

三宅美博 (金沢工大・情報工学)

## "Ba" Oriented Intelligence

---Function Distribution and Mutual Compensation in Open Multi Robot System---

Yoshihiro MIYAKE (Kanazawa Inst. Tech., Dept. Information Engineering)

Abstract: "Ba" oriented intelligence in open system is proposed. It is based on inseparable relationship between system and its environment. In such world, since functional relationship between them becomes indefinite, the system should relevantly self-organize its constraints depending on the relationship between both parts. Under this self-referential framework, the system becomes able to have flexibility to unpredictable environment and robustness within the system at the same time. To realize such intelligence as an artificial system, the author tried to construct multi robot communication system by using mutual entrainment between rhythms. As a result, it was clarified that such robotic system can realize coordinative function distribution and mutual compensation under unpredictable environment.

キーワード: 「場」指向インテリジェンス、無限定性、自己言及性、拘束条件、機能分散、相互補償、マルチロボット、神輿モデル

## 1. はじめに

現代ほど人類にとっての「知」の在り方が真剣に問われている時代はないだろう。これまでの「知」は自他の関係性を分離することに基盤をおいていた。そこでは切り離された人や物が客観的な対象としてながめられ、そこから科学や技術が生まれた。しかし、それらは結果的には環境破壊や人間関係の破壊という生命システムに対する危機的状況を招いてしまった。したがって、いま新しい「知」の在り方を問うとすれば、それは自他非分離な自己把握に基づくものでなければならず、それは必然的に生命的な「場」の在り方を問うことにつながるだろう。このような問題意識は、清水をはじめとする我々の研究グループの中で長らく育まれてきた視点である。

そこで本論文では、このような「知」の在り方を「場」指向インテリジェンスと呼ぶことにする。以下、この問題に対する著者の立場からの研究の現状を報告させていただく。前半では生命システムをその内部から捉えることによって開かれた「知」の在り方を考察し、自己言及性に基礎をおく「場」指向インテリジェンスの論理形式が明らかにされる。後半では知的人工システムとしての実現をめざし、マルチロボットシステムにおける神輿モデル構築へと到る具体的な取り組みが紹介される。

## 2. 「場」指向インテリジェンス

## 2-1. 生命システムにおける開かれた知の在り方

生命システムにおける知の在り方を理解するうえで最も基本となる問いは何であろうか。おそらくそれは「生命システムがそれよりも遥かに複雑な環境のなかで自律的に生きていくことができるのはなぜか？」を問うことであろう。有限の複雑性しか持たない生命システム内部から見れば、環境は本質的に無限定なものとして現出し、それを完全に認識することも完全に制御することもできないからである。この問いのもつ意味は限りなく深い。そのため、この問題はこれまで宗教や哲学でひろく取り上げられてきており、最近では人工知能の分野でもフレーム問題として注目されている。そしてこの問いに対する本論文の立場は、生命システムは自他非分離な開かれたシステムとして見做されなければならないということである。ただ、開かれているとは単に情報の入出力があるという意味ではない。むしろ、生命システム内部だけでは論理が完結しないということであり、環境とシステムの関係の全体に基づいて自己言及的にシステム自身の在り方を規定しなければならぬということである。

従来の人工的インテリジェンスシステムでは、設計者が外部から観ることによってシステムと環境を分離し予め環境を規定することによって、システムを一義的に設計する自己完結型のシステ

ム構築法が用いられてきた。しかし、極めて自明なことであるが、このような人工システムでは予め規定されていない環境に対応することはできない。このように実現される知の在り方を自他分離型の閉じた知と呼ぶことにしよう。一方、生命システムにおける開かれた知の特徴は、上に説明したように自己不完結なシステムとして構成されることであり、生命システムがシステム自身をその一部として包摂する自他非分離的な関係の全体として環境を捉え、それに基づいて拘束条件を自己創出し、システムの自己表現を自己言及的に規定するという点にある。このことが予め予測できない複雑な環境とシステムのあいだでの柔軟な機能表現の生成を可能にする。そこで、以下、このような自他非分離型の開かれた知を可能にする論理形式を明らかにしよう。

## 2-2. 生命システムからみた環境の無限定性

生命システムは複雑なシステムではあるが、それを取り巻く環境の複雑さから比べれば明らかに有限のものでしかない。このことは、生命システムが環境の認識や操作に利用可能な情報は、環境の全てではなくその一部分にすぎないということの意味している。したがって、生命システム内部から観れば環境は本質的に規定できない無限定性を伴ったものとして現出する。そして従来からの自他分離の立場では、そのような無限定な環境のうちいくらかでも法則性の認められ予測可能な領域が「必然」と呼ばれ、それ以外が「偶然」と呼ばれ区別されてきた。力学的運動方程式をみれば、因果的に記述される項とランダムフォースの項の足し算から構成されていることはすぐわかる。そして予測できない偶然に対処するために確率という概念が生み出されてきた。

ただし本論文では無限定性を、このような確率論的な意味でのみかけ上の無限定性と原理的な無限定性に明確に区分して考える。なぜなら確率論が適用できるにはいくつかの前提条件が必要となるからである。まず、事象と呼ばれる一定時間のあいだ安定とみなせる分節化された状態の集合を、前もって規定できる必要がある。さらに充分多くの試行がなされ、それぞれの試行は等しい重みづけを持つ必要もある。これに対して生命システムが遭遇する重要な状況は、ほとんどの場合に原理的な意味での無限定性に属するものである。たとえば、たった一回の判断が生死をわけることがある。つまり、非平衡開放系としての生命システムとその環境を考えると、分岐点近傍においてはゆらぎが決定的な役割を果たすのである。また、環境の状態が高次元カオス的に変動するときには事象としての分節化すら不可能となる。これらのことは、事象を、それを観ている生命システム側の内部状態と無関係に規定することはできないということを明確に意味している。このように確率という方法論を適用できる領域は、システムと環境を分離して規定可能な閉じた知の枠組みに対応していると言えるだろう。

このような無限定性の問題は、人工知能の領域でも「フレーム問題」の背景としての情報の部分性の問題として取り上げられている。そこではヒューリスティクスとよばれる情報の欠如を補うための発見的ルールが導入されることになる。このことは形の上では情報の開放系としてシステムを構築することに対応しており、分岐現象に類似した論理の非単調性が観察される。しかし、そのようなヒューリスティクスはあくまでも外部の設計者によって明示的に規定されたものであり、本質的には自他分離的な知の在り方自体は何も変わらないのである。したがって、このような枠組みの上で、たとえば確率論やファジー理論に基づく確信度を用いた判断を含むルールをヒューリスティクスの一種として導入し、その上で確率表現等を用いて情報を扱ったとしても、上記と同じ意味において原理的な無限定性に対処することはできない。いま直面している無限定性の問題はそのようなタイプの問題ではない。むしろシステム内部から無限定性にどう対処するかということであり、「シンボル接地問題」のなかにこめられた、シンボル生成をささえる分節化以前のダイナミクスを問題にしているとも言えるだろう。

では、このような環境の原理的無限定性に生命システムはどのように対応すればよいのだろうか。結論からいうと、生命システム自身も原理的に無限定システムとして構築される必要があるということである。極めて当然のことであるが、システムを自他分離システムとして実体的かつ明示的に規定してしまうから、予め規定していない環境以外に対応できなくなる。つまりシステムの自己表現を積極的に規定しないことが重要になってくるのである。ここではシステムは完全には規定できない多義的かつ自己不完結なものとして構築され、環境とのあいだの関係の全体からシステムの拘束条件が自己創出されることになる。このことが状況に応じた多様な機能表現の生成を可能にし、予め予測できない無限定環境にシステムが柔軟に対応できる可能性を与えてくれる。

このとき無限定システムはどのように構築されるのであろうか。システムとして無限定な性質をもつためには、システムを構成するサブシステムも無限定な性質をもつ必要があると考えられる。それぞれのサブシステムが多様な自己表現の可能性をもち、その中のどれが表現されるかが、それらの相互関係から規定されるという自己不完結な論理的に開かれた構造が必要とされるだろう。ただ、このような無限定システムは階層間においても開かれているため、原理的には際限なく無限定なサブシステムを必要とするように思われる。しかし、たとえば細胞のようにまわりとの関係によって分化の仕方が変わる無限定サブシステムを説明の基礎におけば、それより下の階層をとりあえずは考える必要のないこともわかる。そしてサブシステムの多義性とそれらの関係の多義性に基づいてシステムとしての無限定性が生成し、環境とのあいだで多様な機能表現が可能になる。

このように構築された自己不完結性にもとづく無限定システムは、自己表現の多様性を内包したものであり、無限定な環境と無限定なシステムの間での取り得る関係および無限定なサブシステムの間での関係を予め一義的に決定することはできない。つまり不良設定問題になるのである。したがって状況に応じた何らかの限定を加えるための情報が必要になり、それを拘束条件あるいは境界と呼ぶ。そして、システムと環境およびサブシステム同士が自他非分離な関係にあることから、システムおよびサブシステムを規定する拘束条件はそれらの関係の全体に基づいて、システム自身によって自己創出されるのである。しかし、この不良設定性としての無限定性にこそ生命システムにとっての自由の根源があり、拘束条件を生成し自己言及的に自己規定することにこそ生命システムの主体性がある。

### 2-3. 「場」的拘束条件の創出と自己言及

環境の無限定性は視点をシステム内部においたときのみ問題となる。ここでは客観的に存在している環境のことを問題にしているのではなく、システムの内部に投影された環境の無限定性を問題にしているのである。したがって原理的に限定することのできない環境とそのように観ている生命システムとの関係を規定するのは、この環境を観ている生命システムの側の能動的はたらきになる。それは、環境からシステムに取り込まれる情報において、システムの内部に意味の境界としての拘束条件を設定して、境界が定まっていなかったことによる不完結な情報をシステム内部で自己言

及的に完結させるはたらきによっておきていると考えられる。このとき環境に対して、システムの側から主体的に意味があたえられ、環境とのあいだでの適切な機能表現が可能になる。

いかにいえば拘束条件を創出し自己言及することの役割は、システムと環境の関係における無限定で連続な可能性の空間を分節化することにあると考えられる。このことは生命システムにとっての意味的な非対称性、つまり「図」と「地」の生成に対応している。このとき図と地はどちらか一方だけでは成立しえない自他非分離の関係にあることに注意しなければならない。図は拘束条件に対して環境とシステムの間でコンシステントな関係を生成し機能表現できた領域であり、システムにとっての明示的意味を持っている。一方、地は両者のあいだで関係を生成できず情報圧縮された部分であり、システムにとっての機能を持たないという積極的な意味をもっている。

では、どのように拘束条件を創出し自己言及すればよいのであろうか。まず明らかなことは、無限定性の起源が生命システム内部から環境を観察することに起因するのであるから、必然的にこの問題は生命システム側の主体性に深く関わることである。そして、このとき互いに矛盾する2つの視点が必要となる。まず第一には、予測できない環境変化のもとで生命システムが一定の基準をもって判断したり、論理性のある行動をするためには、個体史的な自己同一性が保たれるように拘束条件が創出されなければならないということである。もう一方では、環境変化に対して柔軟に生命システムが対応できるように、拘束条件の創出が環境に対して開かれた形で行なわれる必要もある。前者は生命システムとしての「個」の同一性を要求しており、後者は生命システムと環境を含めた「全体」に対する開放性を要求している。これらは明らかに矛盾する要求である。したがって重要なことはこの矛盾を解決できる自己言及の在り方を問うことである。

どのような条件を満たすとき、自己言及は上記の2つの性質を併せもつのであろうか。少なくとも、自己言及は1階層論の範囲内でパラドックスを生み出してしまおう。たとえば「クレタ人は嘘つきだとクレタ人が言った」という例は極めて有名である。このことは少なくとも2階層以上の階層的論理のなかで自己言及される必要性を示している。このことが拘束条件を自己創出しなければならないということと密接に関係している。しかし、どのような拘束条件を生成するかで大きく2通りに分けることができる。一つは、フィードバック的自己言及である。つまり、すでに確定した過去を反省的に認識し拘束条件を生成することによって現在を規定する方法である。しかし、このような方法の中からは過去を越える現在は生成できない。つまり、システムが自己同一的になることはできるが、無限定な環境に対して開放的にはなり得ないという本質的な問題をともなう。このことは、もう一つの方法であるフィードフォワード的自己言及の重要性を強く支持することになる。つまり、未来に対する実践的認識をととして仮説的な拘束条件を生成し現在を規定する方法である。

ここでは、仮説の一種としての「場」的拘束条件の生成に基づく自己言及の在り方に注目する。「場」とは、システムが環境と実践的に関わることによって、環境を観ているシステム自身をその一部として包摂するシステムと環境の関係の「全体」に関する認識を「個」としてのシステム内部に生成し、それを拘束条件としてシステム内部に表現したものと捉える。このとき、全体とはシステムと環境のあいだでの意味的關係のダイナミクスであって、部分の総和としての全部とは根本的に異なることに注意しなければならない。つまり反省的に捉えるとは、すでに確定した情報の全部に基づいて拘束条件を生成することであり、実践的に捉えるとは、システムの主体性に基づいて意味を持つ情報の全体に基づいて拘束条件を生成するということである。したがって、フィードフォワード的自己言及においては、生命システムと環境の関係の全体が、個としての生命システム内部に全体の表現としての「場」を生成し、それが仮説的な拘束条件として個の自己表現を限定し、最終的に全体としての機能表現が意味的に確定される。このような「場」的拘束条件の自己創出を経て自己言及的に関わり合うことによって、「全体」と「個」という異なる意味的階層の間での整合性がとられ、環境への開放性と自己の同一性という互いに矛盾した問題を両立させることのできる、開かれた知的システムを構築することができると考えられる。

2-4. いま問うべき重要な問題

以上のような視点をふまえ、ここでは知的人工システムという範囲に限定してその知の在り方に関する問題を明らかにする。まず、従来から人工知能システムに広く用いられてきたシンボル指向インテリジェンスをとりあげ、その設計原理が抱えている問題点を考察する。そして、その自他分離的な性質にもとづく困難を克服することを目的として生まれた行動指向インテリジェンスの現状に関して説明する。さらに、その行動指向的アプローチにおける問題を分析し、それをふまえて「場」指向インテリジェンスの必要性とその特徴を浮き彫りにしたい。そして、いま何を問う必要があるのかを明らかにする。

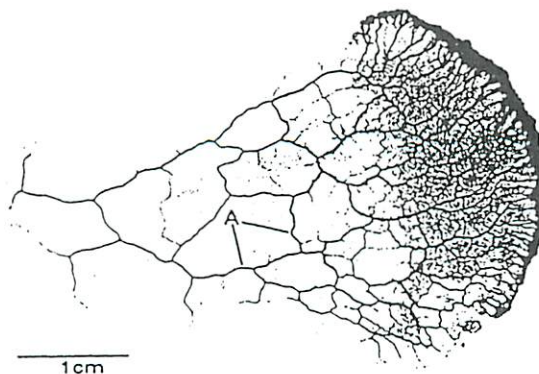
従来型の知的人工システムでは、予め環境を想定した上でシステムの機能を明示的に規定する自他分離的システム設計が主として用いられてきた。このような知の在り方では、概念がシンボルとして表象され情報処理はこのシンボルに対するオペレーションとして捉えられるので、シンボル指向インテリジェンスと呼ばれる。しかしこの方法はシステムの動作環境が複雑化し予測不能になるにつれて、システム内部に表象する情報の境界をどのように規定するかという「フレーム問題」や、内的表象と環境をどのように関係づけるかという「シンボル接地問題」を生じさせ、その限界が明白になってきた。

その意味で、実世界に出た人工知能システム、例えば自動翻訳プログラムの大半が例外処理であることはこのような設計原理からの当然の帰結と言える。そして、人間（設計者）のプログラミング能力を考慮するとき、このままの設計原理の上で規模や機能を拡大し続けることは現実的に不可能になりつつある。また同じ理由から、人間（ユーザ）の主観性は、設計者にとって予測できない環境変動を生み出す原因と見なされ排除される傾向が強くなっている。その結果、人間（ユーザ）と無関係にシステムの機能が定義され肥大化しブラックボックス化することによって、人間にとって使いにくい人工システムが氾濫するようになってしまった。

このような、システムと環境を分離した上でシステム内部だけを考えるシンボル指向的アプローチへの反省から、システムと環境の相互作用を重視する新しいタイプの知の在り方として行動指向インテリジェンスが注目されている。このアプローチではブルークスの昆虫型ロボットの研究が有名であり、複雑な環境における自律的行動を部分的に実現できている。その特徴は、ロボットの行動を基本的運動の並列化したサブシステムに分割し、それぞれに情報の入出力機能を与えることによって、システムと環境の間での情報の流れを多様化することにある。さらにそれらのサブシステムは、環境およびサブシステム間でのインタラクションからシステムとしての機能を生成させることによって、疑似的にシステムの内部と外部を分離しないという形態も持っている。最近、橋田はこのようなアプローチの普遍化をめざして、情報のながれと直交する「制約」という設計法を提案し制約プログラミングとしての実現を試みている。

しかし本論文の立場からすれば、行動指向インテリジェンスは自他分離的システムの問題を、入出力機能を備えたサブシステムを並列的に配置することによって疑似的に解決したにすぎないと考える。なぜなら、そのようなサブシステム間あるいはシステムと環境間での関係の多義性をどのように収束させるかという議論がみられないのである。例えばサブサンクション・アーキテクチャでは、そのようなサブシステムは一義的に設計されており、またサブシステム間の機能分散も予め規定され、さらにサブシステム間での競合に際しても予め階層化された支配・被支配関係から一義的に規定されている。つまり、システムにおける無限定性と拘束条件の自己創出の問題が全く扱われていないのである。これでは、行動指向的アプローチも自他分離的设计方法の一つしか考えられない。このような方法論の範疇では、環境への開放性と自己の同一性を両立する開かれた知の在り方は実現できない。たとえばサブシステム間での状況に応じた機能分散やその相互補償のような問題を扱うことは不可能である。

一方、人工生命と呼ばれる領域における研究から、拘束条件の自己創出を意識した研究が芽生えつつある。例えば、北野は行動ネットワークとその入力情報の重要度を評価し学習の仕方を調節する評価ネットワークを並置させる構造を提案している。また谷は同様の構造を迷路ロボットのナビゲーション制御に応用している。これらに共通することは、同一の入力が2つの意味的に異なる



Plasmodium of *P. coniferum*. The plasmodium is organized into a fanlike front with a network of strands or veins in the rear. From Stiemerling (1970).

Fig.1

る経路に分離され、評価系レベルの情報が拘束条件としてもう一方のレベルに働きかけるという点である。しかし、そこにおいて実現される評価系は、やはりGAやニューラルネットを応用したものであり、拘束条件の生成という意味では環境からの入力に対して予め一義的に規定されている。つまり、拘束条件の生成の仕方が自他分離的であり、「場」的な拘束条件生成の問題が扱われていないのである。したがって、このような方法論の範疇でも、開かれた知を実現することはできない。

以上の研究の現状をふまえると、いまの知的人工システムにおいて最も問題になっていることは、環境の無限定性にかいに対処するかということである。そして「場」指向インテリジェンスの立場からは、システム自体も無限定に構築されなければならないこと、システムと環境の関係を限定する拘束条件を自己創出しなければならないこと、「場」的な拘束条件を生成しフィードフォワード的に自己言及しなければならないことが重要である。したがって、これらを実現する具体的方法を問うことが「場」指向インテリジェンスの本質を最もよく表現することにつながる。そしてこの問題は、環境への開放性と自己の同一性を両立させる問題、たとえば状況に応じた機能分散やその相互補償のような具体的問題において明確化されるものと思われる。

3. 人工システムとしての実現へ向けて

3-1. 粘菌に学ぶ「場」的インテリジェンス

そこで著者は、まず生理実験をとおして実際の生命システムから「場」的インテリジェンスの基本的構造を学び、それに基づいて知的人工システムとしてマルチロボットシステムを構築するというアプローチを試みた。具体的には、上に説明したように、状況に応じた機能分散とその相互補償の実現に取り組むことによって「場」指向インテリジェンスの特徴を明確化することをめざした。

まず、「場」指向インテリジェンスを実現する物理的メカニズムを明らかにする必要がある。そこで、Fig.1に示す真正粘菌(Physarum)というアメーバ状生物の走化性をモデル系として、環境適応的な形態形成における細胞内コミュニケーション機構の解明に取り組んだ。その結果、この生物は、多義的な自己表現の可能性をもつ無限定型サブシステムから構成される分散システムと見做せることがわかってきた。そして、その無限定性を細胞内化学リズム、たとえばカルシウム濃度振動の相互引き込みを通して限定していることもわかった。そのとき個々のサブシステムの表現、たとえば頭になるか尾になるかというような分化は、外部環境および他のサブシステムとの自他非分離な関係に基づいて創発的に規定される。そして、それらサブシステムの自己表現が相互に多様化し協調的に機能分散することで、個体としての機能表現である環境適応の形態が生成されることが示された。しかも、そのシステムをとりまく環境の変化やシステム自身の切断や増殖など予め規定できない変化に対しても、サブシステム間で状況に応じて機能分散されたり相互補償される現象が観察された。

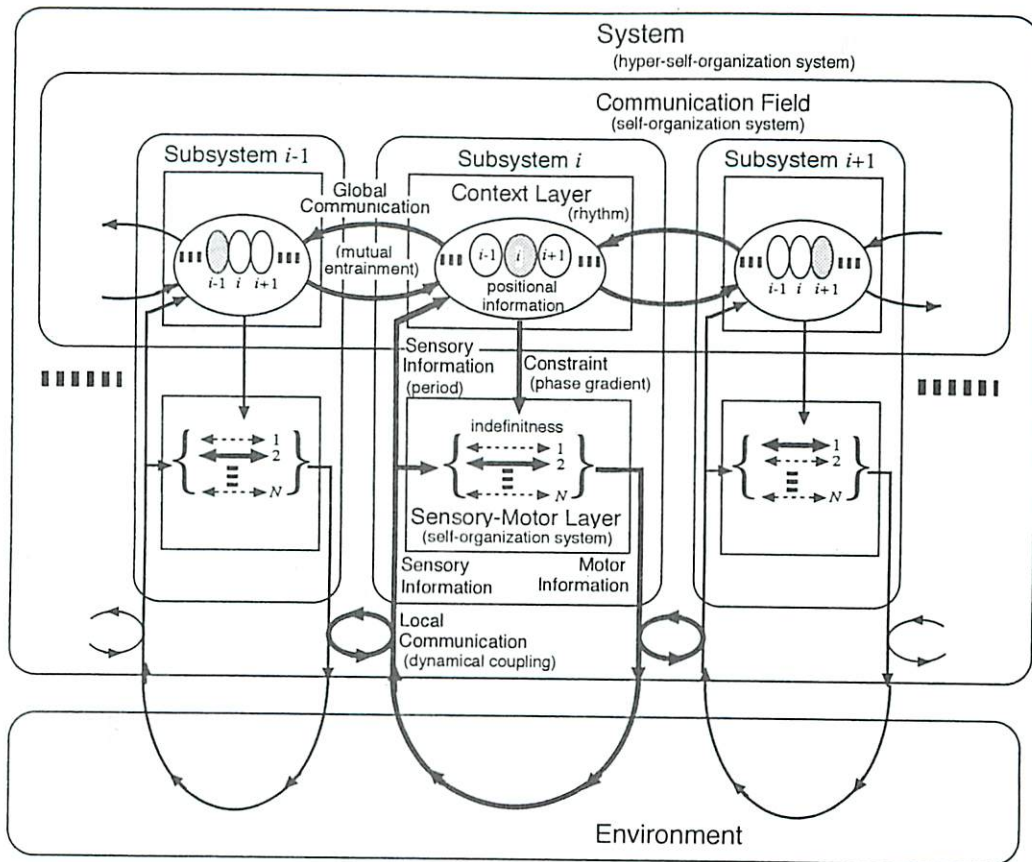


Fig.2

要点をまとめると、システムの情報の構造はFig.2のようになるだろう。そこでは、システムは多数のサブシステムから構成されており、個々のサブシステムは感覚-運動レイヤーと、そのプロセスに拘束をかけるコンテクストレイヤーという2階層から成り立っている。感覚-運動レイヤーは、環境とのあいだでの情報循環をとおして多義的な自己表現を生成しうる無限定性を有している。一方、コンテクストレイヤーは、感覚-運動レイヤーにおける情報循環の無限定性を限定するための拘束条件を創出する。このとき重要なことは、コンテクストレイヤーも感覚情報を入力されること、さらに他のサブシステムのコンテクストレイヤーとインタラクションすることで自他非分離的コミュニケーションフィールドを形成すること、そしてその結果として生成された「場」的な拘束条件を自己言及的に感覚-運動レイヤーへもどすということである。このような基本構造のもとで以下のような具体的メカニズムが明らかにされた。

各サブシステムの感覚-運動レイヤーは一種の自己組織系であり、ローカルな感覚入力とそのレスポンスを関係づけることで、環境とのあいだに多義的な情報循環を生成することができる。さらに隣接サブシステムの感覚-運動レイヤーにおける情報循環とのあいだでのローカルな相互作用をとおしてローカルな機能表現を生成する。しかし、それだけでは情報の部分性から、個々のサブシステムの発現すべき自己表現が一義的に規定できず無限定になってしまう。そこでそのような無限定性を限定するために、結合振動子系として構成されるコミュニケーションフィールドが重要になる。そこでは、リズムの性質をもつコンテクストレイヤーに感覚情報が固有周期変調として入力され、他のサブシステムのコンテクストレイヤーとの相互引き込みをとおして、空間的にグローバルな位相勾配系が自己組織される。そして、ローカルに定

義される位相勾配、つまり位相の空間微分として、各サブシステムのシステム内における相対的位置関係および環境との関係が表現される。このようなシステムと環境およびサブシステム間の関係の全体を表現する拘束条件に基づいて個々のサブシステムの感覚-運動レイヤーにおける無限定性が自己言及的に限定されシステムの機能表現が確定される。

### 3-2. マルチロボットシステムにおけるグループ編成モデル

そこで上記のメカニズムをふまえて、「場」指向インテリジェンスとしてマルチロボットシステムを構築する。ここでは最初に、最も簡単な「場」的システムとして、ロボット間でのみ開かれているマルチロボットシステムを考える。具体的には、歩行ロボットが隊列を組んで行進しているとき、その中での相対位置に応じたグループフォーメーションを形成させるという形での機能表現を実現する。

まず、個々のサブシステムにおける感覚-運動レイヤーとして用いたのは、我々の研究グループからすでに提案された2足歩行ロボットモデルである。それは神経系と筋骨格系の間での循環的相互作用を通して環境との間に安定な歩行パターンを生成する自己組織システムの一例であり、拘束条件としての高次中枢からの定常入力に依存して多義的な歩行パターンを生成することができる。そしてこれを基に1次元マルチロボット系を構成する。このとき全てのロボットは表現に関して同じ内部ルールを有すると仮定し、さらに外部環境は一定と考える。なお本論文では2足歩行ロボットをサブシステムとして用いているが、多義的な自己表現を可能にする自己組織的システムであれば他のシステムでも広く利用可能である。

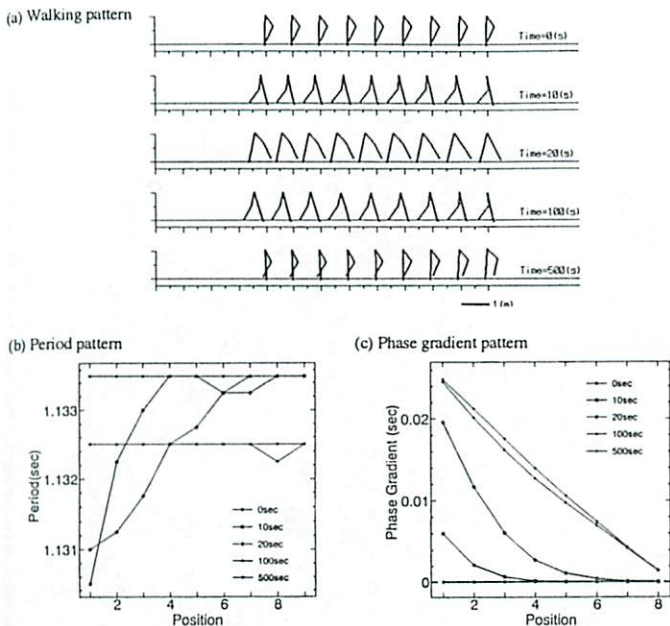


Fig.3

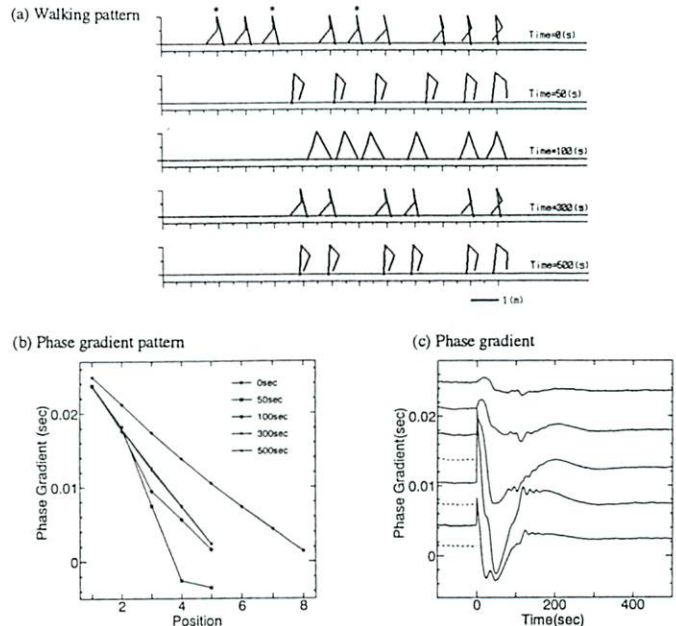


Fig.4

一方、コミュニケーションフィールドを構成するコンテキストレイヤーとして用いたのは、個々のロボットの歩行リズムとそれらの間での相互引き込みである。人と並んで歩くときに無意識のうちに歩行リズムが同調した経験を持つ人は多いと思われるが、それに対応した現象である。このとき、Fig.3に示すように、コミュニケーションフィールドに自己組織される位相勾配は1次元隊列の先頭から末尾に対して直線的に減少する空間勾配系を生成した。この空間パターンは、個々のロボットのシステム全体の中における位置関係を示す役割を担っており、位置的な機能分散を規定する拘束条件を表現していると見做すことができる。そこで、この拘束条件に基づいて、個々のロボットの歩行パターンに歩幅の違いとして自己表現の多様性を生成させ、位置に応じてロボット間距離を調節しグループ編成としての機能表現を生じさせる。

このマルチロボットシステムが本当に「場」指向インテリジェンスを実現しているならば、状況に応じた機能分散と相互補償を実現できるはずである。ここでは環境が一定であるため、システムの境界条件を人為的に変化させてみて、それに対して機能分散がどのように相互補償されるかを調べてみた。具体的にはFig.4に示すように、3グループを形成するという目的を設定された9体のマルチロボットにおいて、3体のロボットを急に除去してみたところ、相互補償され6体で3グループが再構築された。これは、拘束条件を表現する位相勾配パターンがシステムサイズの変化に対応して新たに生成されたからである。このような現象は除去あるいは追加するロボットの位置や数などにはいっさい依存せず観察された。もし、このような制御を全て明示的ルールで記述したとすれば、それは組み合わせ爆発をもたらすであろう。

ただし、このグループ編成モデルは、システム外部の環境を一定としているため機能表現を定義できないことに問題がある。そのため、個々のロボットの機能分散における自己表現の多様性を評価することもできない。そこで、マルチロボットシステムと環境の相互作用から機能表現を規定できるモデルを新たに構築する必要がある。

### 3-3. マルチロボットシステムにおける荷物運搬モデル (神輿モデル)

そこでマルチロボットシステムが荷物を運搬する問題を設定し、ロボット間だけでなく、外部環境としての荷物に対しても開かれているモデルを構築する。このような問題設定のもとで初めて機能の問題を扱うことができる。そして荷物を運ぶというマルチロ

ボット全体としての機能表現のもとで、個々のロボットの自己表現の多様性の評価が可能になる。この問題の本質は環境が表現的であるということ、つまり統計力学でいうリザーバ的環境ではなく、時間的・空間的に多様なダイナミクスを有し、しかもそれがシステムと他非分離の関係にあるということである。

具体的に個々のサブシステムにおける感覚-運動レイヤーとして用いたのは、上記モデルと同じである。一方、コミュニケーションフィールドを構成するコンテキストレイヤーとして用いたのは、非線形リズムとそれらの間での相互引き込みである。これは実際には、荷物を協力して運ぶ際かけ声を掛け合うという現象に対応しており、グループ編成モデルでの歩行リズムとは異なるリズムであることに注意しなければならない。このとき、コミュニケーションフィールドに自己組織される位相勾配は、ロボットシステムと荷物からなる運動の重心に対する各ロボットの位置関係を示し、これが拘束条件を表現することになる。そこでは、この拘束条件にもとづいて個々のロボットの歩行パターンに固有周期の違いとしての自己表現の多様性を生成させ、機能分散させる。

本モデルの運動の様子をFig.5に示す。\*印より前の時間帯ではコンテキストレイヤーからの拘束条件に従って、個々のロボットに対して歩行リズムの固有周期の違いとしての多様性が生成している。ただし、感覚-運動レイヤーでのローカルな相互作用を通してみかけの周期は同調し、その結果生じた位相ずれによって荷物が前後に揺れながら担がれていることがわかる。このような担ぎ方としての機能表現が実は重要なのである。\*印以降は拘束条件を取り除き、ロボットの歩行パターンを均質化してみた。そうすると先のような前後にゆれる担ぎができなくなり、その結果として倒れてしまうのである。このことは、個々のロボットが積極的に自己表現を多様化することによって協調的機能分散を進め、その結果として、システム全体としての統合された機能表現を生成できることを示している。

このシステムが「場」指向インテリジェンスを実現していることの確認は現在進行中でありデータをお見せできないが、具体的なケースとしては以下の2つを設定している。一つは、個々のロボットの相互関係で、機能分散したマルチロボットが、同様の他のシステムと連結されるような場合である。もう一つはロボットと荷物の関係で、荷物の形状が変化するような場合である。このような境界条件の変化や外部環境の変化に対して、どのように拘束条件が自己創出され機能分散が相互補償されるかを調べている。

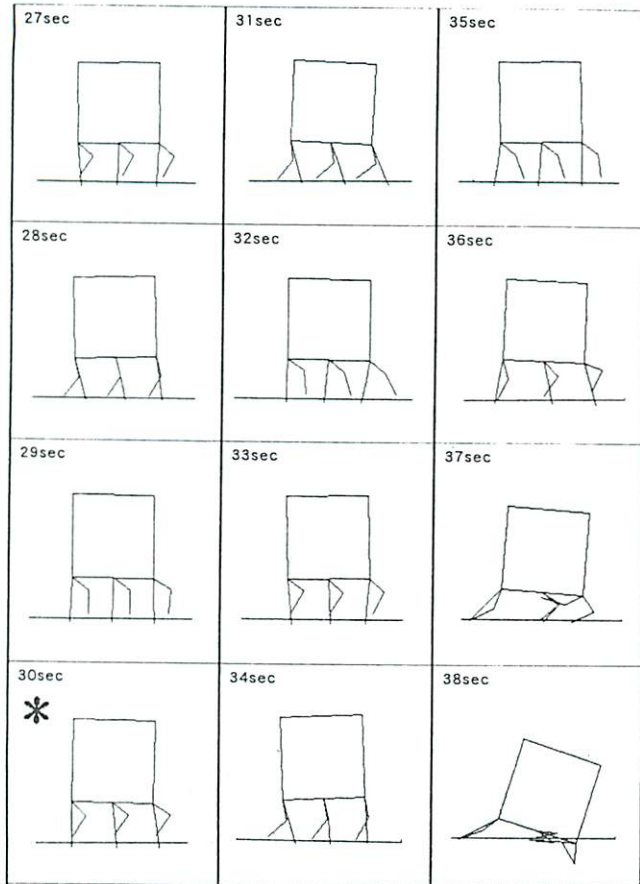


Fig.5

ここで構築した荷物運搬モデルのメタファーとして、Fig.6のような神輿を担ぐという問題が注目される。その理由は神輿も開かれたシステムになっているということである。たとえば担ぎ手にとって神輿はそれ自身のダイナミクスを持つため担ぎ手側だけで担ぐという機能を定義できないし、担ぎ手がそれぞれの位置に応じた多様な担ぎ方をしなければ全体としてうまく担げない。さらに、開かれていることに伴う予測できない状況にも柔軟に対応できることもその特徴である。たとえば祭りにおいては神輿の上に人が乗ってそのダイナミクスを変えてしまう場合や、担ぎ手が増えたり減ったりする状況などが考えられるが、それらに対しても対応可能である。そこで、上記のような荷物運搬モデルを「神輿モデル」と呼ぶことにしよう。

ただし、この神輿モデルにおいて実現されている自己表現の多様性は、個々のロボットの表現ルールが共有されることを前提としている。そこで、より一般的には表現ルールが多様であるシステムにおける機能分散を考察する必要がある。そのためには、本論文のなかで示した共時的な自己言及だけでなく、継時的な自己言及も実現する必要があるだろう。

#### 4. まとめ

本論文では生命的インテリジェンスの特徴を「場」に求め、それを可能にする自己非分離な開かれたシステムとしての論理形式を考察した。その結果、システム内部から観ることによって自己非分離性が生じ環境が無限定になってしまうこと、その無限定な環境に対応できるためにはシステム自体も無限定に構築されなければならないこと、それらシステムと環境の関係の不良設定性を限定する拘束条件を自己創出しなければならないこと、そして、その時には「場」的な拘束条件を生成しフィードフォワード的に自己言及しなければならないことが導かれた。そこで、これら

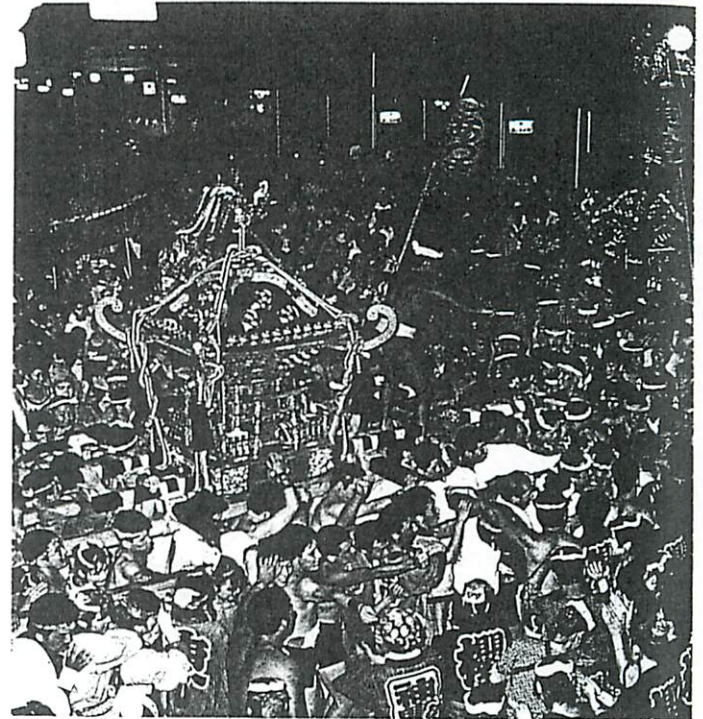


Fig.6

に基づいて知的人工システムとしてのマルチロボットシステムの構築を試みた。グループ編成モデルではサブシステム間が、荷物運搬モデルではサブシステム間および環境との間が開かれた関係として構築され、状況に応じた機能分散とその相互補償が実現された。そして、このような知的マルチロボットシステムの問題は最終的には神輿という極めて日本の文化に行き着くことも明らかになった。われわれはこのようなモデル系を通して「場」という日本のインテリジェンスの本質に迫れるかもしれない。

#### [参考文献]

- Y.Miyake, S.Tabata, H.Murakami, M.Yano & H.Shimizu (1995) J. Theor. Biol., (in press)
- Y.Miyake, G.Tagu, Y.Ohto, Y.Yamaguchi & H.Shimizu (1994) In: Distributed Autonomous Robotic Systems (Asama H., eds), pp.310-321, Springer-Verlag
- Y.Miyake & H.Shimizu (1994) Proc. of 3rd. IEEE Int. Workshop on Robot and Human Communication, Nagoya, Japan, pp.118-123
- Y.Miyake, Y.Yamaguchi, M.Yano & H.Shimizu (1993) IEICE Trans. Fundamentals, E76-A: 780-785
- Y.Miyake, M.Yano, H.Tanaka & H.Shimizu (1992) Cell Struct. Funct., 17:371-375
- Y.Miyake, M.Yao & H.Shimizu (1991) Protoplasma, 162: 175-181
- G.Tagu, Y.Yamaguchi & H.Shimizu (1991) Biol. Cybern., 65: 147-159
- R.A.Brooks (1986) IEEE J. of Robotics and Automation, RA-2: 14-23
- J.Tani & N.Fukumura (1994) Neural Networks, 7: 553-564
- 清水 博(1992) 生命と場所、NTT出版
- 橋田浩一(1994) 認知科学 脳と心のモデル、岩波書店
- 北野宏明(1995) 遺伝アルゴリズム2、産業図書
- 日本の祭り研究会(1992) 日本の祭り、新日本法規出版