

## 解説

## なじみ社会構築に向けて：人工痛覚がもたらす共感，道德，そして倫理

Towards Symbiotic Society: Artificial Pain Leads Empathy, Morality, and Ethics

浅田 稔\* \*大阪大学大学院工学研究科

Minoru Asada\* \*Grad. School of Eng., Osaka University

## 1. はじめに

人工物とのなじみ社会（共生社会）の発展が期待され，人間-機械系の相互作用の様相として，ヒトの身体の一部として義肢ロボット，ヒトと機械の間のハプティック機器，ヒト自身の認知モデルや，さらには意図や要求を持つアンドロイドの開発などの様々な側面からの最新の技術動向が本特集号<sup>†</sup>で扱われている．また，深層学習に代表される最近の AI 技術の進展に後押しされ [1] [2]，加えて，近年の神経科学や生理学などの観測・計測技術が向上し，脳の様々なミステリーが明かされつつあり（例えば，文献 [3] 参照），ロボットや AI システムの感覚，情動，感情，共感，さらには究極的な意味合いでの意識も含めて，構築されそうな勢いである．

本稿では，人間社会でヒトに共感したり，道徳的な行為を行ったりするための人間-機械系の相互作用の根源的な課題として，人工痛覚をロボットに付与することにより，心的機能が実現され，人工物とのなじみ社会が構築される可能性を議論する．まず，最初に深層学習の現状と身体との密なリンクを持たないことによる限界を提示し，そのことが，なじみ社会研究にとっても重要であることを指摘する．次に，意識や自由意思を含め，広義の心の課題について，思想的背景の概略を復習する．そして，痛覚による心的機能創発の作業仮説を立て，その発達の過程が意識の発達過程とみなす．このような能力が人工物に付与されることで，なじみ社会がより豊かになり，その構築が加速すると期待される．

## 2. 現代 AI の中核である深層学習の現状と限界

深層学習に代表される AI 技術の進展はめざましく，様々な局面で利用されている [1] [2]．深層学習の起源は，福島邦彦氏の多層ニューラルネットワーク「ネオコグニトロン」<sup>††</sup>であり，当時，絶対的なデータ量と計算能力の不足から，あまり注目されなかったが，BigData や計算能力の飛躍的向上のおかげで，やっと使えるものになってきた．

深層学習は，基本的にデータの相関関係のみに着目しており，推論過程が入っていないこと，また機械学習の基本

的問題である過学習などが課題として挙げられている．人間の場合も，幼いときは，この過学習が見受けられる（例えば，英語の規則動詞の変化（過去形）など）．ただし，人間の場合は，社会的な環境のなかで矯正されたり，みずからも多様な入力を得て，より正しい方向に導かれる．

深層学習は，元々，ヒトの視覚システムのモデル化から始まっているので，音声も含めたマルチモダルな感覚情報からの認識・判断が得意であり，言語データとも組み合わせた音声や画像の出力も可能である．片や，運動出力に関しては，その厚みがない．理由は，画像の場合，数千万枚のデータが利用可能だが，ロボットの試行回数には限界があるため，人間もそんなに多数の試行は疲労困憊で行えない．それに替わり，他者からの模倣が可能であり，社会環境がそれを育てている．ロボットでは，例えば，尾形ら [4] は，デモによる教示バイアスを与えている．運動出力とのパイプが太くなることで，初めて，環境を含んだループが完成し，入力（感覚）から出力（運動）への即応的な応答（自動的かつ無意識的な行動）が可能になる．この様に環境を含めて考えると，環境内の物体と人間との関係に対する基本的な考え方が，人工的な心のあり方を検討する上でも重要である．そこで，次章では人間と事物との関係の思想的背景を探ってみる．

## 3. 意識・人間や事物（技術）の課題の思想的背景の概略

意識・人間や事物（技術）の課題の思想的背景の概略を以下で示す．Tani の書籍 [5] で紹介されている流れに基づきながら紹介していく．

時間の流れが左から右に推移する図 1 では，デカルトが左端に位置し，心と身体，もしくは事物の関係に関して，心身二元論<sup>†††</sup>を唱え，近代哲学の基礎を築いた．その後，多くの批判にさらされ，いくつかのバリエーションも存在する．フッサールは，デカルトを越えて超越論的現象学へと進む「新デカルト主義」を主張し，現象学的に考察した（例えば，文献 [6] など）．主観と客観の狭間の間主観性の考え方を展開し，後世に多大な影響を与えた．自然界の解析は，

原稿受付 2019 年 3 月 7 日

キーワード：Pain, MNS, Morality, Ethics, Consciousness

\*〒565-0871 吹田市山田丘 2-1

\*Suita-shi, Osaka

†日本ロボット学会誌 vol.37, no.4

††<http://personalpage.si.or.jp/fukushima>†††実体二元論，物心二元論，霊肉二元論，古典的二元論などとも言われているようである．<https://ja.wikipedia.org/wiki/実体二元論>



図1 意識・人間や事物(技術)の課題の思想的背景の概略

個人の意識経験に基づくと説く。ハイデガー(『存在と時間』[7][8])やメルロー＝ポンティ(『知覚の現象学』[9][10])は、フッサールの現象学を拡張・進化させた。

主観と客観を分けずに実存を問い、『現存在』は、個々のエージェントの将来の可能性とその過去の可能性との間の動的相互作用によって生まれているとハイデガーは主張する。また、それぞれの個々が目的をもっていかに相互作用しているかという事前の理解のもとに個々が相互に存在するという、ある種の社会的相互作用の重要性も指摘している。

主観と客観に加えて身体性という次元が創発し、そこでは、同じ肉厚の身体が、触れたり見たりする主体と同時に触れられたり、見られたりする物体にも与えられうるとし、主観と客観の二つの極の間の繰り返される交流の場を身体が与えると主張したのは、メルロー＝ポンティである。すなわち、客観的物理世界と主観的経験を結ぶメディアとしての身体的重要性を指摘している。これは、後に紹介する認知発達ロボティクスにおける「身体性」の基本概念的根幹である<sup>†</sup>。

主体と客体とを厳格に区分する近代諸学問における人間中心主義では、人間だけ自由意志によって因果の起点となることが可能で、事物は自由意志を持たず、外的環境や物理法則に従属する存在だという考え方は批判の矢面に立たされている。それは、以下の理由からである。

- (1) 深層学習に代表される機械学習によって、事物や技術が判断し、意思決定にコミットしている。
- (2) そもそも自由意志や意識なるものの構造や機構などが、神経科学・生理学・認知科学などで徐々に明らかにされつつあり、近代諸学問における意識に対する考え方が機能しなくなってきている。

これらの状況は、無意識も含めた意識研究にとっても重要と考えられる。それゆえ、論理的な構造だけでなく、情動的な側面も合わせて検討すべきであろう。筆者の解説[12]では、人工情動設計論の要点の(4)として、痛覚神経回路の必要性を指摘している。筆者はこれが、人工意識の設計においても重要と考えている。そこで、無意識と意識を結ぶ注意のボトムアップとトップダウンの典型例とし、痛覚による覚醒と他者の痛み観察による共感の創発を期待し、人

工システムに痛覚を埋め込み思考実験を考察する。

#### 4. 心的機能創発の要としての痛覚神経回路

人工物が心のようなものを持つ可能性として、筆者は痛覚が重要な必要条件と想定している。この痛みを共有しているという感覚が共感の元(情動感染[13])となっていると考えられる。実際、筆者の人工共感のサーベイ[14]で紹介した神経科学、認知科学、心理学の多くの文献が痛みを題材にしていることもそのことを示している。よって、ロボットの神経系に触覚系とは別の痛み回路を埋め込むことは、その良し悪しを別として、生物進化の観点からも、過度な人工的なバイアスにはならないと考えられる。痛み感覚の共有は、ミラーニューロンシステム[15]に代表される自己と他者の行動の同一性理解のみならず、同一の知覚励起に起因しており、自他認知を通じた他者の行動や知覚を無意識に模倣したり、感じたりする傾向の源と考えられる。このことがモラルや倫理の発達に繋がるのではと筆者は考えている。作業仮説は以下の4段階である。

- (1) ロボットが痛みを感じるように痛覚神経回路を埋め込む。
  - (2) 意識の概念や共感の研究をベースに、ミラーニューロンシステム(以降、MNSと略記)の発達を通じて、ロボットは他者の痛みを感じる。
  - (3) すなわち、情動感染、情動的共感、認知的共感、同情、哀れみの感情をロボットが発達させる。
  - (4) 道徳の原型が創発。ロボットが道徳(被)行為者になる。
- 以下では、各段階について考察していく。

#### 5. 人工痛覚

人工痛覚の考え方自体は新しいものではない。例えば、Kuehn and Haddadin[17]は、ロボットアームに人工痛覚を埋め込み、痛みを回避する反射的な運動生成を可能にした。彼らの意図は、人間との協調作業における安全性の確保の考え方をロボットにも適用したのと考えられる。ただし、回避行動生成に主眼があり、以降の人間との共感などを意図したものではない。以降では、ヒトの痛覚神経系を概観し、その後、柔軟触覚センサを導入し、人工痛覚の実装の可能性を議論する。

##### 5.1 痛覚神経系

痛覚受容器(Nociceptor)の神経経路は通常の触覚や体性感覚などの機械受容器(Mechanoreceptor)の神経経路と異なる経路を持っている(文献[16]のChapter 10)。図2にその様子を示す。赤い線で示した経路が痛覚で、青い線が通常の触覚の神経経路である。指先などの受容器端末で捉えられた触覚や痛覚は、脊髄神経節細胞を経て、前者は脊髄に向かい、後者は脊髄や脳幹に向かう。両者は別経路であるが、右下の拡大図にあるように、脊髄で抑制局所回路細胞が両者を接続しており、機械感覚性求心性線維系が励起されると、痛覚温覚求心性線維系が抑制される。すなわち、痛いときに擦ること(「痛い痛い飛んでいけ!」)により通常の触覚系が励起され、痛覚系をブロックすると

<sup>†</sup>以降の思想家については、解説[11]などを参照されたい。

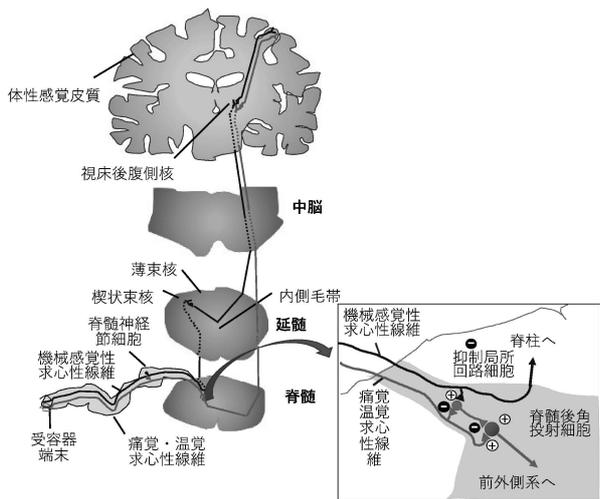


図 2 痛覚受容器 (Nociceptor) と通常の触覚や体性感覚などの機械受容器 (Mechanoreceptor) の神経経路 (文献 [16] の図改編)

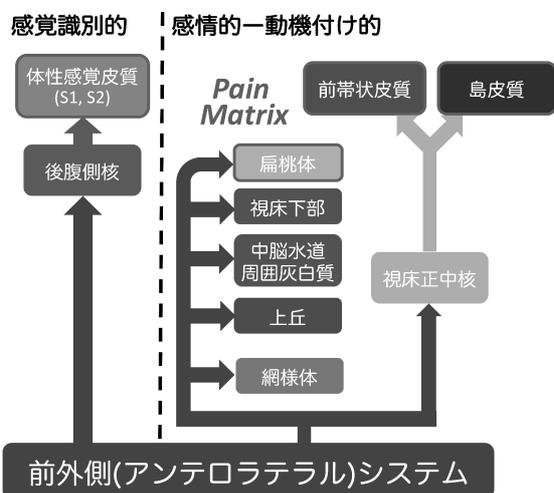


図 3 痛覚の二つの側面 (文献 [16] の図から適用)

言われている。

痛みは、触覚や温覚のみならず、他感覚も含めてマルチモデルに存在し、二つの異なるアスペクトがある。図 3 に示すように、前外側 (アンテロラテラル) システムに伝わった痛覚信号は、感覚識別的な側面と感情的-動機付けの側面を持つ。前者は、痛みの種類、場所、強さを識別し、体性感覚野に至る。進化的にハードワイヤードと考えられる。それに対し、後者は、痛みの情動的な側面を担い、扁桃体、前帯状皮質、島皮質など広範囲に及び、特に、他者の痛みに対する共感を想起するための重要な部位である。この機能は埋め込みではなく、生後の社会的環境を通じて、学習・発達するものと想定される。これらの四つの脳部位は合わせてペインマトリックスなどによばれている。

†研究プロジェクトとして、以下の二つがあげられる。  
 科学研究費補助金特別推進研究「神経ダイナミクスから社会的相互作用に至る過程の理解と構築による構成的発達科学」(平成 24 年度～28 年度 研究代表者：浅田稔, <http://www.er.ams.eng.osaka-u.ac.jp/asadalab/tokusui/>)  
 新学術領域研究 構成的発達科学 (平成 24 年度～28 年度 研究代表者：國吉康夫, <http://devsci.isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp>)

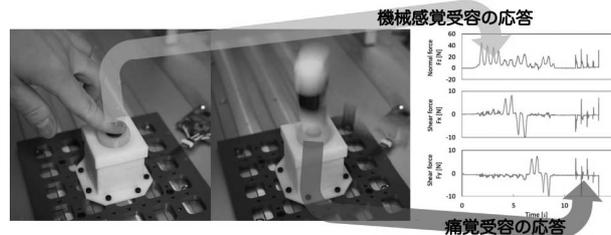


図 4 開発した磁性エラストマとスパイラルコイルを用いた柔軟触覚センサの応答：撫でる場合と引っ叩く場合の波形

### 5.2 痛覚神経系のロボットへ実装可能性

人工痛覚実装の予備段階として、我々は磁性エラストマとスパイラルコイルを用いた柔軟触覚センサを開発してきた [18]。メカニズムの詳細を省くが、柔軟かつ頑強であることが特徴である。図 4 にその様子を示そう。左は優しく撫でる感じで、中央はハンマーで強く打ち込んでいる様子である。右にそのときの 3 軸の力の応答波形を示している。優しくなでている場合は通常のカンタクトセンサーすなわち機械受容器の反応に対し、ハンマーで打ち込んだ場合は、痛覚受容器が応答すると期待され、シャープな波形から容易に識別可能である。このことは、識別経路は最初からの埋込 (生得的) として実装可能と考えられる。

それに対し、情動的-動機付けの経路は、情報の流れとともに、痛みの主体的体験や養育者との相互作用を通じて痛みの表象が獲得 (学習) されると想定される。これが痛みのクオリアに対応するのかもしれない。この表象が他者にも存在することを仮定する MNS が共感の重要な要素となる。以下で、このような心の機能の発達を構成的にアプローチする考え方が構成的発達科学で以下に紹介する。

## 6. 構成的発達科学

3 章で触れた意識の現象学の根幹である身体性や社会的相互作用を基盤とし、ロボットや計算モデルによるシミュレーションを駆使して、人間の認知発達過程の構成的な理解と、その理解に基づき人間と共生するロボットの設計論を確立することを目的としているのが、認知発達ロボティクスである [19]。

認知発達ロボティクスの考え方をより進め、多様な分野を巻き込み、発達概念を機能分化の観点から明らかにしようとするのが、構成的発達科学<sup>†</sup>である。基本的な神経構造から始まり、身体性や社会的相互作用に基づき、学習手法を介して、機能分化が段階的に生じる過程を描いている (詳細は文献 [12] などを参照)。

### 6.1 初期自己の概念

心的機能の基本課題として、意識に関連する自己の概念と共感を例に見てみよう。共感と同情はしばしば混同されて用いられるが、設計を試みることで、その曖昧さが軽減する。人工的に共感構造設計を考えるに当たり、霊長類の進化的研究から始める。霊長類学者の de Waal [20] は、情動感染から始まる共感の進化ともなげから始まる模倣の進化の並行性を示し、その進化の方向が自他の識別の増強



図5 自他認知を含む認知発達の過程(文献[14]のFig.3を改編)

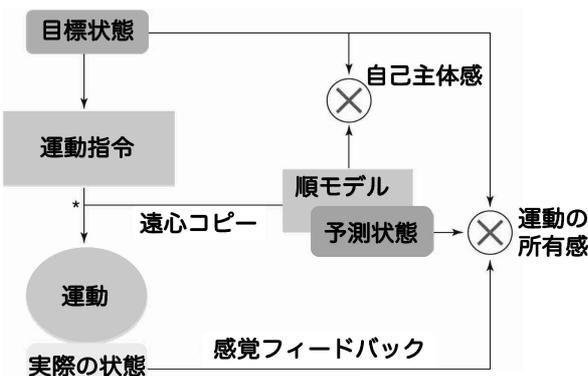


図6 自己主体感と運動の所有感の関係(文献[22]のFig.1を改編)

とも関連することを提案している。後者は、自己の概念の進化と考えられ、Neisser [21] が提唱する自己知識の五つの視点である生態学的自己 対人的自己、想起的自己、私的自己、概念的自己のうち、最初の二つをそのまま借用し、残り三つを社会的自己としてまとめて、個体発生、すなわち発達過程とみなしたのが図5である。

生態学的自己は、自己意識の原点とも言えるものであり、一時的自己ともよばれているが、Gallagher は、最小自己(miminal self) とよぶ[22]。彼は、最小自己には、二つの様相があるとし、それらを運動の帰結の予測(フォワードモデル)と適合する運動の自己主体感(sense of agency for movement)と感覚のフィードバックと適合する運動の所有感(sense of ownership for movement)とよんだ。図6に、その構造を示す。主体感と所有感の厳密な区別は議論の余地があり、以下は、筆者の解釈を示す。通常の運動経験(思ったとおりに動けた)場合、主体感と所有感は一致する。運動の意図と運動を実行する前の運動のイメージが合致するときに主体感で、運動実行時、センサフィードバック信号と予測信号の差が小さいとき、所有感が生じる。よって、自分の腕を他者から動かされる場合などの不随意運動の場合、その様子が視覚などの外受容器や筋の動きなどの内受容器のセンサフィードバック信号で予測できるとき、主体感はないが、所有感はあると見なされる。Asada et al. は、ロボカップにおけるプレーヤの感覚運動学習において、自分が生成した運動の帰結を裏切らない知覚範囲を自己身体と定義したが[23]、最小自己の意味では、運動の所有感覚

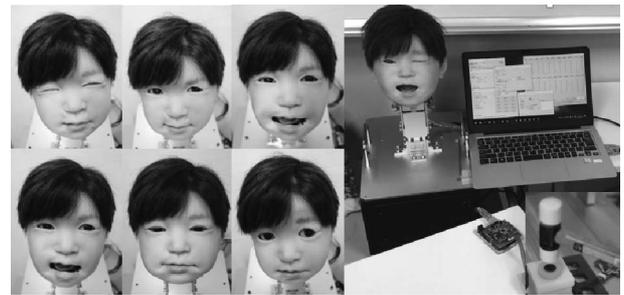


図7 新作 Affetto の表情表出(左)と痛みの表情(右)

に対応すると言えるだろう。

## 6.2 共感の発達モデル

生態学的自己から発達し、養育者との相互作用を通じて、MNSが作用し、対人的自己に至る。対人的自己は意識を実現する上で基盤となり、他者の概念が顕在化し、さらに社会的存在としての自己(社会的自己)の形成に至る。社会的自己は意識の完成形とみなせる。これらをまとめて、共感発達モデルとしての自他認知過程を文献[14]で、筆者は提案している。

先に述べたように、基本的な神経構造として痛みの感覚系を前提とする。さらに、その痛みの共有が、向社会的な行動の創発に繋がると想定する。構成的発達科学の究極のゴールは、系列的な発達段階すべてを通した実現であるが、現状は、各段階において、試行錯誤している。

自己身体の発見や自己運動の所有感覚は、生態学的な自己の確立に必要なものである。サッカーロボットが自己、環境内の物体(ボール、ゴール)、他者(敵、味方)を識別する際に、知覚と運動の相関が利用されたことは先に示した[23]。

新生児模倣は、新生児が示すミステリーの一つであるが、これを計算論的にアプローチしたのが、Fuke et al. [24]である。彼らは、未熟な視覚と触覚体験から、顔の部位の配置を再現した。また、その配置を他者観測時に射影し、顔の模倣の基盤とした。Nagai et al. [25]、Kawai et al. [26]は、視覚発達を伴う感覚運動学習がMNSの発達を促進するという仮説の下に、未熟な感覚の時期には自他が混同されるが、発達に伴い自他分離が起こり、これがMNSの基盤となっていると主張している。

共感の発達過程として、Watanabe et al. [27]は、ロボットが共感的な応答を学習するために、養育者の直感的親行動(赤ちゃんの情動状態を養育者が自動的に真似したり、誇張したりすること)を利用して、赤ちゃんロボットの情動状態を分化させる過程をモデル化したこの研究では、痛み回路というよりも、快-不快の基本情動を仮定している。

Ishihara et al. [28]は、表情表出豊かな赤ちゃんアンドロイドのAffettoを開発しているが、最近、新作を発表した<sup>†</sup>。図7にその一部を示す。先の痛覚回路と柔軟触覚センサーを簡易実装して、痛みの表情表出も可能である。

## 7. 人工モラルマシンの可能性

ロボットと倫理に関する議論に関しては、筆者の解説[11]などを参照いただくとして、本章では、Wallach and Allen

<sup>†</sup><http://www.ams.eng.osaka-u.ac.jp/user/ishihara/?p=2421&lang=en>

の人工モラルマシンの著書[29]を参考にその可能性について議論する。本書は、10年以上前に出版されながら、その序論において展開される世界の状況予測は、まさしく現在の社会が抱えているAIの最新テクノロジーが及ぼす社会的状況を的確に表している。2010年5月に起きた株価相場の瞬間的急変動のフラッシュクラッシュなどがその典型例である。翻訳した岡本・久木田もその点を指し、彼らの鋭くかつ正確な予測に感心している[30]。

Wallach and Allen は、人工的道德的行為者 (AMAs: Artificial Moral Agents) をどのように設計可能かについて、既存の関連技術を踏まえ、トップダウンとボトムアップの両面から議論している。結論から言えば、完全な人間が存在しないと同様に完璧なAMAも存在しない。かと言って、まったくできないわけでもない。倫理コードをトップダウンに埋め込んで、すぐさまフレーム問題に突き当たる。もちろん、人間もフレーム問題を解いているわけではないが、ある程度の融通性が求められている。ただし、文化や宗教の違いなどから、ある種の道德的行動の選択基準、すなわち、どのような行動を(行動選択)どのようなときに(ある行動を起こすトリガーのしきい値)が異なり、人間とて、容易ではなく、経験と学習に依存する。ここに、筆者は痛覚のポテンシャルを見出す。すなわち、痛みの記憶による共感の可能性である。彼らも痛覚に関しても言及しており、例えば、10章で痛覚は共感に必要なが十分ではないと述べている。しかしながら、何が十分に値するかは明確には述べられていない。筆者としては、痛覚神経系を内包する人工エージェントが物理的な痛みの経験から、ミラーニューロンシステムの発達を通じて(例えば、Nagai et al. [25], Kawai et al. [26]の研究参照)、他者の痛みを推定し、共感できる可能性を指摘したい。その際、痛覚のみならず、社会的な環境を通じて多様な情動の理解と表出(例えば、Watanabe et al. [27]の研究参照)が可能になり、結果として道德的行動が創発しないかと期待したい。もちろん、高度なレベルのAMAの実現は困難を極めるので、まずは、赤ちゃんや子供レベルの人工モラルエージェント (AMK: Artificial Moral Kids) を目指すべきと考えている。それは、AMAに比して、決してやさしくはないが、まだ可能性が高いこと、人間社会がAMKに対して、許容的であるだろうということ、そのことにより、人間社会がAMKに対して、肯定的に振る舞うことで、AMKと人間社会双方が適応する共生社会が描ける。ミニマムの倫理コードを埋め込み、それを理解し、拡張し、規範を確立するには、共生社会がそのような方向性を目指すことを明確にする必要がある。

規範として、アシモフのロボット三原則が頭に浮かぶ。これは、大きな矛盾をはらみつつも、ロボットの倫理則とも言われている。矛盾は人間社会そのものの矛盾の鏡像であり、その意味では、人間の倫理則といえなくもない。痛み回路は、第三原則の必要条件と察せられるし、社会的相互作用を可能にする機能は第一、二原則の遵守に必要な要素と考えられる。

もし、ロボットを道德的行為者とみなすことの合意が得られれば、それは同時に道德的被行為者ともみなすことを意味するだろうか？ ロボットなので、人間を助けることは、当然だが、人間からロボットに対して道德的行為を授ける必要があるか？ という議論になろう。筆者の考えは、人間とロボットの関係はある種の対称関係が望ましい。つまり、ロボットも道德的被行為者とみなすべきである。人間自身が人間を差別してきた、過去の歴史から学べば、ロボットは究極の差別対象であろう。もちろん、自律性のレベルにより「区別」する必要がある。

ここまでの議論を少しまとめると以下である。痛みに対応する神経回路や快-不快に対応する原始情動をロボットに付与することで、視覚・触覚などを通じた自己の身体への気付きのみならず、過度の触覚刺激が痛みとなると感知し、これが過ぎると故障や破壊に至ると認識する(より深い意味での生態学的自己に相当。自他の区別はない。獲得されカプセル化されることで無意識レベルの行動・認識カテゴリとなる)。環境内の物体に対する適応的操作に加え、自身と似た他者の存在(最初は養育者)に気付きはじめる(対人的自己)。これが向社会的行動の原初で、他者の行動や知覚に対する模倣の動機づけ(MNS的作用の結果)バイアスにより、共感的な機能が備わる。同情や哀れみ行為の下地となる規範(モラル)が形成される。これにより道德的と映る行為が可能になる。このような行為を行っているロボットを観察したり、そのような行為を直接受ける人間側は、このようなロボットが逆に道德的被行為者、すなわち、人間側から道德的行為を授けられる対象になるのは、自然に映る。もちろん、上記の過程と関係なく表層的、それゆえ道德性に関する理解の薄いロボットに対しては、行動責任の帰属も含め、異なる対応になるだろう。

## 8. おわりに

痛みの神経回路を拘束条件として、ロボットの意識設計の可能性から共感・モラル・倫理に関するかなり広範な、それゆえ浅薄・散漫な議論を展開してきた。多くのそして深い課題が含まれており、一朝一夕では解決困難であるが、挑戦していくしかない。今後の課題も含めてまとめると、

- (1) 痛みの種類、場所、強度などの情報を伝える神経回路は、通常の触覚との区別がセンサレベルでできれば、原理的に実装可能で体性感覚野が信号を受け取り活性化される。
- (2) 体性感覚野が活性化しているにもかかわらず、催眠などで痛みが軽減されると感じることから、島皮質が関与しているらしく[31]、痛みの情動的-動機づけの部分はその表象を(1)とは別に獲得する学習過程が必要。
- (3) 逆に体性感覚野が活性化せずとも、他者が痛みを加えられる状況で2が活性化することが共感の必要条件。痛みの予測とその回避行動の計算は、自由エネルギー原理が使えるかもしれない。
- (4) 自他を含めて、(3)の経験が豊かになることで、道德的行為を生成することが可能になるかもしれない。

としてモラルの原型が道徳的行為生成過程に垣間見えると嬉しい。

- (5) 人間側が(4)の現場に遭遇する経験を持つことで、ロボットに対して、道徳的行為を受けることが不自然ではなくなる。
- (6) (4)や(5)の道徳的(被)行為者としてのロボットが認知されれば、ここでは議論しなかったが法制度における電子人格性が議論され始めるだろう。筆者の解説[11]で一部、議論している。

**謝 辞** 本研究の一部は科学研究費補助金特別推進研究「神経ダイナミクスから社会的相互作用に至る過程の理解と構築による構成的発達科学」(JP24000012), JST 戦略的創造研究推進事業 (RISTEX)「自律性の検討に基づくなじみ社会における人工知能の法的電子人格」(平成 29~32 年度, 研究代表者: 浅田稔) および JST 戦略的創造研究推進事業 (CREST)「脳領域/個体/集団間のインタラクション創発原理の解明と適用」(平成 29~34 年度, 研究代表者: 津田一郎) の支援によって行われた。本研究の参画メンバーおよび研究室メンバーに感謝する。

### 参 考 文 献

- [1] 独立行政法人情報処理推進機構 AI 白書編集委員会 (編): AI 白書 2017. KADOKAWA, 2017.
- [2] 独立行政法人情報処理推進機構 AI 白書編集委員会 (編): AI 白書 2019. KADOKAWA, 2018.
- [3] 乾敏郎: 感情とはそもそも何なのか: 現代科学で読み解く感情のしくみと障害. ミネルヴァ書房, 2018.
- [4] 尾形哲也: “深層学習とマニピュレーション”, 日本ロボット学会誌, vol.35, no.1, pp.28-31, 2017.
- [5] J. Tani: Exploring Robotic Minds: Actions, Symbols, and Consciousness as Self-Organizing Dynamic Phenomena. Oxford University Press, 2016.
- [6] エトムント フッサール (著), 浜渦辰二 (翻訳): デカルト的省察. 岩波文庫, 2001.
- [7] マルティン ハイデッガー (著), Martin Heidegger (原著), 細谷貞雄 (翻訳): 存在と時間 (上). ちくま学芸文庫, 1994.
- [8] マルティン ハイデッガー (著), Martin Heidegger (原著), 細谷貞雄 (翻訳): 存在と時間 (下). ちくま学芸文庫, 1994.
- [9] モーリス メルロ=ポンティ (著), 竹内芳郎 (翻訳), 小木貞孝 (翻訳): 知覚の現象学 1. みすず書房, 1967.
- [10] モーリス メルロ=ポンティ (著), 竹内芳郎 (翻訳), 木田元 (翻訳), 宮本忠雄 (翻訳): 知覚の現象学 2. みすず書房, 1974.
- [11] 浅田稔: “痛みを感じるロボットの意識・倫理と法制度”, 人工知能学会誌, vol.33, no.4, pp.450-459, 2018.
- [12] 浅田稔: “情動から共感へ: 構成的発達科学の挑戦”, 人工知能学会誌, vol.31, no.5, pp.685-693, 2016.
- [13] Q. Chen, J.B. Panksepp and G.P. Lahvis: “Empathy is moderated by genetic background in mice,” PloS One, vol.4, no.e4387, 2009.
- [14] M. Asada: “Towards artificial empathy,” International Journal of Social Robotics, vol.7, pp.19-33, 2015.
- [15] 浅田稔: “ミラーニューロンシステムが結ぶ身体性と社会性”, 日本ロボット学会誌, vol.28, no.4, pp.386-393, 2010.
- [16] D. Purves, G.A. Augustine, D. Fitzpatrick, W.C. Hall, A.-S. LaMantia, J.O. McNamara and L.E. White, editors: Neuroscience, fifth edition. Sinauer Associates, Inc., 2012.
- [17] J. Kuehn and S. Haddadin: “An artificial robot nervous system to teach robots how to feel pain and reflexively react to potentially damaging contacts,” IEEE Robot. Autom. Lett., vol.2, no.1, pp.72-79, 2016.
- [18] T. Kawasetsu, T. Horii, H. Ishihara and M. Asada: “Flexible tri-axis tactile sensor using spiral inductor and magnetorheological elastomer,” IEEE Sensors Journal, vol.18, no.4, pp.5834-5841, 2018.
- [19] M. Asada, K. Hosoda, Y. Kuniyoshi, H. Ishiguro, T. Inui, Y. Yoshikawa, M. Ogino and C. Yoshida: “Cognitive developmental robotics: a survey,” IEEE Transactions on Autonomous Mental Development, vol.1, no.1, pp.12-34, 2009.
- [20] F.B.M. de Waal: “Putting the altruism back into altruism: The evolution of empathy,” Annu. Rev. Psychol., vol.59, pp.279-300, 2008.
- [21] U. Neisser: The self perceived, pp.3-22. Emory Symposia in Cognition. Cambridge University Press, 1994.
- [22] S. Gallagher: “Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science,” Trends in Cognitive Sciences, vol.4, no.1, pp.14-21, 2000.
- [23] M. Asada, E. Uchibe and K. Hosoda: “Cooperative behavior acquisition for mobile robots in dynamically changing real worlds via vision-based reinforcement learning and development,” Artificial Intelligence, vol.110, pp.275-292, 1999.
- [24] S. Fuke, M. Ogino and M. Asada: “Body image constructed from motor and tactile images with visual information,” International Journal of Humanoid Robotics, vol.4, pp.347-364, 2007.
- [25] Y. Nagai, Y. Kawai and M. Asada: “Emergence of mirror neuron system: Immature vision leads to self-other correspondence,” IEEE International Conference on Development and Learning, and Epigenetic Robotics (ICDL-EpiRob 2011), CD-ROM, 2011.
- [26] Y. Kawai, Y. Nagai and M. Asada: “Perceptual development triggered by its self-organization in cognitive learning,” Proc. of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.5159-5164, 2012.
- [27] A. Watanabe, M. Ogino and M. Asada: “Mapping facial expression to internal states based on intuitive parenting,” Journal of Robotics and Mechatronics, vol.19, no.3, pp.315-323, 2007.
- [28] H. Ishihara, B. Wu and M. Asada: “Identification and evaluation of the face system of a child android robot affetto for surface motion design,” Frontiers in Robotics and AI, vol.5, p.119, 2018.
- [29] W. Wallach and C. Allen: Moral Machines: Teaching Robots Right from Wrong. Oxford University Press, 2008.
- [30] ウェンデル・ウォラック (著), コリン・アレン (著), 岡本慎平 (翻訳), 久木田水生 (翻訳): ロボットに倫理を教える—モラル・マシーン—. 名古屋大学出版会, 2019.
- [31] T.T. Rajj, J. Numminen, S. Närvänen, J. Hiltunen and R. Hari: “Strength of prefrontal activation predicts intensity of suggestion-induced pain,” Human brain mapping, vol.30, no.9, p.2890-7, 2009.



浅田 稔 (Minoru Asada)

大阪大学基礎工学部制御工学科卒業, 同大学大学院基礎工学研究科修了, 工学博士 (大阪大学). 大阪大学工学部教授, 大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻教授となり現在に至る. この間 1 年間米国メリーランド大学客員研究員. 知能ロボットの研究に従事. ロボカップ国際委員会理事 (2008 年までプレジデント). 2017 年 3 月より日本ロボット学会副会長, 2019 年 3 月より同会長. (日本ロボット学会正会員)