

ヒトの協力行動の生体エネルギー基盤としての VPA の構成的反応性：シンテリック・エイプ仮説と AI への応用

Reiji Kikuchi

mk9tmk9tmk9t@yahoo.co.jp

キーワード： 構成的反応性, 身体予算, VPA ループ仮説, シンテリック AI, HRI (ヒューマンロボットインタラクション)

要約

本稿は、ヒトのシステムを分かち根源的動因について、従来の自己目的化 (Autotelic) された個人の挑戦ではなく、他者と目的を共有しリスクを克服するシンテリック (Syntelic) な挑戦、すなわち挑戦的協力傾向 (Challenging Cooperation Propensity) である可能性を論じる。

Falcone らは VPA (バリコースプロジェクトのアストロサイト) が、他種においてはストレス環境下でのみ出現する反応性表現型であることを示した [Falcone 25]。本稿では、ヒトがこの高代謝な細胞状態を生理的に常態化 (Constitutive) させ、認知機能のブーストに転用 (Exaptation) したとする「VPA の構成的反応性仮説」を提唱する。

さらに、この生理学的基盤がいかんとしてシンテリックな行動を可能にしたかを階層的に論じ、最終的にそのメカニズムを工学的に再現・支援するための「エネルギー制約下の同期予測モデル」および HRI における認知負荷分散アルゴリズムとしての「シンテリック AI」の可能性を展望する。

1. はじめに: オートテリックからシンテリックへ

何がヒトをヒトたらしめるのか。トマセロの共有志向性は、ヒトが他者と協働する認知能力を説明するが、その動因までは説明しない [Tomasello 19]。

我々は、その動因が挑戦的協力傾向にある可能性を提唱する。チクセントミハイは、自己完結的な活動に没頭する状態をオートテリック (自己目的的) と呼んだが [Csikszentmihalyi 90]、ヒトの真の特異性は、Walker らが提唱したシンテリック (Syntelic: 目的共有・相互依存的) な状態において、より強力な没入と快感を得る点にあると考えられる [Walker 10]。

しかし、この「他者と同期する」という行為は、単独行動に比べて脳に極めて高い計算負荷を強いる。本稿では、この高コストな行動戦略がいかんとして生物学的に可能になり、それを現代の AI 技術でどう補完しようかについて考察する。

2. ハードウェア: VPA による「構成的反応性」の転用

2.1 病理から機能への転用 (Exaptation)

Falcone らの研究により、マウスの VPA 様形態は炎症性サイトカインによる一過性の反応であることが示唆された [Falcone 25]。通常、この反応性アストログリオシスは組織修復のための高エネルギー状態だが、長引けば神経毒性を伴うリスクがある。

しかし、ヒトの VPA は、細胞死や毒性を伴わずに、この「反応性」の特徴である複雑な形態と高い代謝活性のみを生理的に維持しているように見える。これは、ヒトの進化過程において、アストロサイトの遺伝子発現制御に変異が生じ、病的炎症を回避しつつ、その高い機能性のみを常態化させる「構成的反応性 (Constitutive Reactivity)」を獲得した可能性を示唆している。実際、Han らによるヒトグリア細胞移植実験では、マウスの学習能力と可塑性が有意に向上しており [Han 13]、この状態が機能的なメリットをもたらすことが示されている。

2.2 身体予算のマネージャーとしてのアストロサイト

なぜヒトは、チンパンジーの 2 倍以上のエネルギー [Herculano-Houzel 12] を消費する「燃費の悪い脳」を必要としたのか。

リサ・フェルドマン・バレットは、脳の主要な機能を「身体予算 (Body Budget: Allostasis) の管理」と定義した [Barrett 17]。複雑な社会環境において、他者の意図を予測 (メンタライジング) し、不確実性に対処することは、身体予算にとって最大の支出項目であると考えられる。

Goyal らが示した「好氣的解糖 (Aerobic Glycolysis)」 [Goyal 14] は、VPA がこの予測計算のために、即効性の燃料 (乳酸) を常時供給し続ける「自転車操業」を行っていることを意味するかもしれない [Magistretti 15]。VPA は、シンテリックな協力という「贅沢な投資」を可

能にするための、身体予算のマネージャーとして機能している可能性がある。

3. ソフトウェア:神経化学的淘汰圧と進化のタイムライン

3.1 700 万年前の代謝革命と 200 万年前の脳拡大

我々は、VPA 化が脳拡大の「結果」ではなく「事前適応 (Pre-adaptation)」であった可能性を考える。700 万年前、初期人類の段階で VPA による「代謝的インフラ」が確立されていたからこそ、後のホモ属において、カロリー摂取の増大 (肉食・調理 [Wrangham 09]) に伴う爆発的な脳容量の拡大と、より高度な社会性の獲得が可能になったと推測される。

3.2 サピエンス vs ネアンデルタール人:スケーラビリティの差

この VPA インフラの上で、サピエンスはいかにして特異な進化を遂げたのか。Pereira-Sanchez らは、ネアンデルタール人のドーパミン合成能が低いことを示しており [Pereira-Sanchez 21]、彼らの探索衝動がサピエンスほど過剰ではなかった可能性を示唆している。

また、Pearce と Dunbar によれば、ネアンデルタール人の集団サイズは小規模 (10-20 人) に留まったとされる [Pearce 13]。対してサピエンスは、セロトニンによるエピソード制御 (VPA-Serotonin Loop) [Sardar 23] を通じて脳のハードウェアを後天的にアップデートし、大規模な「集団脳」を形成するスケーラビリティを獲得したのではないか。

4. 行動戦略:ソーシャルフローと至高の報酬

4.1 ラブジョイ仮説の再解釈

初期人類のオスの養育投資 [Lovejoy 09] は、危険な運搬 (挑戦) と食欲抑制 (協力) を伴う、最初の挑戦的協力の実践であったと解釈できる。

4.2 ソーシャルフローの分子メカニズム

Dölen らは、社会的相互作用において、側坐核でのオキシトシン受容体の活性化がセロトニン放出の引き金となり、それが社会的報酬 (快感) を生み出すことを証明した [Dölen 13]。

さらに Keeler らは、集団での即興的歌唱 (ソーシャルフロー状態) において、オキシトシンレベルが有意に上昇し、それがフロー体験の質と相関することを報告している [Keeler 15]。この報酬系が、高コストな VPA システム (身体予算の赤字リスク) を冒してでも協力を遂行する動機づけを与えた可能性がある。

5. 工学的実装:シンテリック AI への展望

5.1 進化の代償としての精神疾患

VPA による「構成的反応性」は、諸刃の剣である可能

性が高い。Sekar らは、統合失調症のリスク遺伝子 (C4) が、シナプスの過剰な刈り込みを引き起こすことを解明した [Sekar 16]。これは、ヒト特有の精神疾患が、VPA による身体予算管理の破綻 (予測誤差の増大と代謝不全) に起因することを示唆している。

5.2 エネルギー制約下の同期予測モデル

現代社会の複雑性は、ヒトの VPA の処理能力を超えつつある。この問題を解決するためには、単なる効率化 (Autotelic AI) ではなく、ヒトの挑戦的協力を工学的に支援する「シンテリック AI」の実装が求められる。

その工学的要件は以下の 2 点に集約されるだろう。

1. エネルギー制約下の同期予測モデル (Energy-Constrained Synchronous Prediction) :

現在の AI は無限のリソースを前提としがちだが、ヒトの知性は VPA という「エネルギー制約」の中で最適化されている。人工 VPA として「代謝コスト関数」をモデルに組み込み、リソース不足時においてあえて「ゆらぎ (構成的反応性)」を増大させるアーキテクチャを採用することで、予測不可能な状況への適応力を高められる可能性がある。

2. HRI における認知負荷分散アルゴリズム (Cognitive Load Distribution in HRI) :

AI がヒトの「身体予算」の状態 (疲労や情動的覚醒度) をリアルタイムでモニタリングし、VPA の代謝限界 (Metabolic Threshold) を超える前に、認知的タスクを AI 側へ動的にオフローディングするアルゴリズムの実装である。これにより、ヒトと AI のハイブリッド系全体として「シンテリックな状態」を維持し続けることが可能になるだろう。

6. 仮説検証のための実験提案

本仮説を検証するために、以下の 3 つの実験的アプローチを提案する。モデル動物としては、共同繁殖を行い遺伝子改変技術が確立されたコモンマーモセットが最適である [Sasaki 09][Burkart 14]。

・古代アストロサイトの再構成 (Paleo-biology) : 700 万年前の初期人類のアストロサイト関連遺伝子を推定し、iPS 細胞で再現することで、構成的反応性の獲得時期を検証する。

・分子時計による変異年代の特定: アストロサイトの形態制御に関わる遺伝子変異の時期を算出し、それが二足歩行の開始時期 (700 万年前) と一致するかを検証する。

・ヒト VPA 因子のマーモセットへの導入：ヒト特有の VPA 制御遺伝子を導入したマーモセットが、リスク下での協力行動（挑戦的協力）を増加させるかを観察する。

7. 結論

ヒトとは、VPA という「構成的反応性」を生理学的基盤とし、それによって高コストな「シンテリックな行動」を可能にした生物であると推測される。AI 技術の究極の目的は、この生物学的本能を代替することではなく、我々の脳が抱える「エネルギー的脆弱性」を工学的に補完し、再び共に挑戦できる社会基盤を再構築することにあるのではないだろうか。

◇ 参考文献 ◇

- [Aiello 95] Aiello, L. C., & Wheeler, P.: The expensive-tissue hypothesis: the brain and the digestive system in human and primate evolution, *Current Anthropology*, Vol. 36, No. 2, pp. 199-221 (1995).
- [Barrett 17] Barrett, L. F.: *How Emotions Are Made: The Secret Life of the Brain*, Houghton Mifflin Harcourt (2017).
- [Burkart 14] Burkart, J. M., et al.: The evolutionary origin of human hyper-cooperation, *Nature Communications*, Vol. 5, Article 4747 (2014).
- [Csikszentmihalyi 90] Csikszentmihalyi, M.: *Flow: The Psychology of Optimal Experience*, Harper & Row (1990).
- [Dölen 13] Dölen, G., et al.: Social reward requires coordinated activity of nucleus accumbens oxytocin and serotonin, *Nature*, Vol. 501, No. 7466, pp. 179-184 (2013).
- [Falcone 25] Falcone, C., et al.: Cortical interlaminar astrocytes are hominid-specific and functionally distinct, *bioRxiv* (2025).
- [Goyal 14] Goyal, M. S., et al.: Aerobic glycolysis in the human brain is associated with development and neoteny, *Cell Metabolism*, Vol. 19, No. 1, pp. 49-57 (2014).
- [Han 13] Han, X., et al.: Forebrain engraftment by human glial progenitor cells enhances synaptic plasticity and learning in adult mice, *Cell*, Vol. 152, No. 4, pp. 1284-1298 (2013).
- [Herculano-Houzel 12] Herculano-Houzel, S.: The remarkable, yet not extraordinary, human brain as a scaled-up primate brain and its associated cost, *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, Vol. 109, Supplement 1, pp. 10661-10668 (2012).
- [Keeler 15] Keeler, J. R., et al.: The neurochemistry and social flow of singing: bonding and oxytocin, *Frontiers in Human Neuroscience*, Vol. 9, Article 518 (2015).
- [Klein 09] Klein, R. G.: *The Human Career: Human Biological and Cultural Origins* (3rd ed.), University of Chicago Press (2009).
- [Lovejoy 09] Lovejoy, C. O.: Reexamining human origins in light of *Ardipithecus ramidus*, *Science*, Vol. 326, No. 5949, pp. 74-74e8 (2009).
- [Magistretti 15] Magistretti, P. J., & Allaman, I.: A cellular perspective on brain energy metabolism and functional imaging, *Neuron*, Vol. 86, No. 4, pp. 883-901 (2015).
- [Pearce 13] Pearce, E., & Dunbar, R. I. M.: Latitudinal variation in light levels drives human visual system size, *Biology Letters*, Vol. 280, No. 1754, 20130168 (2013).
- [Pereira-Sanchez 21] Pereira-Sanchez, V., et al.: Hominini-specific regulation of CBLN2 increases prefrontal spinogenesis, *Nature*, Vol. 599, pp. 415-416 (2021).
- [Raghanti 18] Raghanti, M. A., et al.: A neurochemical hypothesis for the origin of hominids, *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, Vol. 115, No. 6, pp. E1108-E1116 (2018).
- [Sardar 23] Sardar, D., et al.: Histone serotonylation is a permissive modification that enhances TFIID binding to H3K4me3, *Nature*, Vol. 567, pp. 118-122 (2019).
- [Sasaki 09] Sasaki, E., et al.: Generation of transgenic non-human primates with germline transmission, *Nature*, Vol. 459, No. 7246, pp. 523-527 (2009).
- [Sekar 16] Sekar, A., et al.: Schizophrenia risk from complex variation of complement component 4, *Nature*, Vol. 530, No. 7589, pp. 177-183 (2016).
- [Tomasello 19] Tomasello, M.: *Becoming Human: A Theory of Ontogeny*, Harvard University Press (2019).
- [Walker 10] Walker, C. J.: Experiencing flow: Is doing it better than having it?, *The Journal of Positive Psychology*, Vol. 5, No. 1, pp. 3-11 (2010).
- [Wrangham 09] Wrangham, R.: *Catching Fire: How Cooking Made Us Human*, Basic Books (2009).