

シンテリック・エイプ仮説：二足歩行と火の利用に伴う睡眠・代謝の進化と、次世代画像解析を用いた VPA 超回復モデルの新たな検証プロトコル

Reiji Kikuchi

mk9tmk9tmk9t@yahoo.co.jp

キーワード： VPA, レム睡眠, 持続的・挑戦的協力, 共局在, 進化人類学

要約

本稿は、筆者が提唱する「シンテリック・エイプ仮説」を発展させ、人類特有のレム睡眠（Rapid Eye Movement sleep）の延長と、VPA（Varicose Projection Astrocytes：静脈瘤状投射アストロサイト）の進化を生態学的観点から再考する試みである。人類が二足歩行によって得た持久力を、いかにして社会的な「持続的・挑戦的協力」へと機能転用したかという可能性を探り、さらにその進化的ミスマッチが現代社会にもたらし得る「脳の窒息」の危険性について考察を加える。また、睡眠中のニューロン成長とアストロサイトの局所動態の「共局在」に着目し、次世代画像解析アルゴリズム（AQuA 等）を統合した新たな検証プロトコルと、科学的理論としての強さを担保するための具体的な反証基準を提案する。

1. 霊長類の睡眠構造と人類の特異性

ヒトの高次認知機能の基盤を考察する上で、近縁な霊長類との睡眠構造の比較は極めて有用である。

まず、比較認知科学において確立した知見として、以下の睡眠データが挙げられる。アカゲザルの総睡眠時間は約 11～13 時間でレム睡眠割合は約 15～18% であり（Capellini ら, 2008）、チンパンジーの総睡眠時間は約 9.7 時間でレム睡眠割合は約 11～15% 程度である（Videan ら, 2001）。

一方で、現生人類は総睡眠時間が約 7.1 時間と霊長類の中で最短クラスであるにもかかわらず、レム睡眠の割合が約 22～25% と特異的に高い水準にある（Samson & Nunn, 2015）。

これらの対比から、人類独自の代謝的・環境的適応がこの極端な睡眠構造のシフトをもたらした可能性が合理的に推測される。近年、ヒト特異的な脳機能の基盤として皮質層間アストロサイト（VPA 等）が注目されているが（Falcone ら, 2025）、本稿では一つの可能性として、この VPA の進化とレム睡眠の特異的な増加が、人類の社会的知性の発達において相補的に作用したという作業仮説を提案する。

なお、人類の進化は言語や文化、社会構造、前頭葉の拡大、食性の変化など、多数の要因が複雑に絡み合うプロセスである。本稿は人類進化を単一要因で説明するものではなく、その多因子モデルの中で VPA が果たす役割を、一つの検証可能な仮説として検討するものである。

2. 二足歩行と火の利用がもたらした代謝基盤の再構築

現生人類のレム睡眠の割合が増加した理由として、以下の2つの進化的適応が複合的に作用したシナリオが考えられる。

第一に、二足歩行による広大な土地の移動と持久力（スタミナ）の獲得である。長時間の有酸素運動を可能にする生態学的シフトが、脳内におけるモノアミン神経系（ドーパミンやセロトニン等）の発達基盤を整えたというのは、進化人類学における一つの有力な進化学的解釈である。

ここから導き出される一つの合理的な推測として、人類は過酷なサバンナを生き抜くために集団での高度な連携が必須となった際、獲物を追い続けるための「身体的な持久力」を、複雑な人間関係を維持するための「認知的持久力」へと機能転用した可能性が考えられる。すなわち、自己の利己的な衝動を抑え、他者の意図を読み続けるという莫大な認知負荷に耐えうる「持続的・挑戦的協力（Sustained Challenging Cooperation）」を獲得したのではないかと仮説である。

この持続的な社会的過負荷は、脳内炎症やネットワークの萎縮を引き起こす病理ともなり得るが（Slavich & Irwin, 2014; Setiawan ら, 2015）、本稿における大胆な仮説として、ヒトの VPA はこの高負荷を機能的に利用し（Kondev ら, 2026）、好氣的解糖を通じて夜間の超回復

に必要なバイオマス（代謝建材）を日中のうちに蓄積する独自のシステムを構築したのではないかと提案する（Pellerin & Magistretti, 1994）。

第二に、火の獲得による消化エネルギーの節約と安全の確保である。人類が火を日常的に使用し、地上での安全なキャンプを獲得したことで捕食リスクを低減させ、睡眠効率を向上させる環境的基盤を得たことは、考古学・人類学において広く支持されている知見である（Wrangham, 2009; Samson & Nunn, 2015）。

さらに、加熱調理は食物の消化にかかる生体負荷を大幅に削減した。本稿ではここから一步踏み込み、肉体修復に充てられていた深いノンレム睡眠の必要性が相対的に減少し、削られた睡眠時間の予算が、高度な社会的ネットワークの維持を伴うレム睡眠（脳の超回復）へと再分配された可能性があるというシナリオを推測する。

3. ニューロンの成長と D-セリン放出メカニズムに基づく局所配線の仮説

本仮説のミクロな生理学的妥当性を検討するため、知見、推測、仮説を分子・細胞レベルで整理する。

まず、生体イメージングの長期観察により、睡眠が学習後のニューロンにおける樹状突起スパインの物理的な形成（構造的可塑性）を直接的に促進すること（Yang ら, 2014）、およびこのシナプスの成長（長期増強）には、アストロサイトからの D-セリン等の放出が必須であること（Henneberger ら, 2010）は、現代の神経科学において確立した知見である。

また、アストロサイトのカルシウム (Ca^{2+}) 活動には、細胞全体に広がるマクロなカルシウムウェーブと、極細い突起の先端で局所的に生じるマイクロドメイン（カルシウムスパーク）が存在する。睡眠中にはマクロな活動が低下する一方で、マイクロドメインにおける局所的なスパークは特定のシナプス活動と連動して活発に発生し続けている（Ingiosi ら, 2020）。この事実から、睡眠中のシナプス選別は、脳全体を一斉に興奮させることなく、局所的なマイクロドメインの活性化を通じて精密に制御されていると考えられる。

これらを踏まえ、本稿は一つの可能性として以下の作業仮説を提示する。通常のアストロサイトも D-セリンを放出する既存機構を有しているが、ヒト特異的な VPA はこの既存機構を大幅に拡張した可能性が考えられる。すなわち、その特徴的な長い静脈瘤状の投射突起を活かし、細胞全体を巻き込むウェーブを起こすことなく、離れた複数のシナプスに対して同時に同調したマイクロドメインのスパークを起こし、特定の複雑な社会認知回路へピンポイントに D-セリンを投下できる「多重局所統合システム」として進化したのではないかと。もしこの機構が存在するならば、人類は巨大化した複雑な脳内ネットワークを混線させることなく、夜間に超回復・最適化させる能力を獲得した可能性がある。

4. 次世代画像解析を用いた新たな実験的検証モデルの提案

上述の階層的仮説を実証するため、次世代画像解析アルゴリズム「AQuA（Astrocyte Quantitative Analysis）」（Wang ら, 2019）を中心とした検証プロトコルを提案する。

4.1 重点的な定量指標

AQuA を用いて、以下の 3 つの指標を重点的に定量する。

① 空間的な広がり（Spatial Extent）：1 回のスパークがどれだけの体積に広がるかを測定し、ヒト VPA が離れた局所イベントを同期させる機構として働いているかを検証する。

② イベントの持続時間（Duration）：VPA のスパーク持続時間がマウスよりも有意に長ければ、広域なネットワークを物理的に固定するためにより長い作業時間を確保していることの傍証となり得る。

③ イベントの複雑さ（Morphological Complexity）とネットワーク統合：PGO 波（Pontine-Geniculo-Occipital wave：橋・膝状体・後頭葉波）によるランダムな発火活動が生じる際、離れた静脈瘤間での高度に同期した発火（Co-activation）が観察されると予測される。さらに、単なる同時活動にとどまらず、機能的結合（Functional connectivity）やグラフ理論に基づくネットワークモジュール性（Network modularity）の解析を導入することで、VPA が意味のある複数の結合を選び取って統合しているかを定量的に検証する。

4.2 統合解析パイプラインによる共局在のマッピング

レム睡眠中に持続的な局所スパークが起きていることを確認するため、2 波長同時 2 光子カルシウムイメージングを用い、ニューロン側の活動（赤色）と VPA の活動（緑色）の空間的な重なりをマッピングする。VPA の時空間ダイナミクスは AQuA を用いて抽出し、ニューロンの発火は Suite2p（Pachitariu ら, 2016）等の専用アルゴリズムを用いて抽出した上で、両者のデータを統合したカスタムパイプラインを用いてピクセル単位での共局在を厳密に解析する手法を採用する。

4.3 比較検証モデルの構築

以上の指標と解析パイプラインを用い、野生型マウスのデータ（Phase 1）と、ヒト化キメラマウス（Han ら, 2013）のデータ（Phase 2）を直接比較する。

4.4 本仮説の反証可能性と棄却条件

本仮説（シンテリック・エイブ仮説および VPA 超回復モデル）が科学的理論としての強度を保つため、以下の

いずれかの実験結果が得られた場合、本仮説は部分的、あるいは根本的に棄却（否定）されるものと定義する。

① VPA の時空間ダイナミクスにおける有意差の不検出（根本的棄却）

ヒト化キメラマウスにおける VPA の Ca^{2+} マイクロドメインの活性（空間的広がり、持続時間、離れた突起間での機能的結合）が、野生型マウスの通常のアストロサイトと比較して、レム睡眠中において統計的に有意なスケール拡張や同調性を示さなかった場合。

② D-セリン局所放出と構造的可塑性の無相関（部分的棄却）

2 波長同時イメージングにおいて、VPA の局所スパーク発生部位と、ニューロンの構造的可塑性（新生スパインの形成）および D-セリンの局所的共局在との間に、統計的に有意な空間的・時間的相関が認められない場合。

③ 社会的過負荷と VPA 代謝シグナルの乖離（仮説モデルの棄却）

持続的・挑戦的協力を模倣した認知負荷（社会的相互作用タスク）を課したモデル動物において、日中の好気的解糖の亢進、およびそれに伴う夜間の超回復（シナプス最適化や認知機能の回復）のプロセスが、VPA の Ca^{2+} 活動や代謝制御を阻害した群と通常群との間で有意な差を生じなかった場合。

5. 現代社会への考察：進化学的ミスマッチと「脳の窒息」

最後に、進化医学の視点から現代社会が抱える病理について考察する。

テクノロジーの発達に伴う運動不足が、人類本来の代謝バランスを崩し、様々な現代病を誘発しているという現象は、進化的ミスマッチ（Evolutionary Mismatch）の典型例としてすでに確立した知見である。

この知見をベースに、本稿は社会的認知の領域における大胆な作業仮説を提示する。

もし人類が「持続的・挑戦的協力」を進化的に獲得したのであれば、その莫大な認知的負荷（日中の泥臭い社会的摩擦）が、VPA への代謝バイオマス蓄積のトリガーとして働いた可能性がある。しかし、他者との摩擦や認知的な負荷を極限まで排除した現代の「摩擦なき社会」においては、日中の認知的な挑戦的協力の機会が激減している。

本仮説が正しいならば、結果として VPA はレム睡眠中にネットワークを統合するためのトリガーと蓄積すべき建材を失うリスクが生じる可能性がある。便利で摩擦のない社会環境が、皮肉にも人類最大の発明である社会的脳の超回復メカニズムを機能不全に陥らせる、この「脳の窒息」という危機的状況のメカニズム解明に、本検証

プロトコルが寄与することを期待する。

6. 結論

本稿では、人類は二足歩行による持久力の獲得と火の利用を通じて、睡眠の代謝的予算を身体から脳へとシフトさせた可能性があるという進化シナリオを提案した。このシナリオに基づくならば、VPA によるレム睡眠中の超回復メカニズムは、高度な社会性を維持するための「持続的・挑戦的協力」への適応として進化した可能性があり、次世代の画像解析パイプラインによる定量比較によって、その実態が科学的に検証され得ると考えられる。

同時に、本稿が提示した具体的な棄却条件（反証可能性）に基づく実証プロセスを経ることで、本仮説は単なる進化的シナリオにとどまらず、検証可能な科学的理論としての妥当性を評価されることになる。我々はこの精巧な睡眠メカニズムが現代の環境変化によって「窒息」の危機に直面しつつあるという仮説的なリスクに対しても、多角的な実証研究を通じて向き合う必要があるだろう。

◇ 参考文献 ◇

- Bojarskaite, L., Bjørnstad, D. M., Pettersen, S. R., et al. (2020). Astrocytic calcium signaling is reduced during sleep and is involved in the regulation of slow wave sleep. *Nature Communications*, 11, 3240.
- Capellini, I., Barton, R. A., McNamara, P., Preston, B. T., & Nunn, C. L. (2008). Phylogenetic analysis of the ecology and evolution of mammalian sleep. *Evolution*, 62(7), 1764-1776.
- Datta, S. (1997). Cellular basis of pontine ponto-geniculo-occipital wave generation and modulation. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 53(4), 382-399.
- Everson, C. A., Bergmann, B. M., & Rechtschaffen, A. (1989). Sleep deprivation in the rat: III. Total sleep deprivation. *Sleep*, 12(1), 13-21.
- Falcone, C., et al. (2025). Cortical interlaminar astrocytes are hominid-specific and functionally distinct. *bioRxiv*.
- Han, X., Chen, M., Wang, F., et al. (2013). Forebrain engraftment by human glial progenitor cells enhances synaptic plasticity and learning in adult mice. *Cell Stem Cell*, 12(3), 342-353.
- Henneberger, C., Papouin, T., Oliet, S. H., & Rusakov, D. A. (2010). Long-term potentiation depends on release of D-serine from astrocytes. *Nature*, 463(7278), 232-236.
- Ingiosi, A. M., Hayworth, C. R., Harvey, D. O., et al. (2020). A Role for Astroglial Calcium in Mammalian Sleep and Sleep Regulation. *Current Biology*, 30(22), 4373-4383.e7.
- Kondev, V., et al. (2026). Cortical astrocytes control stress resilience. *bioRxiv*.
- Pachitariu, M., Stringer, C., Dipoppa, M., Rossi, L. F., Carandini, M., & Harris, K. D. (2016). Suite2p: beyond 10,000 neurons with standard two-photon microscopy. *bioRxiv*.

- Paukert, M., Agarwal, A., Weingart, J., et al. (2014). Norepinephrine controls astroglial responsiveness to local circuit activity. *Neuron*, 82(6), 1263-1270.
- Pellerin, L., & Magistretti, P. J. (1994). Glutamate uptake into astrocytes stimulates aerobic glycolysis: a mechanism coupling neuronal activity to glucose utilization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 91(22), 10625-10629.
- Raichle, M. E. (2015). The brain's default mode network. *Annual Review of Neuroscience*, 38, 433-447.
- Samson, D. R., & Nunn, C. L. (2015). Sleep intensity and the evolution of human cognition. *Evolutionary Anthropology*, 24(6), 225-237.
- Setiawan, E., Wilson, A. A., Mizrahi, R., et al. (2015). Role of translocator protein density, a marker of neuroinflammation, in the brain during major depressive episodes. *JAMA Psychiatry*, 72(3), 268-275.
- Slavich, G. M., & Irwin, M. R. (2014). From stress to inflammation and major depressive disorder: a social signal transduction theory of depression. *Psychological Bulletin*, 140(3), 774-815.
- Videan, E. N., Fritz, J., Hirt, D. O., & Bement, T. (2001). Sleep in captive chimpanzee (*Pan troglodytes*). *American Journal of Primatology*, 54(4), 225-236.
- Wang, Y., Del Rosario, M., Volkow, N. D., & Khakh, B. S. (2019). Accurate quantification of astrocyte and intracellular calcium dynamics. *Nature Neuroscience*, 22(8), 1346-1355.
- Wrangham, R. (2009). *Catching Fire: How Cooking Made Us Human*. Basic Books.
- Yang, G., Lai, C. S. W., Cichon, J., Ma, L., Li, W., & Gan, W. B. (2014). Sleep promotes branch-specific formation of dendritic spines after learning. *Science*, 344(6188), 1173-1178.