

コメント

津田氏のコメントに答えて

多賀巖太郎 (東京大学薬学部)

(1993年4月26日受理)

津田一郎氏 (九州工業大学情報工学部) から、筆者らの論文

「生物をデザインする; 二足歩行運動の神経筋骨格系モデル」

多賀巖太郎、山口陽子、清水博 著

(物性研究 59-2, 1992-11)

についての、的確な総括や建設的な批判をふくんだコメントを頂いた。これに対する筆者の意見を述べる。

津田氏のコメントの中で最も本質をついた点は、生物と環境との間に「情報流の循環」が起こり、環境と分離不可能になったとき機能が発現し、そのときには機能を外から陽に与えなくても、逆に「分離不可能性」によって機能が定義されるのではないかと、という指摘である。まさに、我々のモデルは、歩行という機能が、生体と環境とが引き込みによって分離不能になったときに、安定に現れるということを示している。この環境との分離不可能性という概念が、生物の機能生成にどれだけ一般性を持っているか、そしてこれを一般化した記述が可能か、ということは極めて重要な問題だと思われる。そのためには、歩行運動だけでなく、生体での様々な現象を丹念に調べていくことも必要であろう。例えば、免疫系では自己・非自己の「分離不可能性」によって、逆に免疫の恒常性が保たれているという興味深い示唆もある。

ただ、情報流の循環による環境との分離不可能性は、生物の機能生成に関して、必要条件であって十分条件ではないように思われる。例えば、生物らしい機能を生成するモデルがあったとしよう。我々はそのモデルで、生体と環境との分離不可能性が生じているときに機能が生成しているということを示すことはできるだろう。しかし、モデルである以上モデラーの恣意性なしに機能が生成したということが本当に言えるだろうか。つまり、モデルの存在自体に、モデルとモデラーの分離不可能性が存在するのだ。さらに、生物の機能の生成というものは、外部からの観測者にとって観測・記述が困難な生物の「主体性」と深く結びついているように思われる。いったんモデルで記述された世界は主体不在の世界であって、その世界自体がどのようにしてできたのかは、観測者の被観測者の主体性に関する解釈によるところが大きいだろう。したがって、環境との分離不可能性のみか

ら機能を定義するという事は難しいのではないだろうか。

では、もう少し歩行モデルに関する特定の問題に移ろう。

我々のモデルで個々のパラメーターが持つ生物学的意味づけが欠如しているという津田氏の指摘は、ある意味では正しいが、ある意味では無理な注文である。例えば、神経系には歩行運動のリズムを生成する神経振動子が存在するということは実験的にはほぼ確かである。しかし、神経振動子どうしが具体的にどのような結合をしていてどのようなネットワークを構成しているかなどということは、特に高等動物の場合、現状ではとても知ることはできない。知覚情報のフィードバック経路はなおさらである。もちろん、モデルの各部分のもっともらしさを裏付けるような実験結果はいくつか存在する。しかし、我々を容易によせつけない複雑さを持ったシステムに切り込むためには、モデルの出力空間でのパフォーマンスに照らし合わせて、可能なパラメーター（というよりは力学系の構造）の絞り込みを行うというのは、一つの可能な方法であって、現状ではむしろそれを積極的に行うことが生物の理解につながるのではないかというのが筆者の意見である。そして何よりも、モデルの構造そのものが、実際の系の構造に対する予見性を持っていることを期待される。ただ、その構造の絞り込みをどのように行うかという一般的な設計原理に関しては、我々はまだ十分につかんでいないというのが現状である。

環境が変わったときに現れる過渡現象を取り除き、かつ柔軟性を持たせることができるだろうかという津田氏のコメントは、我々のモデルの限界に関する深刻な問題を含んでいる。我々が行う運動は、実際それほど定常的なものでないし、物理的な環境も非定常的なものである。モデルでは、平らな床の上での定常的な歩行の安定性が、比較的定常的な環境の変化にも通用することを示すことができた。しかし、激しい非定常性を持った環境に対する安定性には限界がある。しかも、歩きだしたり、立ち止まったりするような不連続な運動を作ることは極めて難しい。こうなってくると生物の運動に理想的な定常状態とそれに至る過渡状態とが存在するのだろうかという疑問がわいてくる。我々のモデルでは、安定な歩行運動は定常的なリミットサイクルであるが、重要なのはその定常性ではなく、引き込みによって系全体が安定化するはたらきなのである。その意味では、運動がリミットサイクルでもカオスでも良い。

二体の引き込みを調べた意義は、物理的環境変化に比較的ロバストだったリミットサイクルが、生物的環境変化に対してどのくらい柔軟かを調べることにある。

そのために、先ほど述べた非特異的情報そのものにダイナミクスを持たせ、単なる歩行の生成とは一段異なるレベルの行動生成を考えているのである。ここでは、二人の間の物理的位置・速度関係と歩調の位相関係という二種類の情報を扱っている。二人が並んで完全に同期して歩くというのは、二種類の制約をともに満たさなければならないという意味では最も難しいタスクである。並んで歩くだけならば、その実現は容易である。「引き込むための情報を余りに手に入れすぎている」という津田氏の指摘があったが、実際にはその逆で、最も単純な仮定でこのタスクが実現できることを示したと考えられる。ただし、二種類の情報処理過程が独立ではなく、ある相関を持っている可能性はある。その場合には、津田氏の指摘のように、歩行速度に応じてフェーズロッキングの起こりやすさが変化することも考えられる。これは、実際の現象にあたってみるしかないだろう。

パーキンソン病の人の歩き方を、我々のモデルの非特異的パラメーターと結び付けて考えることができないだろうかという津田氏のコメントは、大変的を得たものだと思う。パーキンソン病患者の歩行運動で特徴的なのは「すくみ足」という現象である。立っている状態で自発的に歩きだそうとすると、足が地面に張り付いたような状態になってしまい、歩きだすことができない。ところがおもしろいことに、歩く手がかりになるような知覚刺激、例えば、地面に歩く位置を表示すると歩くことができる。つまり、パーキンソン病では、運動の遂行そのものよりは、自発的な運動の開始などに特徴的な障害がでる。一般に、パーキンソン病は脳基底核の疾患によって起こるとされている。ネコの実験では、脊髄のリズム生成回路の活動レベルを調節している中脳の歩行誘発野は、さらに脳基底核からの投射を受けていることがわかっている。したがって、脳基底核を通じて、脳新皮質の知覚情報や脳辺縁系の情動に関わる情報などが統合された結果、歩行運動に関する意志決定がなされることが考えられる。筆者らの歩行モデルをこれと比較すると、速度をコントロールするパラメーターが中脳歩行誘発野に対応している。そこで、そのパラメーター自体を変化させるダイナミクスを考えることは、基底核や脳のダイナミクスを組み込むことに相当すると考えられる。ただ、上位中枢は下位中枢に対して、速度をコントロールするパラメーターのように、いつも非特異的にはたらくとは限らない。これが、脳を単なる階層構造としては理解しきれない難しさである。