってのみ行われるため、最終的に意見を変化させる被験者の割合は中間判断の回数に影響を受けないと予測される。Yearsley と Pothos の実験では、中間判断がない場合には両モデルの予測値が等しくなるようにベイズモデルを設定していた。

実験の結果、被験者が毎試行判断を行うとデータは量子認知モデルの予測に一致し、一度形成された信念は中間判断が多いほど初期の信念にとどまりやすいことが示された。具体的には、中間判断を多く行う被験者は、有罪の証拠が提示されても無罪の信念を保持し続ける傾向が強かった。この結果は、観測の繰り返しが信念状態を固定化する量子ゼノン効果が、意思決定にも適用できることを示唆している。

さらに、Yearsley と Pothos は、この結果を裏付けるために詳細な統計解析を行い、量子認知モデルの適合度がベイズモデルに比べて高いことを示した。彼らの研究は、観測が信念の更新に与える影響を定量的に評価するための新しい方法論を提供している。観測の頻度と信念の更新の関係は、意思決定理論や認知バイアスの理解に重要な示唆を与えるものである。

4. ビーズ課題における量子ゼノン効果

量子認知モデルの観点から考えると、BADE における信念更新の障害は、量子ゼノン効果に類似する観測の繰り返しによって生じる可能性がある。もしそうであれば、確率推定課題においても、中間判断の回数が多い条件では少ない条件に比べて、初期の信念が変化しにくいことが予測される。

これを検証するために、筆者らは健康者を対象にビーズ課題を実施した。実験デザインとしては、20 試行のビーズ課題を用い、被験者には選ばれた瓶が A (黄色のビーズ 80 個、青色のビーズ 20 個) である確率を 0% から 100% の間で visual analogue scale を用いて評価させた。第 1 試行から第 8 試行までは黄色のビーズを多く提示し、瓶 A への信念を形成させた。第 9 試行目以降は青色のビーズを多く提示することで、最初に形成された瓶 A という信念を訂正させるデザインとなっている (図 2)。

第 1 試行から第 8 試行までは毎回被験者に回答を求めた。第 9 試行目から第 20 試行目までは、中間判断の回数を変動させた 3 つの実験群に被験者を割りあてた。すなわち、第 20 試行目のみ回答し中間判断をまったく行わない「中間判断 0」群、12 試行目と 16 試行目のみ回答する「中間判断 2」群、全試行回答する「中間判断 11」群である。中間判断を行わない試行では、被験者にビーズが引かれる場面を見ているよう教示した。

第 8 試行までに被験者の信念が形成されると考えられるため、第 8 試行を初期状態として、第 9 試行目以降の反証情報に対する回答を検討した (図 2)。第 20 試行目の確信度に対する分散分析では、中間判断の回数の主効果が有意であった ($F(2, 40) = 3.27$, $MSe = 303.03$, $P = 0.048$)。事後検定では中間判断 0 群と 11 群、2 群と 11 群の間の差が有意傾向であった (the one-tailed $P_s < 0.05$)。つまり、中間判断を毎回行う群の被験者は、行わない群や数回しか行わない群の被験者よりも、最終的な瓶 A への信念を高く維持する傾向が示された。

この実験結果は、中間判断の増加により初期信念の更新が阻害されることを示唆している。これが Yearsley と Pothos¹³⁾ が指摘する意思決定の量子ゼノン効果であれば、ビーズ課題中の信念形成は提示される証拠や証拠に対する評価だけで説明できるのではなく、観測行為自体による信念の同定化も考慮する必要があるだろう。ビーズ課題に量子ゼノン効果が生じているとすると、信念の更新されにくさである BADE の個人差にも観測回数が影響している可能性が示唆される。観測が精神状態を固定させるということは、反芻のように繰り返し自身の思考を確認する傾向がある場合、信念の更新が阻害されることが予測される。実際、統合失調症やうつ病などの精神疾患において反芻がみられることは広く知られており、反芻が妄想の訂正不能性の原因である可能性がある。

本研究では被験者の報告のみを観測として扱った

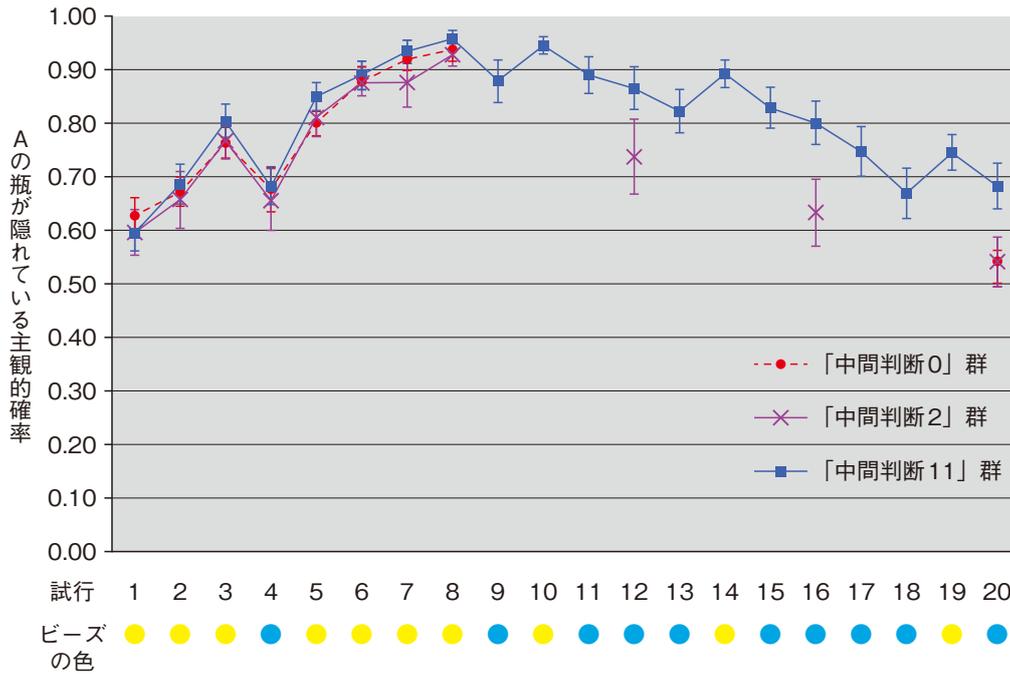


図2 ビーズの色の提示順序と中間判断回数別の推定値の平均, および標準誤差

が、被験者が回答を求められなくてもビーズを見るたびにどちらの瓶が正解かを内省している可能性がある。この内省は自身の信念に向けたメタ認知の働きであり、精神状態の観測過程とみなすことができる。内省に対しても量子認知モデルの適用可能性があり、Rossiによる意思決定の量子認知モデルでは、内省と行動の等価性が検討されており、シミュレーションの結果は内省も回答行動と同様の更新の阻害効果をもつことが示されている¹⁰⁾。今後は、内省を含んだモデルの予測を実証的に確認することで、妄想を支持する認知過程が明らかになることが期待される。

5. 結論

本論文では、信念更新における量子ゼノン効果について検討した。特に、精神疾患に関連する認知バイアスであるBADEに焦点を当て、ビーズ課題を用いた実験を通じて量子認知モデルの妥当性を検証した。その結果、中間判断の回数が信念の固定化に寄与することが示され、量子ゼノン効果が認知判断にも適用できる可能性が示唆された。

量子認知モデルは、従来のベイズモデルでは説明が困難だった複雑な認知プロセスを理解するための新たな枠組みを提供する。観測行為が信念の更新に与える影響を定量的に評価することにより、認知バイアスのメカニズムをより深く理解することができ

る。本研究は、認知科学の発展に貢献するとともに、精神疾患における妄想の治療や予防に対する新たなアプローチを提供する可能性がある。今後の研究では、内省を含むより複雑なモデルの検証や、ほかの認知バイアスへの応用が期待される。

本論文における筆者らの研究に関して、すべて倫理的配慮を行っている。開示すべき利益相反は存在しない。

文 献

- 1) Andreou C, Steinmann S, Leicht G, et al (2018) fMRI correlates of jumping-to-conclusions in patients with delusions : connectivity patterns and effects of metacognitive training. *NeuroImage Clin*, 20 : 119-127.
- 2) Bronstein MV and Cannon TD (2017) Bias against disconfirmatory evidence in a large nonclinical sample : associations with schizotypy and delusional beliefs. *J Exp Psychopathol*, 8 (3) : 288-302.
- 3) Busemeyer JR and Bruza PD (2012) *Quantum models of cognition and decision*. Cambridge University Press, Cambridge
- 4) Dudley R, Taylor P, Wickham S, et al (2016) Psychosis, delusions and the “jumping to conclusions” reasoning bias : a systematic review and meta-analysis. *Schizophr Bull*, 42 (3) : 652-665.
- 5) Huq SF, Garety PA and Hemsley DR (1988) Proba-

- bilistic judgements in deluded and non-deluded subjects. *Q J Exp Psychol A*, 40 (4) : 801-812.
- 6) Moritz S and Woodward TS (2006) A generalized bias against disconfirmatory evidence in schizophrenia. *Psychiatry Res*, 142 (2-3) : 157-165.
- 7) Ozawa M and Khrennikov A (2021) Modeling combination of question order effect, response replicability effect, and QQ-equality with quantum instruments. *J Math Psychol*, 100 : 102491.
- 8) Ross K, Freeman D, Dunn G, et al (2011) A randomized experimental investigation of reasoning training for people with delusions. *Schizophr Bull*, 37 (2) : 324-333.
- 9) Ross RM, McKay R, Coltheart M, et al (2015) Jumping to conclusions about the beads task? a meta-analysis of delusional ideation and data-gathering. *Schizophr Bull*, 41 (5) : 1183-1191.
- 10) Rossi R (2021) The role of introspective evaluation of intentions to act in a quantum-like cognitive model. *Phys Lett A*, 390 : 127111.
- 11) Tan N, Shou Y, Chen J, et al (2024) A Bayesian model of the jumping-to-conclusions bias and its relationship to psychopathology. *Cogn Emot*, 38 (3) : 315-331.
- 12) Trueblood JS and Busemeyer JR (2011) A quantum probability account of order effects in inference. *Cogn Sci*, 35 (8) : 1518-1552.
- 13) Yearsley JM and Pothos EM (2016) Zeno's paradox in decision-making. *Proc Biol Sci*, 283 (1828) : 20160291.

■ ABSTRACT

Quantum Zeno effect in belief-updating

Kentaro Tamaki, Makiko Yamada

*Quantum Cognitive Neuroscience Team, Quantum Life System Group, Institute for Quantum Life Science,
National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology*

This review introduces the quantum Zeno effect in the context of belief updating, with a focus on cognitive biases related to delusions. It introduces two primary biases found in psychiatric disorders, particularly schizophrenia : the jumping to conclusions bias and the bias against disconfirmatory evidence (BADE). While both biases are discussed, the review specifically emphasizes the relevance of BADE within the framework of quantum cognitive models. It provides an overview of these models, recent trends, and the theoretical underpinnings of the quantum Zeno effect, along with empirical studies. The review aims to deepen the understanding of how BADE contributes to the persistence of delusions and to propose future research directions in this area.

(Japanese Journal of Biological Psychiatry 35 (3) : 141-145, 2024)