

進化論の観点から孤独感研究を行うための計算論的枠組み —大坪論文へのコメント—

国 里 愛 彦

専修大学

世界の113の国と地域を対象としたメタ分析研究 (Surkalim et al., 2022) によると、思春期における孤独感の有病率は9.2%から14.4%と非常に高い。孤独感は、うつ、不安、自殺、睡眠、メンタルヘルス全般に悪影響を与える (Park et al., 2020)。そのため、孤独や孤立は、臨床心理学において取り組むべき研究テーマの1つになる。また、大坪論文でも指摘されているように慢性的孤独に対しては認知行動療法を含む心理的介入法の効果が期待できる。心理的介入法の開発や社会実装などの観点からも、孤独感は臨床心理学が貢献できるテーマである。

大坪論文では、進化論の観点から、(1) 孤独感は社会関係への脅威を知らせる内的シグナルとして十分な精度をもつ、(2) 孤独感は関係再構築を動機づける、(3) 孤独感は適応的に機能する (慢性的孤独の存在が矛盾する) の3点について検討している。その検討にあたり、過去に行われた人を対象とした実験・調査だけでなく、孤立の操作が可能な動物を対象とした研究についても網羅的に検討されており、孤独感研究に取り組む際の優れたガイドになっている。大坪論文においては、過去の研究を整理した上で、孤独感は社会関係への脅威を知らせる内的シグナルとしての精度は低くないこと、報復動機が生じにくい状況では孤独感は関係再構築を動機づけることを示した。3つ目の孤独感が適応的な機能をもっているとした場合の慢性的孤独については、ネガティブな認知バイアスの観点から説明を行っている。

大坪論文においても論じられているが、「適応」という言葉には注意が必要である。臨床心理学においても適応は重要な観点となるが、その場合は個人の症状が低く、問題行動が少なく、ウェルビーイングが高い状態という意味で適応という言葉を用いている。一方で、進化論の観点では、

進化の過程において生存・繁殖を有利にした形質のことを指している。同じ適応であっても、その価値づけの基準と扱うタイムスパンが全く異なるため、時として進化論の観点からは適応的であっても、現在の環境で暮らす個人にとっては適応的ではないことが起こり得る。このように、孤独感に限らず、進化論的な適応の観点から精神障害を見直すことは、これまでとは異なった障害理解につながると思われる。

進化医学もしくは進化精神医学においては、精神障害がそのまま進化の過程を通して残ってきたものではなく、精神障害につながるような形質が進化の過程を通して残り、その形質の極端な高さもしくは低さが環境との相互作用を通して、精神障害につながると考える (Nesse, 2019)。例えば、うつ病という病自体は進化の過程を通して残ってきた形質ではなく、孤独感のような進化的に適応的な形質が高い場合にうつ病につながるといったような考え方をする。大坪論文でも述べられているように、孤独感は睡眠の質の低下、HPA系の活性、交感神経の緊張などを引き起こすが、これはうつ病発症の前段階において認められる状態ともいえる。孤独感自体は進化的な適応性が高いが、その結果として生じるうつ症状は個人のウェルビーイングを下げることになる。進化論的な観点を臨床心理学や精神医学に活かすという考えは、進化精神病理学における精神障害の理解、プロセス・ベースド・セラピー (Hofmann, Hayes, & Lorscheid, 2021) といった心理的介入において取り入れられている。孤独感を含む精神障害への進化論の適用は、進化論から臨床への貢献もあるが、臨床的な現象から進化論上の仮説の生成にもつながるといふ双方向の貢献が期待できる領域といえるだろう。

孤独感のような社会心理学や臨床心理学が重

る領域において、進化論は理論のレベルにおいて有効に機能することが期待できる。大坪論文でなされたように、進化論と実験・調査・臨床上の知見とを丁寧に対応付けることが重要になってくる。しかし、それだけでなく、理論と実証的な知見や現象をつなぐアルゴリズムレベルの数理モデルを用いることはこの領域の発展において有用と思われる。以下では、孤独感研究を進めていく上で有用と思われるモデルについて、計算論的精神医学の観点から論じる。

孤独感研究の枠組みとしての計算論的精神医学

計算論的精神医学は、計算論的神経科学の精神医学への応用領域であり、脳や心の動作原理について数理モデルを用いて理解する研究分野である(国里ら, 2019)。計算論的精神医学が採用する計算論的アプローチでは、計算理論、アルゴリズム、インプリメンテーションの3つの水準を考慮して研究を進めるが、進化論は生物の目標や適応度を定める計算理論の水準にあたり、数理モデルはアルゴリズムの水準に位置づけることができるだろう。このように整理した上で、以下では進化論と実証的な知見や現象を関連付けるものとしての数理モデルの活用を論じる。

計算論的精神医学で用いる数理モデルは多岐にわたるが、大きく分けると生物物理学のモデル、ニューラルネットワークモデル、強化学習モデル、ベイズ推論モデルがある(国里ら, 2019)。これらの数理モデルは、その他の数理モデルと区別して、生成モデルと呼ばれる。生成モデルは、厳密には同時確率分布とされるが、ここでは生物が行動データを生成する過程を表現したモデルといった意味で扱っている。生成モデルがあれば、環境の情報とパラメータを用意することで、シミュレーションの実施が可能となる。また、環境の情報と行動データを取得していれば、パラメータ推定もできる(国里, 2018)。これらの生成モデルを用いてモデル駆動的に孤独感を研究した研究はほとんどないが、孤独感にも関係する思春期の社会的な絆の形成に関して、既存の関係を維持するか新しい関係を探索するかを検討する強化学習モデルに基づいた枠組みの提案がなされている

(Do, Paolizzi, & Hallquist, 2024)。強化学習モデルは対人関係における報酬を設定することで柔軟な適用が可能になり孤独感研究でも有用と思われるが、ここではベイズ推論モデルに焦点をあてたい。これまで社会心理学の問題設定に対してエージェント・ベースト・モデル(agent-based model: ABM)に進化シミュレーションを適用した研究が行われてきている(塚崎・亀田, 2004; 横田・中西, 2012)。ABMに適用でき、対人相互作用における選好や不確実性を扱う場合にはベイズ推論モデルの1種である能動的推論モデルが使えるだろう。ABMでは、比較的シンプルなエージェントの行動ルールを指定することが多いが、行動を生成するメカニズムに関心がある場合には認知モデルを組み込んだ認知エージェントモデルが適切であると考えられる(Conte & Paolucci, 2014)。以下で説明する能動的推論モデルは、行動の生成に関わるモデルであり、ABMとしても利用可能になる。

能動的推論モデルに基づくトイモデルの提案

能動的推論は、自由エネルギー原理(free-energy principle)に基づいて、知覚と行動について説明するベイズ推論モデルである(Parr, Pezzulo, & Friston, 2022)。まず、ベイズ推論モデルにおいては、感覚入力の後には直接観測できない環境の状態(外部状態)があり、生物は感覚入力から自身の生成モデルを用いて外部状態を推測すると考える。生成モデルとは、外部状態についての信念と感覚入力との同時確率分布になる。感覚入力から外部状態を推論するにあたり、ベイズの定理を用いて生成モデルの良さを評価する。これは、感覚入力の得られにくさの指標であるサプライザルを計算することであるが、その計算は実質的に不可能なことも多い。そこで、自由エネルギー原理においては、サプライザルの代わりにサプライザルの上限を提供する計算可能な変分自由エネルギーを用いる。生物は、この変分自由エネルギーの最小化をするように、状態の信念を更新していき、それが知覚となる。また、生物は知覚だけでなく、行動をすることで、自分の信念の適切さを確認したり、信念における不確実性を解消する。行動するということは、過去のことだけでなく、未来についても考慮する必要がある。そこで、

変分自由エネルギーではなく、未来についても考慮した期待自由エネルギーを計算して、この期待自由エネルギーが最小化される行動を選択する。このように、能動的推論は自由エネルギー原理に基づいて、行動と知覚を扱う枠組みである。なお、感覚入力に離散変数の場合は、部分観測マルコフ決定過程（partially observable Markov decision process: POMDP）が用いられる。POMDPは状態を直接観測できない状況で状態を推測する際の枠組みになる。能動的推論の詳細について説明するのは本稿で扱う範囲を超えるため、Parr et al. (2022)を参照いただきたい。

能動的推論モデルに基づく孤独感研究を行う上で、出発点となるようなトイモデルを用意したい。孤独感是对人相互作用の中で生じる感情であり、関係再構築を動機づけるものであることから、複数のエージェントからなるABMが良いだろう。そして、ABMの各エージェントに能動的推論を組み込んだ認知エージェントモデルを採用する。能動的推論モデルを組み込んだABMのトイモデル作成のために、今回はpymdp (Heins et al., 2022)を用いる。pymdpは能動的推論のためのPythonライブラリであり、生成モデルの設定をすれば能動的推論エージェントを比較的簡単に準備できる（pymdpによる実装は、宗田ら（2025）を参照いただきたい）。また、pymdpではエージェントが動作する環境を工夫することで、エージェントを複数用意して、相互作用させるABMも比較的容易に実装できる。今回は 10×10 のグリッド上を能動的推論エージェントが移動するシミュレーションを行う。図1に示すように、グリッドワールドでは100個（縦10、横10）の場所があり、エージェントは他のエージェントに重ならないようにグリッドワールド上を移動する。グリッドワールド内には、他のエージェントも移動しており、友好的なエージェントと敵対的なエージェントがいる。このような環境において動作する各エージェントの生成モデルを設定する。今回用いたpymdpのコードは、githubリポジトリ (<https://github.com/ykunisato/Active-inference-based-toy-model-for-loneliness-ABM>)で共有している。

能動的推論の生成モデルの設定では、ABCD行列を設定する。まず、Aは、状態から観測が得られる確率を表す行列（尤度）である。今回は状態

に、エージェントのグリッドワールド内の位置、周囲（上下左右）の他エージェントの状態（友好、敵対、エージェントがいない）を設定した（位置、上下左右で5因子になる）。これらの状態と観測の関係を表現するのが尤度になる。今回は部分的な観測から状態を推定するのではなく、状態と観測が一致するという設定にした。次に、Bは、今の状態から次の状態間の遷移を表す行列（遷移行列）である。状態の遷移は、行動によって条件づけられる。エージェントがとる行動は上下左右への移動とその場に留まるという5種類なので、この5種類の行動を行った場合の状態遷移を記述した。今回の場合は、B行列の設定は煩雑になるため、詳細はgithubリポジトリ上のコードを確認いただきたい。次に、観測データの事前信念Cを設定するが、これはエージェントの状態への選好を表す。エージェントの位置についての選好はないとするが、周囲のエージェントの状態（友好、敵対、エージェントがいない）については選好をもつ。この選好の設定によって、大坪論文で出てきた認知バイアスを表現することもできる。今回は、友好 = 1.0、敵対 = -1.0、エージェントがいない = -1.0と設定した。この場合、敵対的なエージェントや周りにエージェントがいない状況への選好が負の値なのでそれらからの逃避行動につながり、友好的なエージェントへの選好が正の値なのでそちらへの接近行動につながる可能性がある。周囲にエージェントがいない状態の選好に-1.0をおくことで、周りにエージェントがいない孤立した状況を避けるという動機を持っているという設定ができる。このように周囲の状態の選好の値を変更することで特徴のあるエージェントを生成できる。最後に、D行列を設定するが、これは初期状態の信念の事前分布であり、各状態の初期値を決める。今回は、各状態に均等な確率が割り振られるように設定した。

16名の能動的推論エージェントを設定して、50ステップの移動を行うシミュレーションを行った。図1にその結果を示す。図1の左図には1ステップ目のエージェントの位置がプロットされている。ランダムな位置でスタートするため、比較的バラバラに配置されていると思われる。図1の右図には50ステップ目のエージェントの位置がプロットされている。初期状態からすると、

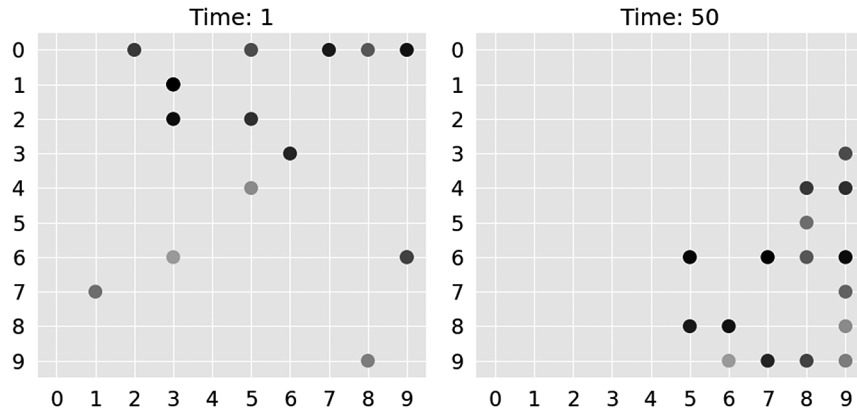


図1 グリッドワールド環境でのシミュレーション (左図: 1ステップ目のエージェントの位置, 右図: 50ステップ目のエージェントの位置)

エージェント同士が集まっているように思われる。あくまで能動的推論モデルに基づく孤独感研究を行う上で使えるようなトイモデルの提案になるため、環境の設定や能動的推論の生成モデルの設定にはまだ工夫が必要に思われる。ただ、`pymdp`などのパッケージを使うことで比較的容易にエージェントを作成することができるようになっていたため、今後の孤独感研究の展開につながればと期待する。

今後の展開にむけて

今回、大坪論文に触発されて、孤独感に関するABMを行う際の枠組みとして能動的推論モデルの提案とシンプルなトイモデルを提示した。今回はあくまでトイモデルの動作を確認した程度になり、社会心理学研究(横田・中西, 2012)で行われてきたような進化シミュレーションは実施できていない。進化論と対応付けていくうえでは、進化シミュレーションを行うことも必要になるだろう。今回 `github` リポジトリでコードを共有したので、任意に設定を変更することで孤独感のモデル開発やシミュレーションに利用することができる。提案したモデルは、通常のABMではなく、認知モデル(能動的推論)を含んだ認知エージェントモデルであった。認知エージェントモデルを用いることで、孤立に対する行動だけでなく、エージェント内の変化についても扱うことができる。慢性孤独感の研究のためにエージェントの設定を

するだけでなく、慢性孤独感からうつ病をはじめとする精神障害につながるメカニズムについても検討ができるかもしれない。うつ病は、自律神経系、代謝、免疫系の活動が活発化し、それらの内受容信号の予測誤差を適切に処理することができず、自己効力感や気力の低下を招くとの仮説もある(Barrett, Quigley, & Hamilton, 2016)。孤独感に伴う内受容感覚の変化から自己効力感や気力の低下が生じ、うつ病につながるという可能性もあり、このような仮説についても検討する枠組みとなるかもしれない。

孤独感是有病率や多方面への影響の大きさから臨床心理学において取り組む必要のある重要な課題になる。新たに孤独感研究に取り組む際には、大坪論文から孤独感の適応性について理解を深めた上で臨床心理学研究を進めることが重要と思われる。さらに、理論と実証研究をつなぎ、仮説の生成において計算論的精神医学の枠組みを使って、新たな研究が展開されることを期待する。

文 献

- Barrett, L. F., Quigley, K. S., & Hamilton, P. (2016). An active inference theory of allostasis and interoception in depression. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 371, 20160011.
- Conte, R., & Paolucci, M. (2014). On agent-based modeling and computational social science. *Frontiers in Psychology*, 5, 668.

- Do, K. T., Paolizzi, S. G., & Hallquist, M. N. (2024). How adolescents learn to build social bonds: A developmental computational account of social explore-exploit decision-making. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 69, 101415.
- Heins, C., Millidge, B., Demekas, D., Klein, B., Friston, K., Couzin, I., & Tschantz, A. (2022). pymdp: A Python library for active inference in discrete state spaces. *Journal of Open Source Software*, 7, 4098.
- Hofmann, S. G., Hayes, S. C., & Lorscheid, D. N. (2021). *Learning Process-Based Therapy A Skills Training Manual for Targeting the Core Processes of Psychological Change in Clinical Practice*. Oakland, CA: New Harbinger Publications. 菅原大地・檜原 潤・伊藤正哉（監訳）（2023）プロセス・ベースド・セラピーをまなぶ：「心の変化のプロセス」をターゲットとした統合的ビジョン 金剛出版.
- 国里愛彦（2018）臨床心理学と認知モデリング 心理学評論, 61, 55–66.
- 国里愛彦・片平健太郎・沖村 宰・山下祐一（2019）計算論的精神医学：情報処理過程から読み解く精神障害 勁草書房.
- Nesse, R. M. (2019). *Good Reasons for Bad Feelings: Insights from the Frontier of Evolutionary Psychiatry*. London: Dutton. 加藤智子（訳）（2021）なぜ心はこんなに脆いのか：不安や抑うつ心の進化心理学 草思社.
- Parr, T., Pezzulo, G., & Friston, K. J. (2022). *Active Inference: The Free Energy Principle in Mind, Brain, and Behavior*. Cambridge, MA: MIT Press. 乾 敏郎（訳）（2022）能動的推論：心、脳、行動の自由エネルギー原理 ミネルヴァ書房.
- Park, C., Majeed, A., Gill, H., Tamura, J., Ho, R. C., Mansur, R. B., ... McIntyre, R. S. (2020). The effect of loneliness on distinct health outcomes: A comprehensive review and meta-analysis. *Psychiatry Research*, 294, 113514.
- 宗田卓史・遠山朝子・国里愛彦・沖村 宰・片平健太郎・山下祐一（2025）R/Pythonではじめる計算論的精神医学 金芳堂.
- Surkalim, D. L., Luo, M., Eres, R., Gebel, K., van Buskirk, J., Bauman, A., & Ding, D. (2022). The prevalence of loneliness across 113 countries: systematic review and meta-analysis. *BMJ*, 376, e067068.
- 塚崎崇史・亀田達也（2004）社会心理学におけるエージェント・ベースド・モデルの可能性 理論と方法, 19, 37–51.
- 横田晋大・中西大輔（2012）集団間葛藤時における内集団協力と頻度依存傾向：進化シミュレーションによる思考実験 社会心理学研究, 27, 75–82.

— 2025. 6. 11 受理 —