

《小特集》

人工物生産システムの生物的な振舞い

上 田 完 次*・大 倉 和 博*

ABSTRACT This paper gives an Artificial Life approach to engineering application with showing biological behavior of an artifact manufacturing system through computer realization. The idea is based on Biological-oriented Manufacturing Systems (*BMS*) which have been proposed by one of the authors. The *BMS* aims at dealing with complex and dynamic problems covering most of manufacturing activities from planning, design, production, utilization, repairing, recycling to disposal by learning superior biological functions such as self-formation, self-recovery, adaptation and evolution ability from living organisms, and coexisting with them. Unlike conventional manufacturing systems, in the *BMS* at floor level, for instance, work materials send out *DNA* (gene)-type information and machines respond to it with *BN* (knowledge)-type information. It is a flexible system with improved adaptation to product type diversification and unexpected events in manufacturing environments without centralized control. A simple model of *BMS* is presented by imitating a pseudo ecosystem, that is composed of two types of populations: autonomous moving works that carry the *DNA*-type information and manufacturing ribosome that process work's requests. Computer realization results using Evolution Strategies suggest that the proposed model has sufficient ability to adapt to dynamic change in system environments.

1. はじめに

人工生命研究の工学的展開の一つとして、創発性を備えた人工物とそれを生産するシステムの可能性について、コンピュータ・リアライゼーションを通して考察してみようというのが、本稿の主題である。

人工生命の中心概念は、いうまでもなく emergence (創発)である。そして多くの人が魅せられるのは、この創発の持つ非明示性である。と同時に、少なからぬ人が人工生命に躊躇するのもその非明示性の故である。前者では、非明示性は豊かな可能性という期待を抱かせるし、後者においてはそれは危なっかしい制御不可能性という疑念を招くからである。

それでは創発とは何か。人工生命の提唱者 *Langton*¹⁾によれば、創発とは「部分間の局所的な相互作用の結果全体が現れ、その全体が部分への環境となり、それによって新たな秩序が形成される現象」である。この創発現象が生命の起源から、発生、行動、進化、適応など、個体から社会、生態系に至る様々な生命の振舞

いを司る本質であると言う。創発を一般化し、既存の有機媒体に拘らずに様々な媒体上に、例えばコンピュータを用いて創成しようとするのが人工生命の基本的立場にはかならない。

このような人工生命を工学の側から見た時、部分から創発する全体の振舞いが非明示的であるという特徴は、人工システムの予測や制御に適していないのではないかという批判が生まれてくるのは無理もない。だが、翻って既存の人工物系を見ると、それは果して完全に予測可能なシステムなのか。ロボットやプログラムなどの人工物が決定論的でなければならないというのは、実は一種の思い込みであって、むしろ創発性を備えた人工物を考えるべきであり、そのことによってこれまでの工学が抱えていた様々な問題を解決できるのではないだろうか、という期待が筆者にはある。

筆者の一人は、80年代の終りから、自律分散、ボトムアップ、局所決定の原理による生物指向型生産システム^{2)~4)}を提案してきたが、その中心概念は自己創発する人工物であった。その経緯で *Langton*に会い、人工生命研究を知ることになった。従って、創発の数理こそが筆者が人工生命に期待する最大の理由である。

この小文では、初めに生物指向型生産システムの概念について述べる。そして、その簡単なモデルとして

Biological Behavior of an Artifact Manufacturing System. By Kanji Ueda and Kazuhiro Ohkura (Dept. of Mechanical Engineering, Kobe Univ.).

*神戸大学工学部

生態系とみなした人工物生産システムの理論構築を試みるとともに、コンピュータ・リアライゼーションによってシステムの生物的な振舞いを示すことにより、人工生命研究との接点を論じてみたい。

2. 生物指向型生産システム の概念

生物指向型生産システム (Biological-oriented Manufacturing Systems, 以下 *BMS* と略す) とは“生物に学び生物と共生する人工物生産システム”であり、生物に学ぶとは生物の持つ優れた機能に学ぶことを意味し、生物と共生するとは人間と機械の協調を考え、さらにはマクロ生態系の中で生産システムを捉えようとする概念である。また、*BMS* は、狭義の生産の枠に限定せず、人工物製品の計画から設計、製造、販売、消費、運用、修復、再利用、最終廃棄までの全ライフサイクルを包括する。

これは、生産システムが本来、生産目的の多様性や生産設備の故障や更新といった変動性を避けられないものであり、むしろ変化を肯定的に捉えるべきであるにもかかわらず、従来の集中管理型・トップダウン型のシステムでは様々な外的内的環境の変化に十分対応できないという認識から、その限界を生物指向の発想で克服しようとするものである。

2.1 創発する人工物

自ら成長し、環境の変化に適応し、進化し、さらに生物と共生し、自己分解できる人工物、もしこのような人工物を実現できれば、これまで直面してきた多くの難題を解決できるだろう。このような人工物は創発する人工物と呼べる。

既に述べたが、人工物はこれまで信じられていたように決定論的なものではない。設計者の意図以上の機能を発揮したり、逆に意図に反して劣化したりする例は多い。決定論的に作られた人工物が仮に単体としては予想通りに動作しても、他の人工物と組み立てられたり、複合化すると、予想しなかった挙動をする場合が少なくない。だが、このような伝統的人工物の挙動は確率的とは言えても基本的には決定論的であり、発生や進化といった生物にみられるような創発的な振舞いをするわけではない。

それでは、何が生物に創発性をもたらしているのか、その必要条件なのか。それは、人工物と生物のライフサイクルにおける情報の役割を比較すれば明らかである。内在する遺伝子型情報と内在化した知識型情報が生物においては実体とともにあり、人工物のように両者は乖離していない。このことが、生物の持つ自

律性と多様性という相反する機能を発現しているのである。

すなわち、

① 生物は、自己認識、自己成長、自己修復、自己組織化、進化、適応などの自然物や人工物にない機能を持つ。

② 生物機能を支配している情報は、*DNA* (遺伝子型) と *BN* (知識型) 情報に大別でき、両者は相補的であるが、優れた機能の多くは前者に依るところが大きい。

③ 自然物は情報を抽出すべき対象であり、また人工物は情報を付与すべき対象であるのに対し、生物は情報を発現する主体である。

④ 生物では情報と実体が陽に一体化しており、両者の不可分性という人工物や自然物にない性質がある。このことが自己情報の発現を容易にし、①②③を司っている本質であるといえる。

このような特性を人工物に持たせることにより、従来の生産システムの限界を越えようとするのが *BMS* である。

2.2 製造フロアレベルの *BMS*

BMS は、既に述べたように、人工物の計画から最終廃棄までの全ライフサイクルを対象としており、階層的には、①リボソームレベルから、②セル、③フロア、④ファクトリー、⑤エンタープライズ、⑥ソサイエティ、⑦マクロエコシステムまでのいくつかのレベルがある。

本小文で取り上げるのは製造フロアレベルにおける *BMS* であり、そこでは、図1に示すように、

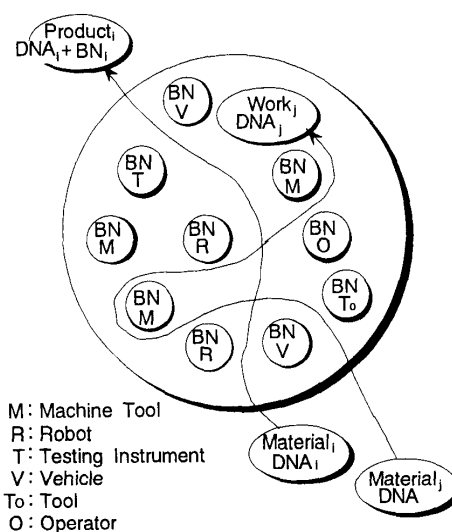


図1 フロアレベルの生物指向型生産システム の概念

① 生産システムを構成する工作物、工具、工作機械、検査機器、搬送車、ロボット、オペレータなど全ての要素を自律した生物に擬す、

② 生産対象である工作物は DNA 型情報を持ち、工作物から部品、製品へ成長する、

③ 他の構成要素である生産設備は主に BN 型情報により連携し協調して工作物を育てる。

これまでの生産システムのように生産設備側に情報を偏在集中させるのではなく、製品形態情報や素材情報のような個別情報は生産対象側に持たせ、生産対象が情報を発信し、生産設備側が応答するシステムである。工作物は自身が何処へ行きたいか、何処を細くしてほしいか、何処を測ってほしいか、何処に触れてほしいかを発信し、これに対し搬送車や工作機械、検査機械、ロボットなど機械側が応答する。CIM (Computer Integrated Manufacturing) に代表されるような既存システムとは異なり、製品の多様性と設備の更新や異常発生へ柔軟に対応できるシステムであり、また、システム全体の統括を前提としない分散管理型のシステムである。

さらに、工作物は製品として成長した後も、図 2 に示すように、

① 素性や形態などそれ自身のあるべき情報として DNA 型情報を持ち続けながら、BN 型情報としての知能化を開始して製造履歴や使用履歴などを知識として獲得し続け、そのことによって、

② 他の人工物と協調して自らの機能を発揮し、

③ 人間社会系での消費情報との対話や故障への自律的対処、次世代製品への進化的設計への対処を容易にし、

④ リサイクルや廃棄へ柔軟に対応し、人間をはじめとする他の生物とも調和し、マクロ生態系と共生

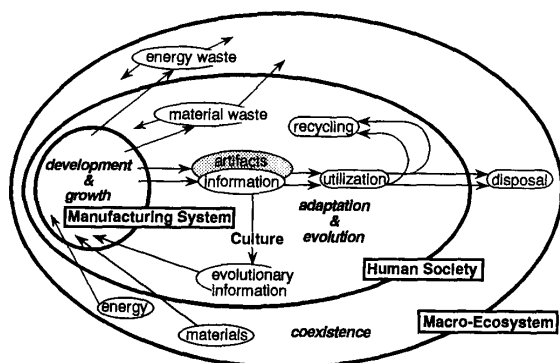


図 2 マクロシステムに位置づけた生物指向型生産システム

し、自然の連鎖に融合するようになるであろう。

さて、このような BMS を具現化するには少なくとも二つの課題がある。第 1 は情報（およびその処理機構）と実体を一体化する新しい媒体素子の開発という技術的課題であり、第 2 に、そのような媒体素子が開発されたとして、それを備えた要素がどのように振舞うか、さらにはそれにより構成されるシステムの挙動がどのようなものであるかを明らかにするという理論的課題である。

第 2 の課題は言い換えれば、擬生物化した人工物の生物的な振舞いを調べることであり、人工生命研究でのソフトウェアシンセシスと方法論上の共通性がある。そこで、次節では、製造フロアの BMS の簡単なモデリングを行い、進化戦略の手法を用いてリアライゼーションを行った例⁵⁾を示すことにする。

3. BMS の振舞い

3.1 BMS のモデリング

ここでは、製造フロアの BMS を自然生態系と対応づけて、そのモデリングを試みる。生産システムを環境として考え、工作物はそこで発生・成長していく生物と考える。

製造フロアレベルを対象とし、2 種類の人工物集団からなる簡単なモデルを考える。すなわち、システムはマニファクチャリング・リボソーム（以下加工リボソームと呼ぶ）と呼ばれる生産設備要素および生産対象である工作物から構成される。加工リボソームとは生物の細胞内工場であるリボソームに倣ったものである。

図 3 に概念図を示すように、工作物は、製品形態情

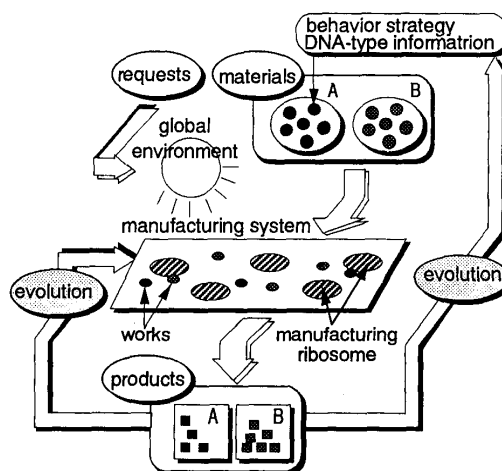


図 3 生態系と見なした BMS のモデル

報 (DNA 型情報) を持ち、それに従いながら生産システム内の生産設備 (加工リボソーム) を順次たどりながら、製品へと形態変換を受ける。また、製品に対するそれらの適応度合を制御することにより、受けたシステムの生産要求を達成する。

このような振舞いを示す BMS では、各構成要素が有する情報に対して、次のことを規定する。

- ① 工作物が持つ DNA 型情報は製品に成長するための形態変換に関する情報がすべて記載されている。
- ② 生産システムは生産要求に関する情報を与えられるが、工作物はその情報を持たない。
- ③ 工作物は生産システムに関する情報を持たない。
- ④ 生産システムは工作物に関する情報を持たない。

工作物は生産システムにいつどのようなタイミングで投入されるか不定であり、投入時のシステムの内部状態もまた不定である。生産システムもどんな工作物が投入されるか事前に知らない。言い換えれば、生産要求が変動してもかまわない。いつ新しい工作物が投入されてもかまわない。すなわち、生産設備の変化 (故障や更新) に適応するシステムである。生産システムの状態は予め定まっているのではなく、結果の秩序として創発される。

このようなシステムには、次の3つの課題がある。

- ① 製品の DNA 型情報記述問題
- ② 工作物群の振舞い問題
- ③ 局所環境設定問題

既述したように BMS は疑似生態系であるが、そこでは工作物が成長する個体群であるのに対し、生産システムは環境として捉えている。環境には大域環境と局所環境があり、図4に示すようにシステムに与えられる生産要求が大域環境であり、加工リボソームは局所環境である。すなわち、BMS では、生産システムの目的を大域環境とし、要素の行動戦略を最適化問題として考えるのではなく、適応的な振舞い問題としてとらえる。

システムの動作の概略は次のようになる。工作物は自身の DNA 型情報に基づいて、自らの行動戦略に従って生産システム内にある目的の加工リボソームを求めてシステム内を探し回る。目的の加工リボソームに到着すると、形態変換要求を伝えて返事を待つ。加工リボソームは一定時間内に到着した工作物を調べて、大域環境である生産要求を反映するように、処理すべき工作物に応答する。すべての形態変換が終了すると

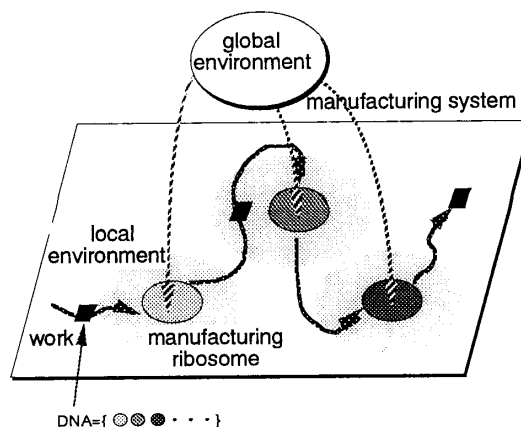


図4 BMSの大域環境と局所環境

工作物は最終リボソーム (ゴール) へ行く。定まった時間経過後、評価を行い更新する。すなわち、工作物群の発生・成長のための行動戦略が動的な環境のもとで適応・進化することになる。

3.2 モデルの数学的記述

前項で示した簡単なモデルは次のように記述できる。

$$BMS = \{MS, \cup_i w_i\} \quad (1)$$

$$MS = \{M, \cup_i R_i\} \quad (2)$$

$$w_i = \{\cup_j w_{ij}\} \quad (3)$$

ここで、 MS , M , R_i , w_i はそれぞれ生産システム、大域環境、加工リボソーム、工作物 w_{ij} からなる工作物群 i である。これらはさらに以下のように記述される。

$$M = \{A_M, K_M, \Sigma_M, \Delta_M, \delta_M, \lambda_M, q_{0M}, F_M\} \quad (4)$$

$$R_i = \{A_{R_i}, K_{R_i}, \Sigma_{R_i}, \Delta_{R_i}, \delta_{R_i}, \lambda_{R_i}, q_{0R_i}, F_{R_i}\} \quad (5)$$

$$w_{ij} = \{A_{w_{ij}}, K_{w_{ij}}, \Sigma_{w_{ij}}, DNA_{w_{ij}}, \delta_{w_{ij}}, f_{w_{ij}}, q_{0w_{ij}}, F_{w_{ij}}\} \quad (6)$$

ここで、 A_* は $*$ に関する幾何情報 (例えば生産システムフィールドの広さ・形など) であり、 K_* , Σ_* , Δ_* , f_* , q_{*0} および F_* はそれぞれ $*$ に関する内部状態集合、入力集合、出力集合、適応度関数、初期状態、最終状態である。状態遷移関数 δ_* と出力関数 λ_* は以下のように定める。

$$\delta_* : K_* \times \Sigma_* \longrightarrow K_* \quad (7)$$

$$\lambda_* : K_* \times \Sigma_* \longrightarrow \Delta_* \quad (8)$$

これから、工作物群 i に共通する DNA 型情報を以下のように書ける：

$$DNA_{w_i} = \{\Delta_{w_i}, \lambda_{w_i}\} \quad (9)$$

以上の記述に基づきシステムの挙動を簡単に説明する。生産システム MS は大域環境 M と局所環境 R_i から構成される。 M は単に要求された工作物の種類と

単位時間に生成することが要求された数量を意味する。 R_i は加工リボソームで自身の処理能力と自身の現在の状態を意味する。

工作物 w_{ij} はある戦略 δ_{w_i} で MS 内を歩き回り、現在の状態 $k_{w_{ij}} \in K_{w_i}$ にとっての目標となる加工リボソーム R_k に到着すると、加工要求を発信する。加工リボソーム R_k は自身の内部状態 $k_{R_k} \in K_{R_k}$ が ready であれば、受けた加工要求を調べ、 δ_{R_k} と λ_{R_k} に従ってそのうち一つを選択する。加工が終了すると、工作物は再び生産システム内に放たれ、DNA 型情報内に記された次の加工をしてもらえる加工リボソームを探し出す。これを DNA 型情報の全てについて終えると、最終リボソームという特別なリボソームに行き製品に成長する。最終リボソームは製品が到着したことを生産システム M に伝えることのできる特別な能力を持つとする。それに従い、 M は $k_M \in K_M$ を書き換え、また λ_M と δ_{R_i} によって k_{R_i} を書き換えシステム全体に伝える。

このモデルでは、初期には予想していなかった生産設備の故障や刷新などが起きても、それによる要素間の情報伝搬がほとんどない。例えば、これに新しい加工リボソームが加えられる場合、 MS に対して新しい要素が加えられる以外は他の構成要素に対しても全く影響を与えない。また、ある加工リボソームが故障した場合、そのリボソームの内部状態を down に書き換える以外に特に処理は必要ない。そのため、予期せぬことに強い柔軟なシステムであるといえる。

この記述方式を使えば、前項3.1で示した3つの問題は次のように書き換えることができる。

- ① DNA_{w_i} の記述問題
- ② (δ_{w_i}, q_{0w_i}) の獲得問題
- ③ $(\delta_{R_i}, \lambda_{R_i}, q_{0R_i})$ の設定問題

3.3 BMS のリアライゼーションの例

ここでは、製造フロアレベルの BMS に対して、進化戦略 (Evolution Strategy: ES) の手法⁶⁾を適用してその振舞いを調べたコンピュータ・リアライゼーションの例を示す。ここでシミュレーションと言うのではなくリアライゼーションと称するのは、シミュレートすべき対象が先にあるのではなく、計算の結果現れるという意味合いがあるためである。

リアライゼーションに用いたモデルでは、製品の種類は2つであり、それぞれ3つの異なる処理を行う加工リボソームを経て製品となる。一方、加工リボソームは、図5に示すように、ゴールを含め7つある。すなわち、処理A用に3つ、処理B用に3つ、及びゴ

ールが1つある。ただし、処理A, Bはそれぞれ、処理速度が高速、中速、低速の3段階がある。

生産要求である製品の数は大域環境として与えられるが、図6に示すように途中で変動する。最初はWORK1が6個、WORK2が6個とするが、途中でそれぞれ18個と2個、さらに6個と6個というように変動させる。

工作物は自律移動し、ある有限距離内にある障害物を検知でき、また加工リボソームの位置を加工リボソームから放たれるポテンシャルを通じて知ることができる。移動方向は、自身のその時点の姿勢、障害物回避方向、ポテンシャル方向、ランダム方向の重み付け線形和で決定する。また、工作物と加工リボソームはそれぞれの進化戦略によって動的な環境に適応するとする。工作物の評価関数は平均進捗状況、平均処理時間、平均衝突回数の重み付け和とする。また、加工リボソームの評価関数は生産要求達成率と生産要求達成時間の重み付け和とする。

リアライゼーションの結果の例を図7に示す。この例は、最初に与えられた生産要求が100世代毎に変更された場合の振舞いを示したものである。2種類の工作物、WORK1 (□で示す) と WORK2 (△で示す) がフィールドの右上と左下から出発し、各自がもつ DNA 型情報に従って、加工リボソーム (○で示す、ただし6種) を探しながらゴール (●で示す) を目指して移動する。途中でフィールドの壁にぶつかるそこで死ぬものとした (■, ×で示す)。

| cell | No. | processing type | processing speed |
|------|-----|-----------------|------------------|
| ○ | 1 | A | 5 |
| ○ | 2 | A | 10 |
| ○ | 3 | A | 15 |
| ○ | 4 | B | 5 |
| ○ | 5 | B | 10 |
| ○ | 6 | B | 15 |
| ● | 7 | goal | - |

図5 加工リボソームの機能

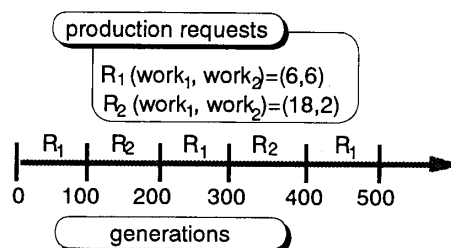


図6 大域環境の変動

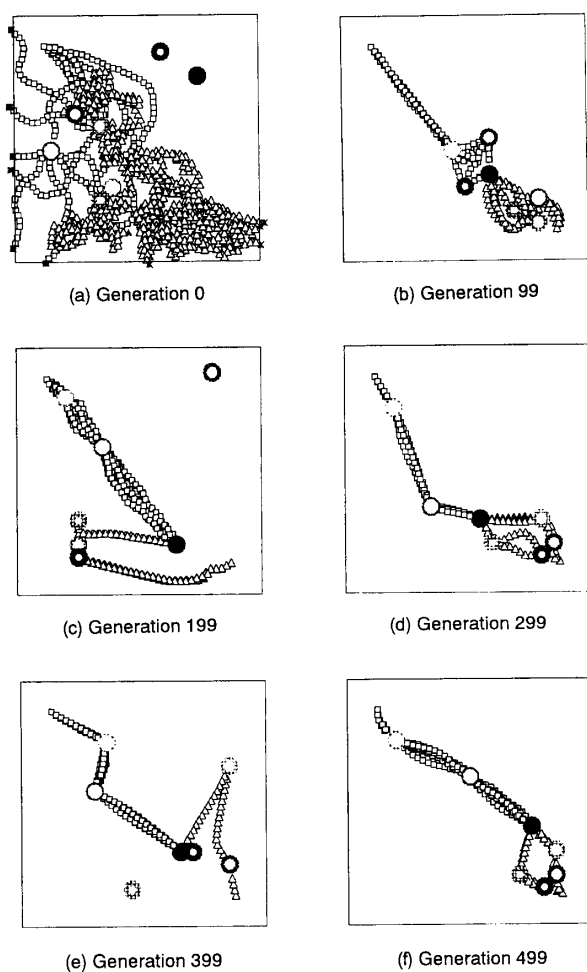


図7 コンピュータ・リアライゼーションの例

さて、最初はWORK1が6個、WORK2が6個という生産要求が与えられた。図7(a)に示すように、初期状態では工作物はランダムに探索を行うが、ゴールに到達したのは殆どなかった。世代を経るに従い、全ての工作物がゴールに到着できるようになり、その後も探索を繰り返すが、99世代目には一つの秩序を形成しているのが分かる(同図(b))。WORK1およびWORK2は、それぞれ異なる2種類の経路を経て形態変換が行われることが観察された。

次に、100世代目に生産要求が変更され、WORK1が6→18個、WORK2が6→2個へと変動すると、しばらく満足する結果を得られないまま停滞した後、多様性を獲得し、様々なパターンを探索するようになった。その後、199世代目には、同図(c)に示すようになった。さらに、200世代目には生産要求が再び変更され、WORK1が18→6個、WORK2が2→6個へと戻されたが、数世代とまどい混沌としているものの、

比較的早く高速に良好な解を見つけ、299世代目には同図(d)に見られるような秩序が得られた。300世代、400世代でのさらなる変更に対してもはじめはさまようものの、しばらくすると新たな秩序が生まれるのが分かる。

さらに、図8は、WORK1、WORK2それぞれに対する平均処理時間を示したものであるが、生産要求が変更された直後は大きな値を示すが、しばらくすると減少する傾向を示しており、図7の結果と対応している。

このように、提案したBMSモデルは外部環境変化に対するシステムの適応的な振舞いをよく現しているものと思われる。なお、生産設備の故障・更新という内部環境変化についても検討しており、システムが適応的に振舞うことを確かめているが、それについては別に報告する予定である。

ところで、工作物群と加工リボソーム群が互いに動的な環境と考えれば、生産対象と生産設備の共進化的振舞いとして捉えることができ、興味深い。生産システムには、生産対象同士、生産対象と生産設備、生産設備同士、人工物と人間といった様々な関係に発生する競合の解消問題がある。物理的な構成要素間だけでなくプログラミングやスケジューリングにおいても要素間に、一方の利益を追究すれば他方が損失をこうむるといった問題は多い。これは共進化問題として扱えるだろう。この問題は、発生のアルゴリズムに基づくDNA型情報記述問題とともにBMSにおいて今後中心となる理論的テーマである。

4. おわりに

最後に、決定論的アプローチから創発型アプローチへのパラダイムシフトについて展望したい。人工知能と人工生命は相補的な面があるが、両者の特徴をやや強調して対比すると図9のようになる⁷⁾。同図は人工知能から人工生命へのシフトを軸に、関連する科学技術をマップとして示したものである。またCIMから、IMS (Intelligent Manufacturing Systems)、さらにBMSへのパラダイムシフトも対応させている。人工知能型アプローチの限界は代表的なコンセプトであるCIMの限界に重なる点が多い。既存システムは、閉じたシステムの予め決定された目的をそのまま変更せずに無故障や無刷新という前提のもとで実現するには適しているが、多様な目的をダイナミックな環境のもとで達成するには適していない。

将来の人工物生産システムは人工生命や複雑適応系

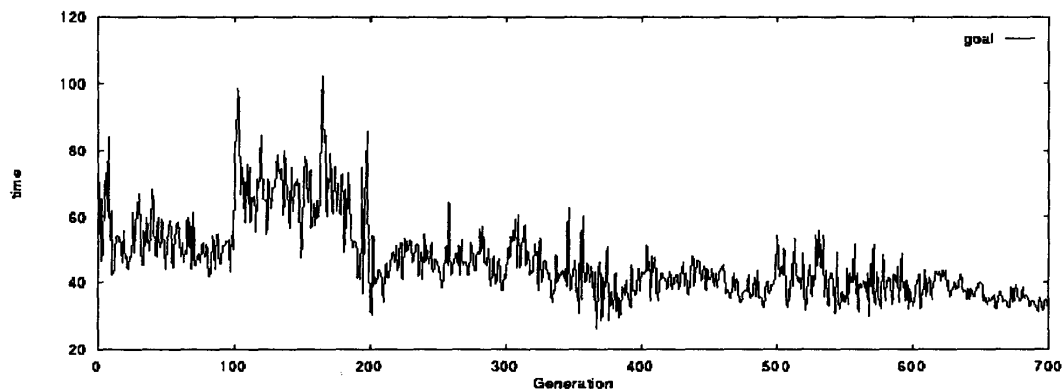
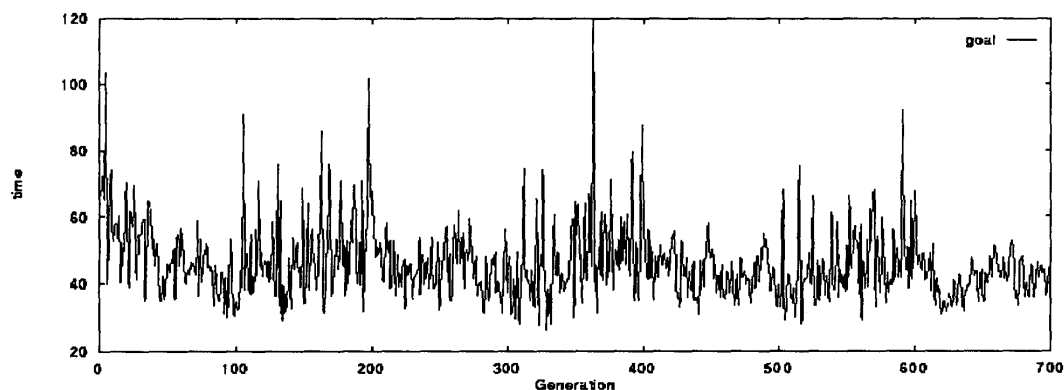
(a) work₁(b) work₂

図8 平均処理時間の推移

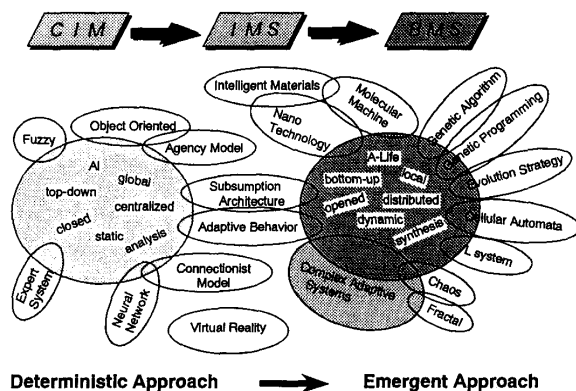


図9 決定論的アプローチから創発型へ

研究の発展と連動しながら、決定論的なものから創発型へと展開されるのではないか。現時点ではあくまでも期待の域を出ないが、創発型アプローチへの転換は人工物をつくる行為とつくられる人工物の双方にかか

わる様々な困難な問題に対して、解決の糸口を示すに違いない。

本小文では、ボトムアップ性、分散性、局所性を主要原理とし、発生・成長と適応・進化の特徴を導入した生物指向型生産システムとそのモデリングについて述べた。生産対象と生産設備の2集団からなる製造フロアの単純なモデルではあったが、環境変化に対するシステムの適応的な振舞いを示すことができた。拙稿が創発型の生産システムへの議論のきっかけとなれば幸いである。

参考文献

- 1) C. Langton: "Artificial Life", Addison-Wesley Pub. Com. Inc. 1, (1989)
- 2) 上田完次: "生物指向型生産システム", 工業調査会, (1994)
- 3) K. Ueda: "An Approach to Bionic Manufacturing Systems

- Based on *DNA*-type Information", Proc. of Inter. Conf. on Object-Oriented Manufacturing Systems, 303, (1992)
- 4) K. Ueda: "A Genetic Approach toward Future Manufacturing Systems", Flexible Manufacturing Systems, Past-Present-Future, edited by J. Peklenik, CIRP, 211, (1993)
 - 5) K. Ueda, K. Ohkura: "A Modeling of Biological-oriented Manufacturing Systems with two types of Populations", Advancement of Intelligent Production, edited by E. Usui, Elsevier Science, 75, (1994)
 - 6) T. Back et al: "A Survey of Evolution Strategies", Proc. of 4th Inter. Conf. on Genetic Algorithm, 2, (1991)
 - 7) 上田完次: "知能化生産システム—知識型知能化から創発型知能化へ—", 精密工学会誌, 59-11, 1755, (1993)
-