

拡張する身体

サイボーグ技術と脳の可塑性

大塚淳

1. はじめに

サイボーグ、すなわち工学デバイスによる身体能力の代替あるいは拡張は、SFにおける古典的なテーマだといえよう。身体をある種の機械と見なす考え方は、決して古いものではない。すでに17世紀の機械論哲学者達にとって、身体とは、精巧な時計あるいは自動人形に毛が生えた程度のものでしかなかった。しかし機械と身体の融合が現実的な可能性として実感されるようになるには、20世紀を待たねばならなかった。サイボーグ技術は、身体機能の生理学的な理解と、その機能を機械的手段で実装しうる工学技術の発展によって、初めて日の目をみることになったのである。今日、我々はその実例を、人工臓器やBMI(ブレイン・マシン・インターフェイス)といった形で目にすることができる。すでにサイボーグはSFの中だけの存在ではない。むしろGrayのいうように、既に多数のサイボーグが社会に存在しているのだ(Gray 1995, p.2)。とりわけ医療現場においては、ペースメーカー、コンタクトレンズから人工心臓や人工血管まで、身体と機械のハイブリッド化は極めて日常的なものとなっている。

しかしながらこの一方で、身体のサイボーグ化は、倫理的および心情的な反対論を引き起こしてきた。こうした批判の動機の一つに、「自然本来の人間身体」に手を加えることへの抵抗感がある。Williams(1997)は、人工臓器など医療用サイボーグの普及によって、我々の身体がますます「不確か」になってきている現状を指摘している。確かに私の心臓は、生理的に見れば血液を循環させるポンプに過ぎないのかもしれない。しかしそれは同時に唯一無二の私の身体であったはずである。それが人工物で置き換えられたとき、私のパーソナリティはどうなってしまうのだろうか(加藤 2005)。

我々の身体はまずもって自然から与えられたものであり、それは成長や疾病、傷害などによって多少変化することもあっても、基本的には生涯を通して同一の本質を保っている、という考えは根強いものである。そして我々が日常、そうした身体の不変的本質に自己の同一性のいくらかを重ね合わせている、ということも恐らく事実であろう。しかし、ここでいわれる「自然本来の人間身体」とは、実のところ何を指しているのだろうか。それは何がしか客観的な仕方で確定できるものなのか、あるいは我々が個別的な経験をもとに作り上げる、主観的な自己了解の一種なのか。また我々は、様々な文化において、身体へ

の装飾が行われていることを知っている。そうであれば、仮に自然本来の身体というものがあるとして、それに手を加えることは人間にとってそんなに不自然なことなのだろうか。

サイボーグ技術の発展は、本物の身体とは何なのか、そしてその改変は我々の自己理解に対してどのような意味を持つのか、という問いを我々に突きつけずにはおかない。本稿では、生物学および脳科学的な知見を参照しつつ、この問題について考えてみたい。

2. 遺伝子にコード化された身体？

「自然本来の人間身体」をどこに求めるべきだろうか。一見、この答えは遺伝子を見ることによって明確に決着が付きそうな問題にも見える。ヒトゲノム計画により、現在ではヒトの遺伝子の全塩基配列が明らかになっている。ゲノムというこの「設計図」に書き込まれた完成形態を、本来の人間の身体として定義することができるのではないだろうか。

ゲノムに生物の設計図が含まれているという考えは、前世紀の生命科学を支えてきた主要パラダイムである。DNA が RNA を作り、RNA がタンパク質を作り、タンパク質が表現型を形成する。分子生物学のこの「セントラル・ドグマ」によれば、生物のあり方を決める主導権は、DNA にこそある。しかし近年の生物学および生物学の哲学では、とりわけ発生システム論(DST; Developmental System Theory)と呼ばれる立場から、こうした考えに対して多くの批判が加えられている(例えば、Keller 2000, Oyama et al. 2001, Moss 2002, Sterelny & Griffiths 1999)。DST 論者によれば、生物の設計図としての遺伝情報という概念は、単なるメタファーにすぎない。このメタファーには、遺伝子のみが発生の主要要因であり、他の要素は単にその「指令」に従うように材料を提供するにすぎない、という考えが含まれている。しかし実際の発生プロセスを見てみると、こうした想定は必ずしも正しくないのである。

大まかにいって生物の身体は、DNA から転写・翻訳されたタンパク質から構成されている。しかし当然のことであるが、遺伝子はそれ自身のみで発現するわけではない。タンパク質の合成を行うのは、調節タンパク、RNA ポリメラーゼ、スプライソソームなどといった細胞質内の様々な要素である。また合成されたタンパク質を必要な位置に正しく輸送するためにも、ゴルジ体や小胞体タンパクなどといった細胞内小器官が必要である。発生プロセスにおけるこれらの要素は、単に設計図によって指定される「材料」以上の役割を有している。例えば DNA メチレーションは、ゲノム内の特定領域にメチル基を付加・除去することで、当該部分の遺伝子の発現を制御する。また選択的スプライシングは、転写された mRNA を編集することによって、同一の塩基配列から異なったアミノ酸配列をもたらす。DNA 以外のこれらの細胞内リソースは、いつどのような塩基配列を発現させ、そこか

らどのようなタンパク質を合成するかを決める重要な要因である。つまり見方によっては、このような細胞質内の各要素の働きこそがタンパク質の発現を決めているのであり、DNAはその際に参照されるテンプレートにすぎない、ともいえるのである(Sarkar 2005, pp. 378-382)。

こうした発生における遺伝子以外の要素は、エピジェネティック（後成的）な要因と呼ばれる。この効果がとりわけ顕著に見られるのは、高等生物の脳の形成である。ヒトの脳内には数十から数千億のニューロンがあるといわれる。これらの神経細胞はシナプスを通じて互いに結合しながら、脳内の各所において、機能的に分化した構造を形作っている。各神経細胞は、核内の遺伝子に基づいて軸索の形成を導くタンパク質を合成し、互いに接続する。しかしそのようにしてできる神経回路の完全な「設計図」が、神経細胞の核内に書き込まれているわけではない。実際、脳内の膨大な神経細胞とその一つ一つの接続方法を、高々2万数千ほどしかないヒトの遺伝子によって指定するのは不可能である。よって具体的な神経回路の形成には、環境的な要因が大きな意味を持つてくる。その例としてよくあげられるのが、一次視覚野(V1)における眼優位性コラムの形成である。視神経細胞からの視覚情報は、外側膝上核(LGN)を経由してV1へと送られる。V1には眼優位性コラムとよばれる円柱状の構造が並んでおり、それぞれのコラムは互い違いに左右の眼からの情報を処理している。生まれたばかりのサルやネコの一方の目をふさいで育成すると、そちらの目からの入力を受ける眼優位性コラムだけが非常に小さくなる。つまりV1における神経回路形成には、生後の環境刺激が大きな役割を果たしており、それが脳機能の成立にも直結しているのである。

脳をはじめとした複雑な表現型を形作るためには、遺伝子以外の細胞内要素や環境が提供する様々な「情報」が必要である。そしてその情報如何によって、最終的に生じる表現型は大きく変わってくる。つまり完成形態を指定する見取り図が、遺伝子の中に入っているわけではないのである。実際、そのような見取り図は細胞全体、例えば受精卵の中に入っているわけでもない。むしろ表現型は、生物外の環境を含む様々な要因の相互作用によって、後成的に作り上げられていくものである(Oyama et al. 2001)。こうしたことを考え合わせれば、ヒトの身体の確定的な姿を、生物学的な遺伝情報から得るのは、困難だといわねばならないだろう。

3. 身体図式の可塑性

前節で見たように、確定した「人間本来の身体」像を遺伝子の中に求めることは難しくうである。しかしたとえそうであっても、我々は日ごろ、自分の身体についての何がしか

の所有感を持っている。たとえ私の身体のあり方は、客観的には環境に応じて大きく変わり行くものだったとしても、それは私にとっては常に変わらず安定した一つの対象であり続けるように感じられる。この主観的な所有感のもとになっていると考えられているのが、身体図式(body schema)といわれる、脳内の身体表象である。

身体図式は、頭頂葉、運動前野腹側部、体性感覚皮質、島皮質などを含む広範な神経回路網によってコードされると考えられている(Homes & Spence 2004, Berlucchi & Aglioti 1997)。とりわけ重要なのは頭頂葉であり、この領域への障害は自己の身体感覚を大きく変えることが分かっている。たとえば身体失認の患者は、自分の身体の特定位、例えば左腕が相変わらずもとの位置についているにも関わらず、それが自分の腕であることを否定したり、あるいはそれが誰か他の人の腕であると主張したりする(Graziano & Botvinick 2002)。また同様の部位を損傷することにより、過剰肢(身体部分が実際よりも多くあると感じる)が生じるという報告もある。驚くべきことにこの患者は、あたかも腕や足が3本以上あるかのように、自分の肢の数を多く見積もるのである(Halligan et al. 1993, Sellal et al. 1996)。

以上の脳領域は、どのように身体表象をコード化しているのだろうか。これらの部位には、体性感覚や視覚などの複数の感覚情報に反応するバイモーダルニューロンが存在する。これらのニューロンは特定の受容野を有しており、一定の空間内の刺激に応じて発火するのであるが、この受容野の範囲が異なった感覚のモードを通じて共通しているのである。例えば、右手の触覚に反応するバイモーダルニューロンは、右手周辺からの視覚刺激に良く反応する。現在では、身体部位近傍からの複数の感覚刺激を統合するこうしたニューロンが、身体図式の基盤になっていると考えられている(Maravita et al. 2003)。

脳内の多くのニューロンが可塑性を有しているように、これらのニューロンも、環境と経験による再編を受けている。実際、成長過程において、身体図式は身体の拡大にともなって広げられなければならないだろう。しかしこうした身体感覚の変更は、もっと短期的な間にも起こりうる。つまり我々の身体は、その主観的側面においても、確定された不変的なものではなく、経験によって様々に変化しうるものなのである。

身体図式の柔軟性を示すものとして注目されているのが、道具の使用である。入来らは、ニホンザルを用いた実験で、道具の使用が身体図式を変えることを示した(Iriki et al. 1996, Maravita & Iriki 2004, 入来 2004)。この実験では、道具を使用していないときと使用しているときで、サルの身体図式をコードするバイモーダルニューロンがどのような受容野を持つかが調べられた。その結果、道具を使用しているときは、本来手の近傍のみに反応していたバイモーダルニューロンの受容野が、道具の先端を含むように広がることが分かった。

つまり道具を含むような仕方で、サルの身体図式が再編成されたのである。

Ishibashi et al.(2002)は、こうした変化のメカニズムを調べている。彼らは道具学習中のサルの頭頂葉から、直接皮質細胞を吸い出し、そこから単離した mRNA を分析した。細胞内に含まれる mRNA を調べることによって、神経細胞がそのときにどのようなタンパク質を合成しているのかを知ることができる。その結果、学習中には BDNF やその受容体 *trkB*、NT-3 などといった分子の合成が活発になることが分かった。これらは一般に神経栄養因子といわれ、2 節で確認した、眼優位性コラムの神経回路形成においても用いられていることが分かっている(Cabelli et al. 1997)。以上のことから、頭頂葉のバイモーダルニューロン（およびそれに基盤をもつ身体図式）も、眼優位性コラムと（少なくともある程度）類似したメカニズムによって拡張・再編成されていると推測されるのである。

ヒトを対象とした実験結果は、こうした道具による身体図式の変更が人間でも同様に生じていることを示唆している(Maravita et al. 2002, Inoue et al. 2001)。実際、普段我々が道具を使うとき、その道具が自らの身体の一部として同化されているように感じられることがある。入来らの実験は、こうした身体の延長感覚を神経ベースで裏付けるものだといえよう。つまり日常的に道具を使用するとき、脳はあたかもその道具を身体のうちに組み込むように、我々の身体感覚を積極的に改変し、拡張しているといえるのである。

4. BMI と身体の拡張

今日の医療用サイボーグ技術で最も注目されているものといえば、BMI（ブレイン・マシン・インターフェイス）であろう。BMI はその名の通り、脳の神経細胞と機械を接続することで、随意的に動かすことのできる人工デバイスの開発を目指す。現在では、身体機能を失った患者がスクリーン上のカーソルを動かして意思疎通を行ったり、脳に電極を埋め込んだサルにロボットアームを操作させることも可能になっている¹。

人工デバイスを意図に連動させるためには、まず神経細胞の活動を測らなければならない。現在 BMI に使用されている測定方式には、脳波(EEG)を測る非因襲的な方法と、脳に電極を埋め込むことで直接的にニューロンの活動を測定する因襲的な方法がある。EEG による測定は空間解像度が粗いため、具体的にどのニューロンが発火しているかの情報までは得ることができない。したがって多くの情報を要する複雑な機構の制御には、現段階ではインプラント式の BMI に頼るほかない(Lebedev & Nicolelis 2006)。以下本論でも、後者を中心に話を進めることにする。

Chapin et al.(1999)は、レバーを押して水を飲むように訓練されたラットの脳（一次運動野および視床腹側部）に電極を埋め込み、それがレバーを押すときの神経発火パターンを

測定した。次にニューラルネットワークの学習を通して、その信号をもとにラットのレバー操作行動をシミュレートするようなコード変換を求めた。この予測精度が十分なレベルに達したところで、その信号をロボットアームにつなぎ変えた。すると、ラットのレバー操作とロボットアームの動きを同調させることが可能になった。さらに驚くべきことに、これをしばらく続けるうちに、ラットは自らレバーを押さなくても、ロボットアームだけを動かして水を飲むことを覚えたのである。

さらに Carmena et al.(2003)は、マカクザルを用いて、より複雑なロボットアームを BMI で制御することに成功した。このデバイスは頭頂葉前部からサンプルした複数ニューロンの活動情報を抽出し、手の位置、早さ、握力など複数の自由度を持つロボットアームへと伝える。ロボットアームの状態はディスプレイに示され、サルには視覚的なフィードバックが与えられる。するとサルはスティックを動かすことでこのロボットアームを制御することを覚え、さらに実験を続けることで、スティックを全く動かさずとも、ただ脳内活動のみによってロボットアームを正確に動かすことができるようになったのである。

BMI の使用においては、訓練が重要な意味をもつ。これは四肢麻痺患者が BMI を用いてカーソルを制御するケースでもそうである。はじめは、カーソルを直接意図して動かすことはできない。患者には何らかのほかの運動（例えば舌を動かすなど）を意図してもらい、それに合わせてカーソルが動くようにデバイスを調整するしかない。しかし練習を繰り返すことで、最終的に患者は他の運動を介さずとも、直接的にカーソルを意図して動かすことができるようになる(Kennedy et al. 2000)。患者が直接カーソルを操作できるようになったとき、あるいはマカクザルが自らの腕を動かすことなくロボットアームを操縦し始めたとき、彼らの脳の中では何が起きているのか。最もありそうなのは、身体図式の変化である(Carmena et al. 2003, Lebedev et al. 2005)。つまり、頭頂葉の神経細胞が再編成されることで、デバイスを含むように彼らの身体像が拡張したと考えられるのである。これを Kennedy(2000, p. 202)は、患者が「カーソルを制御するための皮質を発達させた」のだらうと述べている。我々は先に、道具の使用が人間の身体感覚を拡張することを見た。同様の仕方で、BMI は単に装着者の運動能力を拡張するだけでなく、彼の身体像をも拡張するといえるのである。

5. 身体を作るヒト

我々は2節で、生物学的に人間の身体を確定することの難しさを見てきた。ゲノムは完成形態が書かれた設計図ではなく、それをもとに様々な表現型が帰結しうるリソースの一つであるにすぎない。そうではあるが、やはりそれぞれの生物には、典型的な身体および

表現型のあり方というものが考えられるはずである。ヒトは直立歩行をするが、同じことがラットでも可能だとは考えにくい。サルなら訓練次第でやってのけるかもしれないが、やはり自然環境にいるサルはそうしないのであって、直立歩行をサルの典型的なあり方とみなすことはできない。こうして我々の問いは、ふりだしに戻る。我々はヒトの典型的な身体を、どこに求めるべきなのだろうか。

ある表現型が典型的なものに見なされるためには、それは単に特定の個体あるいは世代のみに確認されるのではなく、複数の世代間で安定的に認められる必要があるだろう。DSTが教えることは、もしそのような頑健な構造を求めようとするなら、伝承される発生マトリクス全体を考慮しなければならない、ということである(Oyama et al. 2001)。そのような発生マトリクスには、遺伝子だけでなく、エピジェネティックな発生要因、行動性向、言語などのシンボル体系といった、さまざまなレベルの構造が含まれるだろう(Jablonka 2001)。表現型は、受精と同時に規定されるのではなく、これらの発生マトリクスの中で徐々に作られ、この発生マトリクスごと伝承されていくのである。

よって、もし「自然本来の人間身体」というものを考えなければならないのだとしたら、このような発生と環境のダイナミクスにおいて生じてくる身体を考えなければならない。このうちには当然、道具の習得と使用も含まれるだろう。実際、道具の使用は、世代を通して伝承され繰り返し現れる典型的な特徴の一つである。このことは、何を意味するだろうか。我々は3節で、道具の使用が脳の再編成と身体図式の再形成をもたらすことをみてきた。もしそのような道具使用が、ヒトの頑健な発生マトリクスの一要素として認められるなら、人間の典型的な身体および身体像は、もともとそうした道具使用によって後成的に拡張されるべく開かれたものだということになる。そうであれば、「自然本来の人間身体」なるものも、ある種の確定的な状態によってではなく、むしろ絶え間ない変化によってこそより良く定義されるのだと考えなければならないだろう。つまり、「自然な人間身体」とは、自らの皮膚に囲まれた領域にとどまらずに、恒常的な拡張と再編を繰り返していく身体なのである。

Homo faber (作るヒト)とは、もともと道具を作る人間の本質を示す語であった。今や我々はこの言葉を、自らの身体を作る人間の本質を指すものとして用いることができる。ヒトは、道具を作り始めると同時に、自らの身体をも改変していく手段をも手に入れた。サイボーグは、そのような人間が手に入れつつある、新たな身体なのかもしれない。

註

¹ もともと BMI の研究は、筋萎縮性側索硬化症（ルー・ゲーリック病）や脳卒中、脊髄損傷などにより四肢が麻痺し、「閉じ込められた (locked-in)」患者との意思疎通を図る目的で進められてきた。それが現在では、米軍 (DARPA ; 米国防総省高等研究計画局) による積極的な支援を受けている。その思惑は、思考だけで操縦可能なサイボーグ兵器の開発だといわれている。

文献

- Berlucchi, G. and Aglioti, S. (1997). 'The body in the brain: neural bases of corporeal awareness', *TINS*, 20(12), 560-564.
- Carmena, J. M. et al. (2003). 'Learning to control a brain-machine interface for reaching and grasping by primates', *PLoS Biol.*, 1(2), 193-208.
- Chapin, J. K. et al. (1999). 'Real-time control of a robot arm using simultaneously recorded neurons in the motor cortex', *Nat. Neurosci.*, 2, 664-670.
- Donoghue, J. P. (2002). 'Connecting cortex to machines: recent advances in brain interfaces', *Nat. Neurosci. Supp.*, 5, 1085-1088.
- Gray, C. H. (Ed.) (1995). *The Cyborg Handbook*, Routledge.
- Graziano, M. S. A. and Botvinick, M. M. (2002). 'How the brain represents the body: insights from neurophysiology and psychology', in Prinz and Hommel (Eds.), *Common Mechanisms in Perception and Action* (pp. 136-157), Harvard University Press.
- Halligan, P. W. et al. (1993). 'Three arms : a case study of supernumerary phantom limb after right hemisphere stroke', *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*, 56, 159-166.
- Holmes, N. P. and Spence, C. (2004). 'The body schema and the multisensory representation(s) of peripersonal space', *Cogn. Process*, 5(2), 94-105.
- Inoue, K. et al. (2001). 'Activation in the ipsilateral posterior parietal cortex during tool use: a PET study', *NeuroImage*, 14, 1469-1475.
- Iriki, A. et al. (1996). 'Coding of modified body schema during tool use by macaque postcentral neurones', *NeuroReport*, 7, 2325-2330.
- 入來篤史 (2004). 『道具を使うサル』, 医学書院.
- Ishibashi, H. et al. (2002). 'Tool-use learning selectively induces expression of brain-derived neurotrophic factor, its receptor *trkB*, and neurotrophin 3 in the intraparietal multisensory cortex of monkeys', *Cognitive Brain Research*, 14, 3-9.
- Jablonka, E. (2001). 'The systems of inheritance', in Oyama et al. (Eds.), pp. 99-116.
- 加藤和人 (2005). 「『機械』と『歴史』のあいだ 生命科学の身体観」, 菊池編 『身体論のすすめ』 (138-151 頁), 丸善.
- Keller, E. F. (2000). *The century of the gene*, Harvard University Press. (2001, 長野・赤松訳『遺伝子の新世紀』, 青土社)
- (2001). 'Beyond the gene but beneath the skin', in Oyama et al. (Eds.), pp. 299-312.
- Kennedy, P. R. et al. (2000). 'Direct control of a computer from the human central nervous system', *IEEE Trans Rehabil Eng.*, 8(2), 198-202.
- Lebedev, M. A. and Nicolelis, M. A. L. (2006). 'Brain-machine interfaces: past, present and future', *TRENDS in neurosciences*, 29(9), 536-546.
- Lebedev, M. A. et al. (2005). 'Cortical ensemble adaptation to represent velocity of an artificial actuator controlled by a brain-machine interface', *J. Neurosci.*, 25, 4681-4693.
- Maravita, A. et al. (2002). 'Tool-use changes multimodal spatial interactions between vision and touch in normal humans', *Cognition*, 83, B25-B34.
- Maravita, A. et al. (2003). 'Multisensory integration and the body schema: close to hand and within reach', *Curr. Biol.*, 13, R531-R539.
- Maravita, A. and Iriki, A. (2004). 'Tools for the body (schema)', *TRENDS in Cognitive Science*, 8(2), 79-86.
- Moss, L. (2002). *What genes can't do*, The MIT Press.
- Mussa-Ivaldi, F. A. and Miller, L. E. (2003). 'Brain-machine interfaces: computational demands and clinical needs meet basic neuroscience', *TRENDS in neurosciences*, 26(6), 329-334.
- Nicolelis, M. A. L. (2003). 'Brain-machine interfaces to restore motor function and probe neural circuits', *Nat. Rev.*

- Neurosci.*, 4(5), 417-22.
- 榊原学・吉岡亨 (2003). 『システムとしての脳』, 共立出版.
- Oyama, S. et al. (2001). *Cycles of contingency*, The MIT Press.
- Sarkar, S. (2005), *Molecular Models of Life*, The MIT Press.
- Sellal, F. et al. (1996). 'L'homme à six bras: Un examen de membres fantômes surnuméraires après ramollissement sylvien droit', *Rev. Neurol.*, 152(3), 190-195.
- Sterelny, K. and Griffiths, P. E. (1999). *Sex and Death: An introduction to philosophy of biology*, The University of Chicago Press.
- Williams, S. (1997). 'Modern medicine and the "uncertain body": from corporeality to hyperreality?', *Soc. Sci. Med.*, 45(7), 1041-1049.
- Wolpert, D. M. et al. (1998). 'Maintaining internal representations : the role of the human superior parietal lobe', *Nat. Neurosci.*, 1(6), 529-533.

[哲学博士課程・日本学術振興会特別研究員]