

身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現 —移動知の構成論的理解—

東京大学 ○浅間 一

Emergence of Adaptive Motor Function through Interaction between Body, Brain and Environment - Understanding of Mobiligence by Constructive Approach -

*Hajime ASAMA (The University of Tokyo)

Abstract- A new program entitled *Emergence of Adaptive Motor Function through Interaction between Body, Brain, and Environment – Understanding of Mobiligence by Constructive Approach* - started in 2005, as a MEXT Grant-in-Aid for Scientific Research on Priority Areas. In this keynote presentation, the outline of the program is introduced. Its objective is to elucidate the mechanism of adaptive motor function by constructive approach in collaboration with biology and engineering, which must be emerged through dynamic interaction between body, brain and environment, derived by mobility.

Keywords: Mobiligence, adaptive behavior, body, brain, environment, constructive approach

1. はじめに

平成17年度より、文部科学省科学技術研究補助金特定領域研究「身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現—移動知の構成論的理解—」[1]がスタートした[2]。本特定領域は、5年間のプロジェクトである。平成17年度から計画班による研究が開始されたのに続き、平成18年度からは公募班による研究も開始された。本講演では、この特定領域研究の目的、その研究の概要などについて述べるとともに、いくつかの研究の例を紹介する。

2. 移動知研究の目的

我々生物は、無限定の環境においても、環境に応じて適切に行動する知的能力を有している。たとえば、いかなる複雑な環境においても、歩行、遊泳、飛翔などの移動、リーチング、捕獲などの腕・手の動作、他の個体に対するコミュニケーションなど、様々な場面において、多様な行動パターンを創造しながら、スムーズでかつ安定した行動を、状況に応じて適切に行うことができる。我々はそれを、適応的行動と呼んでいる。これは、動物が生存する上で最も基本的、かつ必須な機能であり、我々はそれを生存脳機能と呼んでいる[3]。

しかし、このような適応的行動は、脳疾患によって損なわれることが知られている。パーキンソン病は、典型的な適応的運動機能障害の例であるし、うつ病や自閉症も社会的な適応機能障害であると考えられることができる。近年、高齢化や社会環境の変化によって、このような適応的行動障害を持つ人の割合が急激に増加しており[4]、それに対する取り組みが急務となっている。しかしながら、このような適応行動がどのようなメカニズムで発現するかについてはほとんど明らかになっていない。移動知研究は、まさにこのような生物の適応的行動がどのようなメカニズムで発現するのかを解明することを目的としている。

3. これまでの取り組み

移動知研究は、科学技術研究補助金重点領域研究「自律分散システム」(平成2~4年度,代表:伊藤正美)[5]、「創発的機能形成システムのシステム理論(通称:創発システム)」(平成7~9年度,代表:北村新三)[6]に端を発する。「自律分散システム」では、様々な自律分散システムが有する適応的な機能に関する分析的な研究や自己組織化の原理に関する研究が行われた。それを受け、創発システムでは、適応的な機能を持つシステムの設計原理を求めて、様々な取り組みが行われた。しかし、創発的な設計手法に関しては多くの成果が得られたものの、創発システムの設計論に関しては、重点領域研究期間内に十分な成果を得ることが必ずしもできなかった。

適応的な機能を有する生物が、いかにして適応的に振舞うことができるのか、そのメカニズムがわかれば、それは適応的なシステムの設計原理を知る上で大きなヒントになる。これまで、Bio-mimeticsやBio-inspired Roboticsと呼ばれる研究分野でも、同様な発想で研究が行われてきた。しかし、生物がどのようなメカニズムで適応的な行動を生成しているのかという問題については、いかなる生物の専門家に聞いても、未解明という答えが返ってくるばかりであった。もちろん、適応的行動に関与する脳・身体に関する様々な知見が、これまでの脳生理学、生態学、認知科学、分子生物学、社会生物学などの生物学研究から得られている。しかし、それらの知見はいずれも要素的・個別的・部分的であり、適応的行動が発現するシステムとしてのメカニズムを説明する知見はほとんどないということがわかってきた。脳科学研究においても、我々人間や哺乳類が持つ、思考、記憶、言語、コミュニケーションなど、高次脳機能に関する解析的研究は、統合脳研究[5]などで活発に行われているものの、運動や振る舞いなどのレベルに関する研究は少ない。運動中の脳の活動を計測することが、現在の技術では困難であることも

その要因の一つであろう。

以上から、我々は、適応的な機能を有するシステムの設計論を得るには、まず生物がいかに適応的な行動を生成しているのか、そのメカニズムを解明することが先決であるとの結論に達した。

東北大学電気通信研究所での研究プロジェクト（代表：矢野雅文）や、平成14年度産科科学技術振興財団「移動知の発現システムの構築と制御メカニズムに関するワークショップ」（代表：太田 順）などで議論を重ね、平成15年1月からは、計測自動制御学会システム・情報部門調査研究会「身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現に関する調査研究会」を発足させ、動物が有する適応機能のメカニズム解明に向け、生物学と工学の研究者が一緒に議論を行い、そして特定領域「移動知」の発足に至ったのである。

4. 移動知研究のコンセプトと研究体制

我々は、動物が有する適応的行動能力は、「動く」ことによって得られると考えている。静止している状態では、「脳」と「身体」と「環境」の相互作用は比較的少ないが、一旦動きはじめると、身体を動かすための信号が、脳から身体に活発に出力され、また身体と環境との相互作用が生まれ、身体を通じて大量の感覚情報が脳に入ってくる。

従来のロボティクスは、まず知覚（センシング）、次にそれに基づく行動計画、行動（アクチュエーション）という流ればかりが注目されてきたが、そもそも行動しなければ、知覚情報はほとんど得られない。行動によって知覚、認知し、それが行動を生むという連関で適応的行動の知を捉える必要がある。我々は、このように、動くことで「脳」と「身体」と「環境」の動的な相互作用が生じ、それによって適応的行動能力が発

現するのではないかと考えており、このような考え方を、**移動知(Mobiligence)**と呼んでいる。

これまでの神経生理学などの生物学の研究によって、神経回路や、そこで働く神経修飾物質などに関して、多くことが明らかになってきた。その知見の多くは、動物実験など、解析的手法によって得られたものであるが、生物学における既存のアプローチでは、動物が静止した状態での脳単体の機能しか観測することはできない。すなわち、このアプローチでは、我々が注目している、動いている状態での脳と身体と環境の相互作用に関して観測することはできない。パーキンソン病の例では、これまでの脳生理学の研究によって、黒質緻密部の異常、ドーパミンの低下などの生理学的知見が得られているものの、それがどのようなメカニズムで歩行運動障害を引き起こしているのかについてはいまだ謎となっている。

我々はそのような問題に対し、生物学の研究者と工学の研究者が一体となり、生物学で得られた神経生理学モデルに基づき、工学の動的なシステムのモデリング手法を応用することで生体システムモデルを構成するという、構成論的・システム論的アプローチによって移動知発現のメカニズムを明らかにしていきたいと考えている。具体的には、生理学的解明（生物学）、モデル生成と人工システムによる実験（工学）、モデルの検証（生物学）、原理の解明・応用（工学）という、生物学と工学の融合プロセスによって研究を推進する。ここで、構成論的アプローチとは、対象をモデル化し、それをシミュレータやロボットなど、システムとして人工的に構成して、実験的に動作させその挙動を解析することで、対象を理解したり、仮説を生成、検証するアプローチを言う。

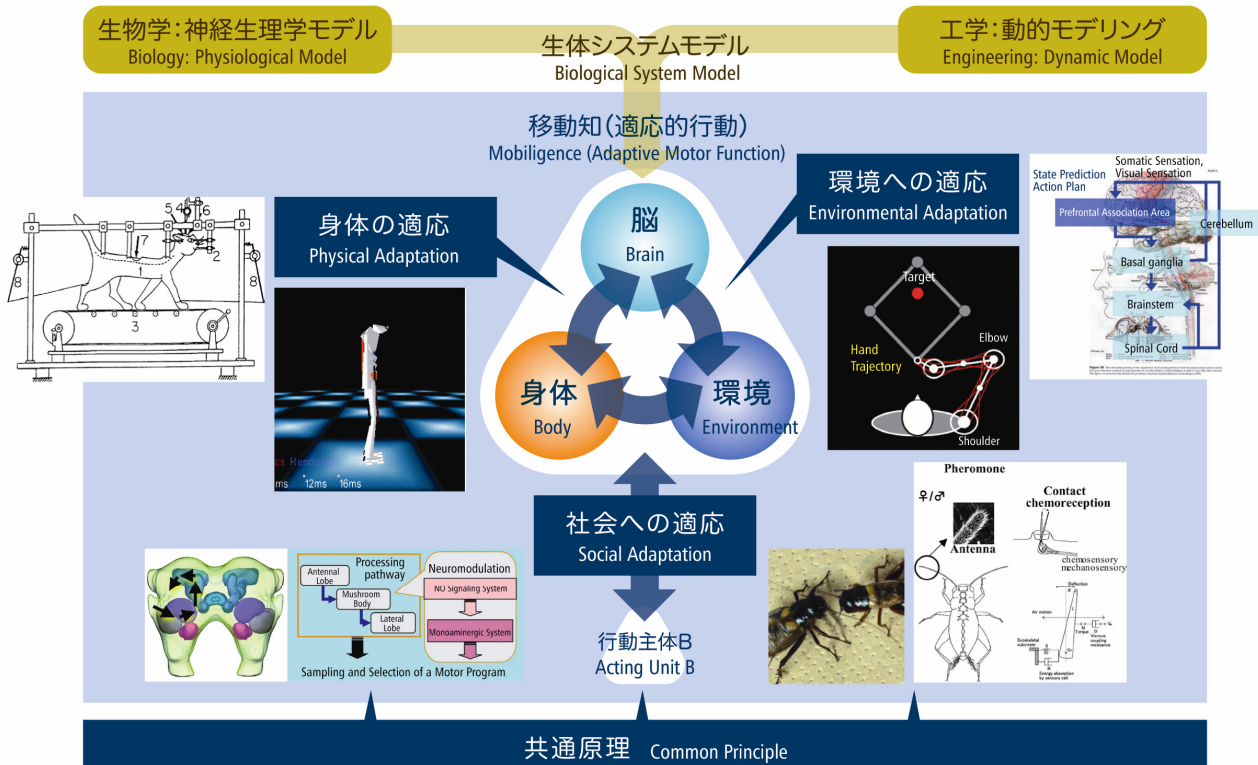


Fig. 1 Framework of Mobiligence Project

移動知研究では、適応的行動能力の中でも、(1) 環境の変化に適応させ、認知するメカニズム (環境への適応)、(2) 環境に対して身体を適応させるメカニズム (身体の適応)、(3) 他者ならびにその集合体としての社会に適応させるメカニズム (社会への適応)、という三つの適応機能に注目し、それぞれ A 班、B 班、C 班という研究グループを組織し、研究を行っている。また、A、B、C 班の各研究課題においては、個々の生物のある特定の適応行動に注目して、そのメカニズムの解明に向けた研究が行われるのに対し、それらに共通する適応メカニズムの原理を導出することを目的とした D 班という研究チームが組織化されている。移動知生成の普遍的な共通原理が解明できれば、適応的なシステムを設計する原理が得られると考えている。Fig. 1 に移動知研究の枠組みを示す。

5. 移動知で行われている研究例

研究は、計画班と公募班に分かれているが、相互に密に連携を取りながら一体とした研究体制を組んでいる。個々のテーマについては、紙面の制約上ここでは紹介できない。計画班での研究例についていくつか紹介する。

A 班の班代表は、伊藤宏司先生 (東工大) が務められており、A 班の計画班では、予測不可能な環境から行動に必要な認知情報 (みなし情報) を生成する脳-環境連関および環境への適応機能の生物学的解明とモデル構成に関する研究を行っている。反射適応、状態適応、文脈適応という 3 つのレベルに適応機能を分類し、腕のリーチング動作を例に取り上げ、その適応メカニズムの解明に向けた研究を行っている。

B 班の班代表は、土屋和雄先生 (京大) が務められており、B 班の計画班では、脳生理学からの脳・神経系のモデルと人類学・工学からの筋・骨格系のモデルを融合したシステムモデルを構築することによって、適応的歩行運動の制御機構の解明を目指すとともに、歩行運動のバイオメカニクスの構築を目標としている。すでに、人間の歩行のモデルおよびシミュレータを構築し、パーキンソン病患者が、ドーパミン低下によって、大脳規定核から脳幹・脊髄への抑制性の投射が増大し、それによって筋緊張が増加し、筋緊張制御系とリズム的な歩行運動制御系とのバランスが崩れ、安定な歩行ができなくなることを示したが (Fig. 2)、現在は、ニホンザルを対象とした精密なモデルを開発して、4 足歩行から 2 足歩行に歩行パターンが変化するメカニズムの解明を目指している。

C 班の班代表は、青沼仁志先生 (北大) が務められている。C 班の計画班では、昆虫の社会的行動を例に取りながら、社会の構築メカニズムの生物学的解明とモデル構成化、社会適応のメカニズムの解明、社会 (ネットワーク) 構築の設計原理の解明を目指している。具体例としては、クロコオロギの雄どうしの闘争行動 (Fig. 3) において、コオロギの脳内の神経就職物質である NO (一酸化窒素) が低下すると、そのアグレッシブ性が高まるなどの生理学的知見から、その脳・神経系のモデルを構築し、社会行

動をシミュレートする研究を行って、すでに行動レベルにおいて、実際のコオロギと近い社会行動を行うモデルが構築されている。

最後に、D 班の班代表は、大須賀公一先生 (神戸大) が務められている。これまで、生物の持つ様々な適応メカニズムとして、バランスの力学とも呼ぶべき原理があるのではないかと考えられている。計画班では、受動歩行における安定性や、粘菌などが持つ適応的な行動メカニズムを対象として、移動知の共通原理に迫ろうとしている。共通原理を説明する数理的なモデル構築を目指す一方で、適応的な機能を持つシステムの設計原理を導出しようとするチャレンジングな研究が行われている。

そのほかにも、多数の興味深い公募班の研究があり、より多様な生物の多様な適応メカニズムについて白熱した議論が行われている。これらの研究成果の詳細については、2007 年 7 月に行う第二回移動知国際シンポジウム[7]で発表される予定である。移動知研究に興味を持たれた方は、是非ご参加いただきたい。

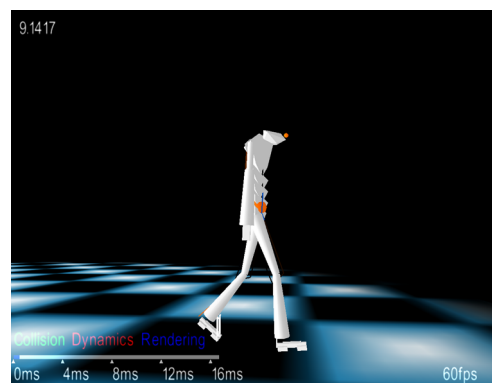


Fig. 2 Simulation based on biped locomotion model (Prof. Masafumi Yano in Tohoku Univ.)



Fig. 3 Battle behavior by two male crickets (Prof. Hitoshi Aonuma in Hokkaido Univ.)

6. おわりに

平成 17 年度より開始した、文部科学省科学技術研究補助金特定領域研究「身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現—移動知の構成論的理解—」(略称：移動知)の概要について述べた。

移動知研究は、生物学分野の研究として、生物の持つ様々な適応的行動のメカニズムを解明することのみならず、医療分野における運動障害の新治療法の発見、リハビリ支援システムの開発などにおいて、また工学分野における知的人工システムの設計原理の導出において、大きな貢献を果たすと考えている。さらには「移動知」という新しい研究分野を開拓し、生工融合型の研究組織を立ち上げ、生物学研究を行える工学研究者、工学研究を行える生物学研究者の育成を図りたいと考えている(Fig. 4)。

平成 19 年秋には、平成 20 年度から開始する特定領域「移動知」の公募を行う予定である。移動知の研究を希望される方は、是非応募していただければ幸いである。

謝辞

本講演で紹介する移動知の概念や研究は、これまでに、土屋和雄先生、伊藤宏司先生、矢野雅文先生、高草木薫先生、神埼亮平先生、太田 順先生、石黒章夫先生、青沼仁志先生、大須賀公一先生などを初め、本特定領域研究の計画班の多くのメンバーと議論してきた内容をまとめたものである。紙面の制約

上、すべての研究者のお名前を列記することはできないが、すべての移動知研究計画班メンバーに、この場を借りて御礼申し上げる。また、移動知研究の評価にあたっては、Prof. Sten Grillner (Korolinska Inst.), Prof. Avis H. Cohen (Univ. Maryland), Prof. Rolf Pfeifer (Univ. of Zurich), 森 茂美先生(生理学研), 鈴木良次先生(金沢工大), 北村新三先生(神戸大)にも大変お世話になっている。御礼を申し上げる。

参考文献

- [1] <http://www.arai.pe.u-tokyo.ac.jp/mobiligence/>
- [2] 計測と制御「特集：移動知：能動的な移動機能がもたらす創発的知能」, 計測自動制御学会, vol. 44, no. 9, (2005).
- [3] 高草木 薫, 浅間 一：移動知：行動からの知能理解—構成論的観点と生物学的観点から, 計測と制御, vol. 44, no. 9, pp. 580-589, (2005).
- [4] 厚生労働省 HP.
- [5] 伊藤正美：自律分散システム, 文部省科学研究費補助金平成 2~4 年度「自律分散システム」研究成果報告書, (1994).
- [6] 北村新三：文部省科学研究費補助金研究の成果の概要と評価「創発的機能形成のシステム理論」, (1998).
- [7] <http://www.arai.pe.u-tokyo.ac.jp/mobiligence/announcement/doc/intsymp.pdf>



Fig. 4 Impact of Mobiligence Project