

進化してきた脳と生成 AI の現在と未来

Generative AI from the Perspective of the Evolutionary Process of the Biological Brain: A Review of the Present and Speculation on the Future.

坪田裕司¹⁾

¹⁾ 大阪河崎リハビリテーション大学：大阪府貝塚市水間 158 番地（〒 597-0104）

Yuji Tsubota¹⁾

¹⁾ *Osaka Kawasaki Rehabilitation University: 158 Mizuma, Kaizuka-city, Osaka 597-0104, Japan*

要旨：2023 年 9 月現在、生成人工知能（Generative Artificial Intelligence、生成 AI）は人間並みの返答を出力するようになった。この論文では、その概要を整理し、脳の構造と比較し、その現状を脳の進化の視点から評価することで、将来的に期待される汎用人工知能への展開について考察した。生成 AI はこれまで人類がインターネット上等に出力してきた、主にテキストと画像の大量データを取り込んだニューラルネットワークを基盤としている。ChatGPT(GPT-3)では 1750 億個というパラメーター数の規模となり、幾多の学習機構を通すことで大規模言語モデルとして実用レベルになった。学習後には、モデル内部では膨大な特徴量からなる回路が出来上がる。その多数が入力に対するパターンとして選ばれ、最終出力が生成される。現時点では質問文章に対して一見自然な文章出力が可能となっている。しかしながら、まだ言語の概念化ができないので対応できる範囲が限られる。一方、生体の脳は進化過程で基礎回路と言語能力を発達させた新皮質を獲得してきた。個体としては、現実世界に合わせて試行錯誤しながら学習成長して、特有の文化や言語も身につけて成体のヒト脳となる。基本設計をよくして学習を重ねて進歩できる AI は、将来的には入力内容とその処理をさらに多様にして、人と同じような概念も理解する世界モデルを獲得する可能性があるようである。

キーワード：生成 AI、脳、進化、汎用性人工知能

ABSTRACT : Generative artificial intelligence (AI) can now output human-like responses. This paper summarizes generative AI, evaluating its current status from the viewpoint of brain evolution by comparing it with the structure of the human brain. We summarize the issues that require resolution before generative AI can develop into general-purpose AI (artificial general intelligence, AGI) with discussion of reference information that can be obtained from the evolutionary process of living organisms. Generative AI is based on neural networks that incorporate a large amount of data, mainly text and images, that has been output to the Internet. In ChatGPT, for example, the number of parameters has grown to 175 billion, and through numerous learning mechanisms it has now reached a widely-applicable level as a large-scale language model. After learning, a circuit consisting of a huge number of features is created within the model. Many of these features are recognized to be patterns related to the input, and from this the final output is generated. Generative AI can now produce seemingly natural sentence output in response to questions. However, the scope of what can be done remains limited because language cannot yet be fully conceptualized. During the evolutionary process, the human brain has acquired a neocortex that has developed basic circuitry and language skills. In the development of a human brain, an individual learns and grows through trial and error to adapt to the real world, and in doing so acquires a unique culture and language. Eventually, AGI will perhaps understand concepts in a similar way to humans, although as discussed in this article, certain doubts remain.

Key words : Generative Artificial Intelligence; brain; evolution; artificial general intelligence

¹⁾ 坪田裕司 Yuji Tsubota

E-mail : tsubotay@kawasakigakuen.ac.jp

受付日 2023 年 9 月 25 日 受理日 2024 年 1 月 15 日

Received Sep. 25, 2023. Accepted Jan. 15, 2024.

1. はじめに

生成人工知能（Generative Artificial Intelligence、以下、生成 AI）が急激に進化している。日々の変化が激しいので、2023年9月現在の状況として考察した。生成された AI は、これまでの逐次処理や条件分岐といったプログラムの開発とは大きく異なる原理で開発された。利用できる環境、CPU の能力、メモリ、容量等の進歩があったとは言え、これまでの通常の（古い）プログラムの上で動くものは、逐次処理的プログラムで指示されたルールに従い実行され、結果も決められた通りに出力する自動実行的なものであった^{*1}。しかし、新しい生成 AI は、ニューラルネットワークの考えをベースに構築され、数年前では想定すらできなかった規模の量のデータをもとに回路を学習させることで、ようやく「人間並の」受け答えをし、文章や画像を生成できるレベルに達し格段に発展してきた。

この論文は、現在急速に進化している生成 AI の現状を整理し、生物の脳の仕組みと比較する。ChatGPT を含む生成 AI 系については、関連論文をはじめ、その仕組みやモデルの説明などすでに正書もあり解説もされている。後述する深層学習の進化により得られる出力が「人間並み」になってきたことを契機として、改めて脳科学と人工知能を対比して考える論文が出始めている。しかし、それらを脳の進化の視点から考察し総合的に論じた文献はまだ見当たらない。そこで、ここまで進化した生成 AI と、生物の適応戦略の結果として進化してきた成果物であるヒトの脳との対比を試み考察することがこの論文の目的である。また、脳と AI の両者を総合的に考察して論ずることで、現実味を帯びてきた人工知能の将来目標である汎用人工知能（AGI; Artificial General Intelligence）への距離感も含めて考察したい。

もちろん急速に日々進化する生成 AI の現場をこの時点で評価したところで、2ヶ月後にはすっかり様変わりしている可能性の方が高いと思われるが、現時点のランドマークとしての俯瞰であることをご容赦いただきたい。

2. 生成 AI とは？

2.1 生成 AI の登場

近年公表される生成 AI の能力が飛躍的に進歩しており、高い応答能力を示す AI も増えてきた。第1に、このところ一般にも利用が可能となった生成 AI の中で、2022年11月末に OpenAI 社がリリースした対話に特化した言語モデルである ChatGPT¹⁾ を主に説明し、現在用いられ

ている大規模言語モデルについて、脳の進化から見た特徴を整理する。言語モデルとは人間の言語を単語の出現確率を用いてモデル化したもので、確率分布で示される。最近ではニューラルネットワークを用いた言語モデルであるニューラル言語モデルが主流で、自然言語処理の分野で広く使われている。その元となるデータの規模に応じて、明確な基準は見当たらないが、主にインターネット上で収集された数億語のテキストデータ、数テラバイトのデータを利用したものが大規模言語モデルと言われている。

2022年夏頃から利用が盛んになった画像生成 AI、Stable Diffusion^{*2}をはじめとして2023年9月現在、画像生成のみならず、テキスト生成系でも、ChatGPT、DALL-E2、Bard、CLIP や IBM 社の Watson など多くの生成 AI が開発され利用されている²⁾。その ChatGPT は、主に対話に特化した言語モデルであり、用いられている大規模言語モデルは、「人間並み」の応答ができ、作成される文章の完成度も高く、一般に向けて生成 AI が実用レベルに達していることを広く認めさせた。現実として、日本でもすでに若者の間で利用が盛んで、2023年6月の ChatGPT 利用調査の発表では、20代から40代の利用が多く、全体で世界3位の利用率となっている³⁾。

ChatGPT は1750億個というパラメーター数で学習しているが、ChatGPTplus として公開され利用可能な GPT-4 は、すでにマルチモーダルな対応でテキストにも画像にも対応するとされる。その内部詳細は公表されていないが、一説によるとおよそ1兆7,600億から100兆個のパラメーターを用いて訓練されているという^{4,5)}。これは単純比較ができないが、ヒトの大脳新皮質の神経細胞群をすでに超えた規模の疑似ニューラルネットである（脳との比較については後述する）。

2.2 生成 AI の概要

現状の生成 AI の工学的な解説は、松尾らをはじめとして良書と言われる本や論文がある^{6,8)} ので、ここでは後段の議論のための背景情報として簡単にまとめてみる。

大規模言語モデルは、もともと非常に巨大な学習データに深層学習を用いて構築された巨大なニューラルネットワークによる言語モデルである。深層学習では、もともと小脳の神経回路を参考にしたニューラルネットに大脳新皮質の6層構造の知見を加えた、3層程度のニューラルネットを前提にすることから始まり、入力値から結果を出力する過程を基本形として、間の接続層の重みづけを入力値と出力値（正解）に合わせて調整することが基本となる。この少数多段の回路を組んで学習を繰り返させることにより間に入る隠れ層の神経細胞に当たる各ノードの重み付けを調整し、最終的に正解となる出力層の神経ノードの興奮として自己学習ののちに結果を出せる回路を作成する構造で

^{*1} 筆者が高校生ごろに8bitマイコンが出てパーソナルコンピュータ（PC）と各種プログラミング言語というものを使い始めてニーモニック、Basic、Pascal、Hypercard、Cから現在のRまで、もっぱら利用者としての50年間ほどの印象のためやや比較が古いかも知れない。

^{*2} 現在は Stable Diffusion XL <https://stability.ai/stable-diffusion>

始まった。間違い（誤差）を逆方法に伝播するので、誤差逆伝播（Backpropagation）と呼ばれる回路も組み込まれた。ニューラルネットではシナプス接続の数や抑制性興奮性接続、各シナプスの面積、効率、反響回路等の繰り返し等の設定を変えながら回路生成が進むイメージである。これら入力ごとの特徴量を集約した、脳で言えばおばあちゃん細胞のような回路を自己学習で作らせることができるようになった。

さらに、学習効率を上げる研究の中で、隠れ層の出力を下位層にフィードバックさせる回路を増やすなどして、リカレントネットワークやその改良型である長・短記憶アーキテクチャなどが開発され進歩してきた。さらに、事前学習済みのモデルに、別のデータセットと出力層を加えてさらに追加学習することをファインチューニングと呼ぶが、特に自然言語処理分野では、事前学習済みの大規模言語モデルを、目的とするタスクに特化した学習データでファインチューニングすることにより、最終産物の高性能化を得ることができている。他にも多くの技術が開発されてきたが詳細は成書やネット情報をご覧ください。

これに、2017年にGoogle社が発表したトランスフォーマーというニューラルネットワークのアーキテクチャでは、回路を大きく2群に分け、テキスト分類解析をするエンコーダー部分と、次に続く単語を予測的に求めるデコーダー部分を組み込んだ。それにより、前述のリカレントネットワークではなく、アテンションと呼ぶ、注意を向けた部分の階層の情報だけを取り出す層を従来のネットワーク層に重ねる仕組みで、飛躍的に出力が改善されることが示された⁹⁾。これらは、元々は機械翻訳のためにテキストを意味解析して、自然言語文における長い距離の依存関係を把握するために考案されたが、これにより現在の大規模言語モデルが出来てきた。さらに、ChatGPTでは、モデルをファインチューニングした後に、実際に人間との対話を通して、強化学習を行っているといわれている^{8,10)}。

大規模言語モデルは、基本的には単語の並びが与えられると、それら単語の並びが出現する確率を計算するものであるが、ChatGPT等の大規模言語モデルは、与えられたテキストに対し後続する単語を確率的に予測し、確率が最大となる単語を出力することを繰り返し、それらの単語を繋いでいくことで違和感のないテキストを生成することができる。

これらのアーキテクチャにおいて、事前学習に用いるデータがインターネット等より大量に得られて膨大となり、また、それらを現実的な時間で計算できるリソースが得られるようになったここ数年において、得られる出力が急に精度を上げ、「人間並み」の文章を出力できるようになったのである¹¹⁾。

面白いのは、これらの大規模言語モデルは、一度学習が成立すれば、事前学習で与えられた領域のデータでなくても、幅広く対応が可能であることである。もちろん与えられ

たデータが、世の中全ての領域で人類がインターネット上にリンクしてきたニュース記事や論文、書籍、ブログやSNSの書き込みベースであるので、質問されるほとんどの領域に対応できるのは頷けるが、新領域の質問にも答えを出す。

2.3 生成 AI の進歩（AlphaGO の示したもの）

現在の生成 AI の前段階であるが、囲碁 AI において深層学習を応用した成果の一つに Google 社の作成した AlphaGo がある¹²⁾。囲碁のルールは状態分岐が多く、全ての打ち手を計算し尽くして正解を得ることは現在でも無理とされている*³⁾。AlphaGO は、ある瞬間の盤面を画像データとして入力し、最善手を選ぶ 13 層の部分と、先読みをしてその勝敗への評価値を取り込む 13 層の部分により基本システムができていますが、隠れ層らの特徴量の強化学習には、囲碁ルールの学習以降は AlphaGO 同士の対戦のみで学習を行い完成させたという。最終より強い分散処理型として、1202 個の CPU と 176 個の GPU を用いた AlphaGO がつくられ、欧州チャンピオンに 3 度輝いたファン・ファイとの数百局の対戦でも強化された。その結果、AlphaGO は囲碁棋士イ・セドル九段と全 5 局対戦し勝利した。AlphaGO は人と違い確率的に満遍なく手を検討しているが、もちろんプロも日々研鑽されているはずである。その対戦記録によると第 3 局において AlphaGO の打った黒 37 手の場所は、局面の主要な動きからは遠く離れた、イ・セドル九段だけでなく、見守るファン・ファイや欧米人で唯一囲碁の最高段位九段をもつマイケル・レッドモンドにも思いもよらないところだったという。過去の棋譜などの学習や力づくの予測アルゴリズムでの答えではなく、まさに AlphaGO の発見した妙手でありこれで対戦 3 勝目を挙げるようになった。しかしながら第 4 局でセドルは、逆に AI も予想しなかった白 78 手を打ち、AI はその手に対して対応ができず、前日の勝利手に固執してか自己崩壊してまともな手を打たず、第 4 局は AlphaGO が敗北した。これが AI 利用の可能性を示すトピックではあるが、セドルもまた人の可能性を示した記録である。

2.4 生成 AI の問題点とその克服

2016 年 AlphaGO は AI の可能性を示したが、その翌年からトランスフォーマーの組み込みも始まり、翻訳ソフトに始まった大規模言語モデルがこの段階に急成長を見せた。今や生成 AI は画像やテキスト処理において実用的に利用が可能となり、現在に至っている。もちろん、学習データがすでにインターネット等から世界的に得られる限界量に達していることで、枯渇しかけていることは問題である。また、ハルシネーションといわれる、生成 AI が事実に基づかない正しくない答えを生成する現象や、数学等の問題を解く能力が急低下することなども問題となってい

*³⁾ 筆者は全くの囲碁素人であることはおことわりしておく。

る。また、ChatGPT では、最終で出力候補に選択幅を与えているので、同じ質問にも異なる回答が出力されることもある¹³⁾。

実用のために、これらの誤りや能力低下を避けることは重要であり、当初危惧された。それでも、できるだけ正解を人間によって入力する事後学習を組み込むことである程度のレベルは維持できるようなのである。ここ数年では、強化学習の過程に人間の判断によるフィードバックを組み込んだ強化学習が行われている¹⁴⁾。しかし、学習した（してしまった）誤りを返答する事態は、これらの強化学習でもどうしても防げない。そのため、最近の実用面においては、AI が答える範囲を企業内データベースからの学習範囲とする、グラウンディングと言われる制限をさらに組み込むことなどによって、返答の対象領域は狭くなるが、その狭い応答領域内では怪しげな振る舞いが克服されて実用に問題のない生成 AI モデルが実用化されている⁴⁾。

しかしながら、ハルシネーションは、学習された誤ったデータによって起こるものばかりではなく、大規模言語モデルの規模のために学習しきれないため誤った返答を出してしまう場合も含まれる。例えば、素数を答えるような問いにも、単に正解を Web 等の記述から引いてくるのではなく、学習しきれないまま返答するので、一部に誤りが入る例もある¹⁰⁾。

すなわち、現在の大規模言語モデルは、人と同じように学習が進んで、脳内モデルも獲得しつつある様ではあるが、まだ成熟した段階、AGI まで至っていないということのようである。

2.5 生成 AI 以前の「人工知能」プログラムとの違い

歴史的に見ると、時代により利用できる計算機資源の限界もあった中ではあるが、かつては、正解をデータ化して、そこから返答をするシステムが人工知能的なシステムであり、エキスパートシステムなど、feature engineering と言われる分野が主流であった。しかし、世界にあるさまざまな、例えば人の頭の中だけにあるような常識的なことまで明示してルール化しデータ化することは誰にも不可能であり、二十年すぎても終わらないような取り組みである。米国のベンチャーによる Cyc (サイク) は、一般常識を知識データベース化し、人間と同等の推論システムを構築することを目的とするプロジェクトであったが、1984 年から始めて 30 年近く経った今でも、まだデータを書き終えず、とうとう一旦解散した。データ活用の会社は今も存在するという¹⁵⁾。

生成 AI は、出力においては回答を創発しているので、プログラム上には回答がない問題にも「人間並み」に答えを出す。この点が過去のプログラムとの大きな違いである。

しかし、feature engineering の流れで作られたシステムは誤った答えはあまり出してこない。計算機は与えられたプログラム通りに動き、そのロジックに沿って結果を出す仕組みで、それ以外の回答は作り出せないからである。汎用性はほとんどないが、中には知識データベースが充実できる範囲の限られた分野においては、これまでも成功事例は報告されている。例えば、研修医よりは優れているが、専門医よりは劣るレベルの回答を出す Mysin などのシステムもある^{6,16)}。

そこで、今の生成 AI が返答をする前に、あるいは返答を作る段階でこれらの既存システムから解答を引き出して評価し、回答を文章化するシステムにする試みも進められている⁸⁾。

前記のように閉じた企業内等では、企業内部で用意したテキストとグラウンディングさせることで、社内文書をもとにした回答が生成できる。これらの結果、現在企業から学校までその利用が進み、役に立つ道具として定着しつつあるところである。ある面実用に達したと言えるので、今後社会での展開はこちらが主流となり応用が進むであろう。

2.6 生成 AI に残る脳との大きな違い

生成 AI に残る脳との大きな違いは、概念構造の獲得ができるかどうかである。計算機科学ではフレーム問題と言われる。AI は有限の処理能力しか持たないため、現実で起こりうる無数の出来事に対処できないという問題のことである。例えば、倉庫にある台車に荷物が乗っており、その上に爆弾があるという条件の中で荷物を運び出すという課題が解けないという問題である。いきなり台車を動かして爆発する、あるいは、事態を把握できず答えを出せないで考えている間に爆発が起こるといった結末になる^{17,18)}。

もう一つの AI が苦手な問題にシンボルグラウンディング問題がある。これは馬とシマの意味がわかったヒトにはシマウマの画像を一瞬で理解できるが、AI にはできないという記号システム、すなわち抽象化され言語化された表記による記述の中のシンボルと実世界の意味とが結びつけられないという問題である。

一方人間にはフェルディナン・ド・ソシュールの言う、概念(シニフィエ)とそれを意味する言葉(シニフィアン)という言葉による概念の獲得があるため、現実で起こる、あるいは言葉で示された問題を理解して対処ができる。AI はまだ概念構造を取り扱える機構を内部構造化していないので、意味を獲得できていない。どのようにそこを埋めるかが大きな課題となる¹⁰⁾。

3. 生物脳の進化

3.1 生物脳の理論モデル

次に生物脳との比較を検討するために、両者の間を埋める研究を紹介する。

*4 製品に関する顧客窓口、カスタマーサービスや営業活動において導入が進んでいる。

脳の理解を考える上では、本稿の話題でもある生成 AI の進歩にも少なからず貢献したと考えられるジェフ・ホーキンスの理論がある。彼らは、脳がどのように働いているか、知能と知覚を解明するために脳の働きを説明する広範な理論の枠組みを提案しつつ、シミュレーションプログラムも動かし、かつ生理学的な知見も追求してきた。かつて、ヴァーノン・マウントキャッスルが 1978 年の「大脳機能の構成原理」と題された論文において、新皮質の見た目と構造が全体に極めて均質で同じに見えることから、そこで行われる基本的な処理も同じなのではないかという仮説を提唱した。彼らは、その仮説を拠る所に、つまり、新皮質が実行するあらゆる処理には、同一のアルゴリズムが使われているという考えを元に、知能を解明する理論を求めて、大量の神経科学のデータを参照しながら仮説検証を進めている。ホーキンスの現在までの理論は、神経科学的には詳細は異なるところもあるが、概ね生体脳に近づいて進んでいるように見受けられる¹⁹⁾。

視覚野や聴覚野で報告のある神経回路には特徴的な違いがある。彼らは些細な差であると評価しているのか考慮に入れていないのかはわからないが、脳内では、予測と座標系で神経パターンが動き、どのような入力からの処理にせよ同じ様式で脳内に収められ評価されているとしている²⁰⁾。

一方で、大規模言語モデルのモデルは大規模なデータで学習され構築されたものなので、多様なタスクに対しても対応できる。尤も、AlphaGO は将棋には対応できないが、Google DeepMind 社の deep Q-network (DQN) はゲームに関しては自己学習してルールを学びヒトにも勝利する成長を示すという。導入された数理モデルである深層強化学習アルゴリズム (Q-learning アルゴリズム) では、ある状態において各行動を取った場合の期待報酬を値として、それを上げるべくゲームプレイ中に何度も試行錯誤を繰り返して学習する²¹⁾。

これらの AI アルゴリズムは、神経科学の神経回路に関する知見も参考にしているが、その振る舞はプログラムとして事前に直接記述されたものではないこと、モデルにおいて予測性が重要視されていることがある。ジェフ・ホーキンスの考えとの違いは、ホーキンス理論では座標系で処理することが重要視されていることである。ジェフ・ホーキンスらによる Hierarchical Temporal Memory 理論では神経科学の知見を取り込んだ新皮質計算モデルとして成果を上げ、重要な点は、新皮質は構造的にも機能的にもほぼ一様であり、共通のアルゴリズムで動作していること、新皮質は時間系列を処理して常に予測を行っていること、6 層構造による認識、その基盤に座標系があること、常にオンライン学習していることとしている。彼らのシミュレーションモデルでは、神経細胞の細胞体、基底樹状突起、遠隔樹状突起、先端樹状突起、軸索などと対応付けがあり、新皮質の 6 層構造において情報は三方向から、すなわち下の階層、上の階層、同じ階層の横方向から入ってくるこ

に加え、遠隔樹状突起を經由しての横方向からの入力を扱うことが、通常のニューラルネットワークの理論と異なっている。彼らはこの理論のもと AGI を目指して開発している。

一方で、大規模言語モデルはニューラルネットを基盤に開発されてきたが、脳構造との類似はそれほど考慮されておらず、深層学習とトランスフォーマーの組み合わせで結果としてその振る舞いが似てきたと考えられる。現在の規模のモデルでようやく広汎な学習が進み、突然「人間並み」の出力が得られるようになってはきたが、そこには概念構造が組み込まれてはいないようで、フレーム問題等はまだ解けない状態になっている。

松尾によれば、現状の生成 AI から人工知能への進化は、ちょうど新生児が徐々に成長して幼児になりかけている過程をなんとか辿ろうとしている。さらなる進化のためには、「世界モデル」と呼ばれる、自己教師あり学習により、対象を取り巻く現実の環境をその状態遷移も含有して全てモデル化しようとする研究と、現実の部分空間を独立した要素群に分解して、それらを表現する機能を AI に組み込むことを検討している¹⁰⁾。また、脳の回路を全て記述してプログラム化する全脳アーキテクチャ (WBA) という取り組みは、すでに脳の構造と対応できる機構を持つとされる。

3.2 生物脳と生成 AI の比較

ここまで来てようやく脳との比較ができる話となった。現在進められてきた生成 AI と将来の目標である AGI の現状を生物脳と対比してみると、生成 AI は、大規模言語モデルによってある程度「人間並み」の出力が出せるようにはなったが、人の知能と比べると、やり取りはテキスト的にはほぼ正しくとも、内容を理解しているレベルではない。意味処理についても知識を得て、穴埋め問題にも強い言語モデルと言われる Google 社の BERT でも、固有名詞の置換には対応できないし、例えば、人間が家に歩いて入ることができ、家は大きいことは知っているが、人間が家より大きいかは推論することができない、などの状態である。

生物脳との大きな違いは、まず成長過程で必ず日常世界と物理的な接触があり学習があるところが決定的に異なる。動物は自分の体を動かしたり物の動きに数々の物理法則があるところから自然を相手の教師あり学習を進めて、正しい「世界モデル」を獲得しつつ成長する。このような認識を経て AI の開発に伴ってアフォーダンス理論が注目されるようになってきた²²⁾。

3.3 知能を支える器官と仕組み

これまで示した AI に関する説明では、ほぼすべてヒトの大脳新皮質の構造と神経生理学的な知見を前提としている。しかしながら動物の示す知能という観点からは別の世

界が見えてくる。

よく人間は道具を使う猿、という言葉でヒトの特徴を示す場合があるが、現在では多くの動物が道具を使えることがわかっている。

実際に、哺乳類どころか、鳥類にも道具を使いこなす能力がある。サボテンの棘を使って小穴の奥の虫を捕まえるダーウィンフィンチや、水面の低い入れ物に浮いたミルワームを、嘴が届くまで小石を入れて水面を上昇させる行動を、はじめての状況でも実行できるミヤマガラスまで、多数の実験や観察事例がある²³⁻²⁶⁾。これらの鳥類の複雑な行動の研究では、環境を与えると自己学習して道具が使えるようになる場合や、初見で道具を使いこなせる場合、お手本を見せることで学習する場合、学習はできるが野生ではそういった行動が観察されたことがなく、あまり適応的でない（生きるためのメリットが特にない）か、かつてはそれが淘汰に有効であった時代があったのかもと考えられている事例など、多様な段階が報告されている。以上のように、道具を使う能力にはかなりの知能の存在が認められるが、ヒトのような言語能力がなくても、遺伝的な構造と生後の学習のどちらか、あるいは両方で少なくとも一部の鳥類も道具を使用できると言われている²⁷⁾。

高次脳として的大脑新皮質の構造自体は、哺乳類の比較研究から、霊長類より原始的な哺乳類の分化の初期に位置する食虫類、キノボリトガリネズミにも拡張された新皮質や脳容積の増大といった霊長類の特徴が認められている²⁸⁾。

そして確かに、食虫目で実験動物化されたジャコウネズミ、実験動物名スクスを対象とした弁別学習の研究では、ラットと同様の学習曲線を示している²⁹⁾。

また、学習環境があれば、チンパンジーやゴリラ等の類人猿においても手話や人工言語の習得が可能である^{30,31)}。それらの知能は、今の AI に欠けている身体性と物理環境により学習されていると考えられるが、生物の脳ではどのような仕組みで実現されているのであろうか。

実は、この認知機能、知能を支える機構、機序、原理は、現在でもわかっていることは少ない。fMRI 等による非侵襲的な観察から始まり、多くの神経生理学的な知見から、大脳新皮質が重要であることはわかってきている。大脳新皮質は解剖学的にはトランプのカードを6枚積んだ程度の厚さでランチョンマットより少し大きい程度の新皮質が折り畳まれてできている。しかし、動物によってはこの6層構造の高度に見える大脳新皮質がなく、単純に見える終脳しか持たない鳥類でも上記のように知能の存在を示すので、物理的な構造についてはさらなる研究が必要である。

4. 生物進化における世界との適応戦略

ヒトが現在の知能を獲得するまで、何が起こってきたか。知能進化の基盤には、遺伝的に獲得されてきた大脳新

皮質が、動物種でその程度はさまざまであるが、感覚入力で知覚できる個体周囲の物理的な環境や重力などの法則に従う周囲の世界の情報、種によっては社会性環境からもたらされる結果を加えた、例えば、物を手から離すと落ちていく、氷は冷たい、光は板で遮られる、棘が刺さると痛い、などの情報を教師データとして「世界モデル」と「身体モデル」を学習しているようである^{6,32)}。ややこしいのは、生物は進化の過程で、突然変異と淘汰と偶然により、遺伝的に発現される高度な本能行動で、種としての知能的な行動を獲得して進化している面もあることである。ミミズの行動観察においてもいわゆる高度な「刺激-反射」も存在する³³⁾。鳥類に多く見られる知能的な行動などがやがて哺乳類における脳の発達とともにヒトの知能につながってきたのか、脳の進化を整理してみる。

4.1 生物の進化戦略

ここで生物の進化戦略を理解するために、一例として免疫機能を取り上げる。ヒトの免疫機構には、自然免疫と獲得免疫が存在する。その実行部隊は血液中の免疫系細胞であり、免疫系細胞の基本機能は、体内の異物の排除である。その仕組みの一つが、生まれながらにもつ遺伝情報による自然免疫系である。我々は細菌やウイルス感染、果てはがん細胞など種々の体内異物に対して、抗菌ペプチドや補体などを活用し好中球やマクロファージなどによる貪食作用により対処している。またそこで得られた異物断片を樹状細胞が T 細胞へ提示することで特異的な獲得免疫も活性化する³⁴⁾。

この免疫機構の基盤となる自己と非自己の認識機構で興味深いのは、自己はわかるとしても経験もない想定もできない未知のウイルスについてどのように対応する免疫機構を進化させてきたのか、というその戦略である。哺乳類の持つ戦略は、自己であることを示すマーカーを持つことと発生過程でランダムに認識部位を作成した抗体産生系を持つことであった。異物を認識する領域にランダムな組み合わせのタンパク配列を用意すれば、どれかが新規ウイルスに対応できるという仕組みである。大変よくできた戦略で、あらかじめ特定の異物情報、人類がよく遭遇してきたような異物に対しては遺伝子レベルのバリエーションとして淘汰され生き残ってきた情報が主に自然免疫として役立つ、全く想定できない相手に対しては、ランダムに準備をした中から獲得免疫がさらに特異抗体を増産して迎え撃つ。それを支えるのは、ランダムにできた免疫細胞の 10^{10} のバリエーションから胸腺において選抜する機構で、自分を攻撃する配列は取り除き 10^{6-8} ほどに、ほとんど数%になってしまうができるだけのバリエーションを準備しておく仕組みである³⁵⁾。将来予測不能な事態に対しても対応できる戦略を進化の過程で身につけているのである。もちろん 10^{6-8} のバリエーションと言っても限界はあるので、中にはインフルエンザに何度もかかり、ワクチン

接種しても種類によっては抗体価が上がらない、おそらく認識部分の配列を持っていない人もいる。

このような生物の生存戦略、すなわち予測できない将来の現実世界にも対応した仕組みを持つ戦略は免疫だけでなく、恒常性と言われる体内の調節系や、筋生理にも散見される。人類は内分泌ホルモン系の働きにより子供から大人へ、男性へ女性へなど、ゆっくりと25歳くらいまでに体が出来上がるが、そのあとは各種ホルモン分泌は少なくなり、遺伝子の指示により体を作り上げる段階が終了するが、成長後は現実世界の状態に各組織が対応する仕組みになっている。

例えば骨格筋では、トレーニングすれば成長ホルモンも分泌されて筋断面積も増えていくが、使わなければ、例えば、ギプスで固めた四肢の筋や長期臥床に至った患者の筋や、加齢とともに身体活動の減った高齢者の筋などは廃用症候群となり、筋は回収され萎縮する。しかし、抵抗運動などの筋力トレーニングに励めば、90歳でも筋力は増強される。

脳においても、固定的な構造と適応的に変化して出来上がる構造がある。感覚入力、自律神経、本能行動を司る辺縁系までの古い脳といった、これまでの進化で人類が得てきた機構であり、成長期までに遺伝的に支配され制御され設計図通り出来上がる機能部分と、あらかじめ遺伝子では固定的に対応できない、予測不能な現実に対して、学習能力により高度な柔軟性を得ることでこれらに対応して生き残る仕組みとなる大脳新皮質という組み合わせがある。特に知能に関しては、言語獲得、知識獲得、常識、といった後天的に備わる部分が重要である。遺伝子によって神経が配置された6層構造の大脳新皮質は、当初何もできないが、生後発達し学習してその時点での現実、現実世界に対応できる。例えば、言葉については、処理能力を支える神経基盤は遺伝的に出来上がるが、実際に何語を話すかは遺伝子には規定されていない。言語は周囲の環境から学習して身につけるので、日本語や英語等を母国語として育つし、あるいは、ネグレクトのようにある時期に刺激する環境を与えられない場合は、言語能力の発達に遅れが出てくる³⁶⁾。視覚系や聴覚系といった感覚入力については、ある程度の可塑性を持って遺伝子による神経回路が準備されるが、生後のある時期までの入力によって調整され現実に対応した回路が臨界期に出来上がる。眼性優位などが有名であるが、薬物でこの回路、いわゆるニューラルネットにおける隠れ層にあたるシナプス接続の重みづけを開放することも可能であるから、遺伝子で制限をかけて微調整されているとも言える。

以上のように、脳においても進化の過程で、遺伝子的に能力まで決定される領域と、未決定だが多様な予測不可能な現実に対応できる部分が用意されている。PCのOS部分までが固定的に準備され、メモリー上にプログラムを載せれば多様な出力ができることに収斂性を感じる所以であ

る。さらに、AIがすべてを規定された逐次処理的なプログラムではなく、複雑な自己学習により「人間並み」の言葉を操る言語モデルまで習得しているところは、仕組みとしてもかなり脳に近づいていると言える。人類は、遺伝子で制御でき淘汰圧に対して生き残るためにできた回路が、終脳から大脳新皮質へと進化する過程で高度な学習能力を持つようになった。その結果、想定外の現実世界にも対応できる余力ができ、生後試行錯誤して現実世界の物理世界モデルや身体モデルを学べる様になった。加えて、進化の過程で咽頭から喉頭の変化により音声を操れるようになり、聴覚もほど良く、言語コミュニケーションを発達させることができた³⁷⁾。その後、文字を発明し、情報を学ぶことができるようになり、大規模言語モデル相当の知能を持つに至ったが、その分知識や文化については、遺伝的に備わるわけではないので、毎世代で誕生後に0から学習して成長しなければいけないこととなったと想像できる。

4.2 脳とAIの違い

以上のように見た目には脳と生成AIで似た進化を示しているように見受けられる。しかし、大規模言語モデルの習得には、多量のデータ入力が必要であり、また、概念構造については現在のAIはまだ習得できない。ヒトも動物も現実世界である外界環境の中で試行錯誤をして世界モデルを学習していくので、AIにも身体性を加えると良いとの考えは当然出てきている。

AIロボットの分野では、アフォーダンス理論も参考に、自己の活動に対する環境からのフィードバックを入力して学習させる取り組みは普通に進んでおり、ロボットアームとカメラのシステムにAIを接続して、90分間で0の状態から自己学習して卓球のラリーができた事例もある³⁸⁾。ゲーム世界での現実世界を入力し、ルールまで自己学習させて「人間並み」のプレイができるようにした例では、前述のDQNは、ゲーム機「Atari 2600」のビデオゲーム全57本をプレイできるばかりか、人間の平均スコアを凌駕する結果を出したとされる²¹⁾。また、現在では自動運転AIを開発するために、シミュレータ上での運転技術の自己学習モデルを育成中と聞く。

従って、脳とAIの違いを明らかにしてその差をなくす試みは進行中であり、今後その違いは無くなっていくのかも知れない。

5. 未来

5.1 さらなるAIの進化

これらのAIの発展ぶりを見ると、早々にAGIが実現できそうに思えるがどうであろうか。最後に生物との比較の視点で考えてみる。

脳の進化を考えると、ヒトと霊長類、特にチンパンジーやゴリラなどと比べると、基本的には大きな違いはないと

される。彼らは高度な知能を示し、教えれば手話や記号による会話もできる。しかしながら、野生ではそういった高度な情報伝達行動は観察されていないようである。この違いはどこにあるのかといえば、言葉とそれを支える発声能力と聴力なのだと考えられる³⁰⁾。人類の祖先は口腔の構造の進化により音声コミュニケーションを獲得した³⁷⁾。

さらに、文字や紙、無線やTVも発明し、現在ではインターネットまで使っている。ここには、学習進化への遺伝情報からの解放という大きな意味がある。これらの個体の持つ遺伝情報の他に、個体間に伝わり受け継がれる複製情報をミームという³⁹⁾。

現在の生成 AI は、ヒト脳に類似した回路を持ち、ニューロネットワークの上位階層における特徴量は、入力に応じて概念構造も反映した世界モデルを大規模言語モデルとして保持できるらしい。チンパンジーも脳の構造的にはヒト大脳新皮質に近い脳を持っており、現実世界で学習して高度な概念構造を持ってある程度のフレーム問題も解ける段階にある。上方にあるバナナを木の枝を使ってはたき落とすなど高度な知能を示す。それではチンパンジーはどこまで世界を認識しているのか。興味深いのは、彼らは今を生き、将来の想像といった概念までは持ち合わせないとされていることである^{40,41)}。言語世界を持ち合わせない脳では獲得できる世界が違うということであろうか。

大脳新皮質や、学習する鳥類の終脳の神経回路の生理機能は未だに不明なところが多く、逆に生成 AI の進歩から推測すると、入力パラメータがある規模に達すると GPT-2 から 3、3.5、4 へと大規模言語モデルの能力は格段に進歩している¹⁰⁾。同様のことがヒト脳でも起きているとすれば、ヒトが言語を持ち、脳内での反復や推論といった学習を深めて膨大な量の入力を行ってきたおかげで、今の新皮質のもつ能力を、チンパンジーよりも高度に活用できているのかもしれない。さらに、ミームの力で、学習は個体を超えて広がり、インターネットのおかげで時間空間的にも解放された状態にある³⁹⁾。これまでにない入力を得られるこの時代でこそ、ヒト脳もさらなる進化を示せる可能性がある。

生成 AI も、概念構造と言語認識や身体性が習得できれば、「人並みの」未来も語れるようになる可能性はあるかもしれない。人間があくまでも個体ごとに学習を繰り返し、その成果レベルには大きな個体差が存在するのに比べて、AI が AGI になれば、その段階で存在自体を複製できる。AI の学習初期に必要な物理的な世界、あるいは仮想現実やメタバース内での学習といった形かも知れないが、物理世界と AI をつなぐ身体性はいずれは不要になるであろう。その段階では、AI はデジタル的な存在に戻れるのかも知れない。

妄想を付け加えておけば、ヒトが試行錯誤しながら世界モデルを習得し生き残ってきた背景には、子孫を残したいという本能回路が必要であった。進化の過程では、言語コ

ミュニケーションを活用して社会性を持って適応した方が、より集団として生き残り易く、その間に良い方向を感じる「心」や価値評価を育んできたことが生存戦略として重要である。AGI を実現するためには、大脳新皮質だけでなく、海馬や視床といった古い脳の回路も取り入れる必要があるといった記述自体は、松尾らにもある¹⁰⁾。その実現のためには、上記生物進化の適応戦略の理解と実装技術が必要なのだろう。

AI の特徴には、複製可能という性質があるので、ある程度の哲学的な情報をもとに集中的に学習を積んだ生成言語モデルができたならば、高度な道具、対話的に学ぶ師匠として、感情的にならず何度でも対応して、生徒から若者や問題を抱える人を教え導いてくれるエージェントになる可能性がある。生成 AI には、ある程度に育ったら是非とも哲学書や良い大人との強化学習を入力して、最終的には AlphaGO のようにヒトの思い付かない一手を示してほしいと思うし、人類もさらに研鑽して新たな一手を見つけなければいけない。AGI とヒトがそのレベルで対話が出来、会話を通して哲学的な問題にも回答や解決策を探れるようになることを祈る。

5.2 ヒトの現状維持に対する危惧

今の生成 AI は時にハルシネーションを起こすが、それはヒトであっても同様であり、日常のニュースを見れば価値観や宗教、立場の違いをいまだに乗り越えられず、人類には正解の出せていない問題もたくさんある。

どうして勉強しなければいけないのですか、なぜいじめは無くならないのでしょうか、幸せとはなんですか、どうして力や武力行使でしか解決できないことが多いのでしょうか、宗教の多くは違う宗教人は改宗させるか排除せよという排他的な教えを含みますがそれで良いのですか、なぜ誰かを殺してはいけないのですか、なぜ戦争では殺人が許されるのですか、といった問題にどうやったら適切な指導が受けられるのであろうか。

1 番の問題は、そういったレベル課題には、未だ現在、我々人類も正解を持ち合わせないので、教師データがないことである。その状態の世界での入力データから、望むエージェントが出来上がるかわからないという点にある。巨大なリソースのエージェント 2 台に 10 年間禅問答をさせたら、人類を超えるレベルの思考パターンが育つであろうか。SF 作品でありそうな話であるが、人類が望むこれまでにない「回答」を得るには、固定的な手法で追い求めるのではなく、ランダムなところから現実合う道筋を発見していく戦略の方が可能性が高いことは、現在の脳の理解と生物の適応戦略の事例から明らかに思える。

ハルシネーションについて、ホーキンスによればヒトの誤った信念は、1) 直接経験できない、2) 反証を無視する、3) ウイルス性の広がりによって形成されるとしている¹⁹⁾。我々教育に関わるものとしても、学生や保護者と教員

の間のトラブルの多くは、1) 2) 3) を含んでいるようにも思え、正解の落とし所が見えない苦悩を早く愛のある AGI に助けてほしいところである。

人にとって喫緊の問題は、便利な時代となったために、基本の世界モデル、思考モデルが十分に構築されていない若いヒト脳が増えてきていることである。特に思考モデルは、時間をかけて抽象概念を含む思索を入力しなければ脳内にパターン化できない。今の若者は字を書かないので書字の運動入力をベースとした未来予測とは違う学習経路を持つはずである。いずれにせよ友と語るか、瞑想に耽るか、書籍読書や音声映像資料、形はどうあれその様な話題を脳に学習させる必要がある。ヒトは個体レベルでは0から始めて己の脳を育てていく必要がある。入力が少ないければ、出力も限られたものになることは生成 AI も示している。

学ぶというレベルでは、定番の知識からなる入力を得れば良いだろう。しかし、学習データにノイズを含んだ物を用意すると、その回路はノイズにも強い特徴量を構築できる。多様な質問に対して、正しいそれなりの回答を生成・創発することもできる思考モデルを育てるためには、試行錯誤を繰り返し思索を深める努力が必要であり、その努力がなければ無理、というのが本日時点でのヒト脳への結論である。その意味では「学問に王道なし」とはヒト脳にも AGI にも全くの正論なのである。

引用文献

- 1) OpenAI, T : ChatGPT: Optimizing language models for dialogue. 2022. <<https://openai.com/blog/chatgpt>>. [accessed 2023-09-19]
- 2) IBM : 生成 AI (ジェネレーティブ AI) とは：仕組みを解説. 2023. <<https://www.ibm.com/blogs/solutions/jp-ja/what-is-generative-ai/>>. [accessed 2023-09-19]
- 3) 野村総合研究所 (NRI) : 日本の ChatGPT 利用動向 (2023 年 6 月時点) ~若年層を中心に利用率が高まる~. 2023. <https://www.nri.com/jp/knowledge/report/1st/2023/cc/0622_1>. [accessed 2023-09-19]
- 4) Nick Babich : GPT-4: Facts, Rumors and Expectations about next-gen AI model. 2022. <<https://uxplanet.org/gpt-4-facts-rumors-and-expectations-about-next-gen-ai-model-52a4ddcd662a>>. [accessed 2023-09-19]
- 5) masapoco : OpenAI の GPT- 4 のパラメータ数が驚異の 1 兆超えである可能性が専門家より報告される. 2023. <<https://texal.jp/2023/06/29/experts-report-that-openais-gpt-4-has-an-astonishing-number-of-parameters-exceeding-one-trillion/>>. [accessed 2023-09-19]
- 6) 松尾豊 : 人工知能は人間を超えるか：ディープラーニングの先にあるもの. 角川 EPUB 選書 Vol.021, KADOKAWA, 東京, 263 頁, 2015.
- 7) 松尾豊 : よくわかる人工知能：何ができるのか？社会はどう変わるのか？. 楽しい調べ学習シリーズ, PHP 研究所, 東京, 63 頁, 2017.
- 8) Wolfram S : What is ChatGPT doing ... and why does it work?. Wolfram Media, 2023. [高橋聡訳 : ChatGPT の頭の中. 早川書房, 東京, 163 頁, 2023]
- 9) Vaswani A, N Shazeer, N Parmar, et al. : Attention is all you need, in Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. Curran Associates Inc, Long Beach, California, USA, pp. 6000-6010, 2017.
- 10) 松尾豊 : 深層学習と人工知能. Cognitive Studies, 28 (2): 299-307, 2021.
- 11) 松尾豊 : 人工知能は人間を超えるか ディープラーニングの先にあるもの. 日本医学会総会誌. 30 回 : pp. 柱 1-1-3-2, 2019.
- 12) Silver D, A Huang, C.J. Maddison, et al. : Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. Nature, 529(7587):484-489, 2016.
- 13) Ji Z, N Lee, R Frieske : Survey of Hallucination in Natural Language Generation. ACM Computing Surveys, 55(12): 1-38, 2023.
- 14) Ouyang L, J Wu, X Jiang : Training language models to follow instructions with human feedback. Advances in Neural Information Processing Systems, 35: 27730-27744, 2022.
- 15) Cycorp : The Next Generation of Enterprise AI. 2023 <<https://cyc.com/>>. [accessed 2023-09-19]
- 16) William Van Melle : MYCIN: a knowledge-based consultation program for infectious disease diagnosis. International Journal of Man-Machine Studies, 10(3): 313-322, 1978.
- 17) J. マッカーシー, P.J. ヘイズ, 松原仁 : 「人工知能になぜ哲学が必要か」 フレーム問題の発展と展開. 哲学書房, 東京, 1990.
- 18) Daniel D, 信原幸弘 : コグニティブ・ホイールー人工知能におけるフレーム問題. 現代思想, 15(5): 128-150, 1987.
- 19) Hawkins J, S Blakeslee : On Intelligence: How a New Understanding of the Brain Will Lead to the Creation of Truly Intelligent Machines. Henry Holt and Company, 2007. [伊藤文英訳 : 考える脳考えるコンピューター. ハヤカワ文庫, 早川書房, 東京, pp.1-382, 2023]
- 20) Hawkins J, R Dawkins : A Thousand Brains: A New Theory of Intelligence. Basic Books, 2022. [大田直子訳 : 脳は世界をどう見ているのか : 知能の謎を解く「1000 の脳」理論. 早川書房, 東京, pp.1-323, 2022]
- 21) Moreno-Vera F : Performing deep recurrent double

- q-learning for atari games. in 2019 IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (LA-CCI). IEEE, 2019.
- 22) 川村久美子：アフォーダンス理論がもたらす革命. 武蔵工業大学環境情報学部情報メディアセンタージャーナル, 2:7-17, 2001.
- 23) Tebbich S, M Taborsky, B Fessl, et al. : Do woodpecker finches acquire tool-use by social learning?. *Proceedings: Biological Sciences*, 268 (1482):2189-93, 2001.
- 24) 杉山幸丸：動物の道具使用と人類文化発生の条件. 霊長類研究, 11 (3):215-223, 1995.
- 25) Roelofs Y : Tool use in birds - An overview of reported cases, ontogeny and underlying cognitive abilities. 2010. <https://www.researchgate.net/publication/270685626_Tool_use_in_birds_-_An_overview_of_reported_cases_ontogeny_and_underlying_cognitive_abilities>. [accessed 2023-09-19]
- 26) Bird C.D, N J : Emery, Rooks use stones to raise the water level to reach a floating worm. *Current Biology*, 19(16):1410-1414, 2009.
- 27) 伊澤栄一：鳥類における大型脳について 比較神経解剖学は認知神経科学にどのように貢献するか. 認知神経科学, 10(3-4):248-254, 2008.
- 28) Martin R.D : Primate origins and evolution: a phylogenetic reconstruction. Princeton University Press, Princeton, pp.1-840, 1990.
- 29) 石井澄, 辻敬一郎：スnekスの学習能力の検討 (1) 位置弁別課題の連続逆転学習について. 名古屋大学文学部研究論集, 99:77-84, 1987.
- 30) 清水研明：「二重分節」の意味するもの：類人猿にとって. 川崎医療福祉学会誌, 2(1):25-31, 1992.
- 31) TANAKA M : Comparative cognition in zoo animals. *Japanese Journal of Animal Psychology*, 66(1)53-57, 2016.
- 32) 伊藤雅一：人工知能研究の知見から見出す人間の教育—人工知能と人間の差異を手がかりに—. 千葉大学大学院人文公共学府研究プロジェクト報告書 = Chiba University Graduate School of Humanities and Study on Public Affairs Research Project Reports, 357:95-100, 2020.
- 33) Darwin C. R : The formation of vegetable mould, through the action of worms, with observations on their habits, p.326, John Murray, London, 1881. [渡辺弘之訳：チャールズ・ダーウィン、ミミズと土. 平凡社ライブラリー, 平凡社, 東京, 1994]
- 34) 山本健, 遠藤裕介, 中山俊憲：自然免疫. アレルギー, 65(1):1-10, 2016.
- 35) 高浜洋介：胸腺微小環境における T リンパ球の分化と選択. 生化学, 84(3):177-182, 2012.
- 36) 池田慎之介：感情の個別性の発達における言語の役割—言語発達がカテゴリー形成に与える影響をめぐって—. 心理学評論, 63(4):375-400, 2020.
- 37) Mithen S.J : The Singing Neanderthals: The Origins of Music, Language, Mind, and Body. Harvard University Press, Cambridge, 2006 [熊谷淳子訳, 歌うネアンデルタール：音楽と言語から見るヒトの進化. 早川書房, 東京, pp.492, 2006.]
- 38) 山田圭佑：卓球ラリーロボット～人と機械の融和を目指して～. IEEJ Journal, 1(2):81-84, 2017.
- 39) Marvin Minsky, Lm J. Lee : The society of mind. William Heinemann Ltd, London, pp.352, 1988. [安西祐一郎訳：心の社会. 産業図書, 東京, pp.1-574, 1990.]
- 40) Suddendorf T : The gap: the science of what separates us from other animals. Basic Books, New York, 2013 [寺町朋子訳：現実を生きるサル空想を語るヒト：人間と動物をへだてる、たった2つの違い. 白揚社, 東京, pp.1-446, 2015.]
- 41) 松沢哲郎：想像するちから：チンパンジーが教えてくれた人間の心. 岩波書店, 東京, p.240, 2011.