

生物指向パラダイムによる環境適応型人工物の ライフサイクルに関する総合的研究

A Synthetic Study on the Life Cycle of Environment-Adaptable Artifacts in Biologically-Oriented Paradigm

上田完次 神戸大学工学部
Kanji Ueda, Kobe University

A synthetic study from multiple view points such as engineering, biology, informatics, economics and philosophy has been carried out to aim to deal with growing environmental difficulties due to the expansion of human activity based on biologically-oriented paradigm. The problem difficulties are classified into three types, *complete information problem*, *incomplete environmental information problem* and *incomplete specification problem*. In order to solve the classified difficulties a concept of biological artifacts is proposed with ideas such as self-organization, adaptation, evolution and learning. Computer modeling shows the effectiveness of environment-adaptable artifact networks and the interactive manufacturing in which humans such as designers, manufactures and consumers participate throughout artifact life cycle.

1. 研究目的

人工物生産の拡大に伴う地球環境への影響は甚大であり、これまで様々な対策が研究されているが、そのほとんどは物質とエネルギーについての議論であり、情報の重要性があまり認識されていない。人々が禁欲的な田園主義に回帰するか、あるいは、画一的な価値観に統制されるのを望んだ場合には、問題の解決は容易である。むしろ人々は両方とも選ばない。問題の困難さは、個の自律性を許しながら、全体としての多様性を持続しなければならない点にある。自律性と多様性の維持、これは実は生命システムや生態系が本来もっている性質である。

本研究では、生物の適応能力に着想を得た生物指向パラダイム[1]により環境問題へアプローチしようとするものである。従来環境問題で陽に取り上げられなかった情報の役割に注目し、環境への適応という視点から問題を一般化するとともに、情報発現により、自己認識し、自己成長し、自己修復し、人間と共進化し、さらには自然生態系に融合する人工物、そのような生物指向の環境適応型人工物のモデリングと実現可能性を学際的・総合的に追究する。

2. 研究経過

2.1. 人工物をめぐる環境と難しさのクラス

人工物をめぐる環境には、人工物をつくる環境、人工物が振る舞う環境、そしてそれをとりまくマクロ環境の3つのレベルがある[2, 3]。第1は、自然物に意図を投入して人工物に変換する、生産システムという環境である。要素を動員して全体の合目的性をどう実現するかという最適化が課題となる。キーワードは部分と全体である。第2は人間社会という環境である。ここでは人工物と人間は互いに環境となり、相互作用がキーワードとなる。さらに、第3の環境は、人工物と人間が自然物とともに包含される、いわばマクロ生態系である。ここでの問題は原料を無限から取り出し、廃棄物を無限へ戻すことができないという、無限の有限化、すなわち、内と外がキーワードとなる。

ところで、人工物の設計、生産、運用において、困難さの本質は何か。人工物は目的とそれが作動する環境を伴うシステムである。使用環境でシステムの機能が目的を満たすべく、意味時間の中で意味精度の実行解を見いださなければならない。如何に、有限意味時間の中で目的を定め、環境を記述し、そして解を決定できるか。人工物の目的と環境に関する情報の完全さの観点から、次のように3つのクラスに分けて、問題を考えることができる[4] (図1)。

- クラスI：環境と目的に関する情報が事前に十分に与えられており、問題を完全に記述できるが、解くのが困難な問題
- クラスII：目的に関する情報は事前に十分に与えられているが、環境に関する情報が不十分で問題を完全には記述できないために困難な問題
- クラスIII：目的に関する情報も不十分で問題を完全には記述できないために困難な問題

対象の複雑さ

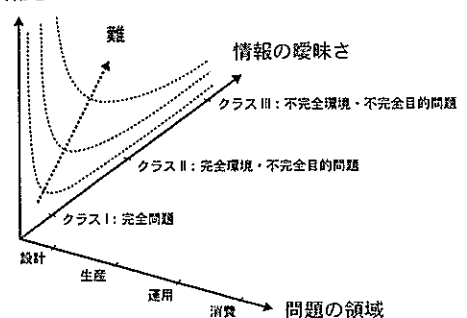


図1 人工物をめぐる難しさのクラス

クラスIでは、システムの内部状態があらかじめ決定され、目的関数が外部から与えられ、問題が閉じられることになるが、この場合でも一般には解候補が多数あり得て、最適解探索が困難となる。しか

し、人工システムとは必要な情報が予め全て知られているわけではない。システム内外の環境（自然、社会、経済、文化など）は変動するのが常であり、不完全な知識のもとで解を求めなければならないことが多い。作動中に未知環境を学習し適応する人工システムの創出、これがクラスIIの課題である。そして、より困難なのがクラスIIIである。その本質は観察者問題であり、既に述べた人工物環境における内と外の問題とおそらく等価である。すなわち、環境外に観察者が立ち得たときのみ、環境問題は内部の問題となり、最適化が可能となるが、人工物活動の拡大は観察者を内部に登場させることになった。このような自己言及的なシステムでは、入力と出力が明示できなくなり、工学のシステムは合目的的である、という無謬性が実は崩れてしまいかねない。行為対象への行為者の参入の実現、それがクラスIIIの課題である。図1に示したように、対象とする人工物システムのが複雑になるにつれ、そして、情報が不確実になるに従い、問題はより困難となる。

2.2.生物指向パラダイム

上に述べた人工物をめぐる困難さにアプローチするには、生物指向のパラダイムが有効であると考えられる。生物指向による人工物生産システム[1, 5]は、“生物に学び生物と共生する生産システム”である。自己認識、自己成長、自己修復、進化、学習などを人工物に導入し、人間と人工物の相互作用を考え、さらにはマクロ生態系の中で人工システムを

捉える概念であり、製品の計画から設計、製造、運用、修復、再利用、廃棄までのライフサイクルを包括する。生物では内在する遺伝子型（DNA）情報と内在化した知識型（BN）情報が実体とともにあることが、自律性と多様性という相反する機能を発現している。DNAとBNはそれぞれ進化と学習を司り、環境変動に適応する。このような特性を持たせた人工物で構成されるネットワークを人工物ネットワーク（図2）と呼んでいる[6, 7]。このネットワークは情報のリサイクルの特徴を持つことになる。

生物指向パラダイムは次のようなものである。(1) 工作物、生産機械、搬送車など全ての要素を自律した生物に擬す、(2) 生産対象はDNA型情報を持ち、工作物から製品に成長する、(3) 生産設備は主にBN型情報により工作物を育てる。人工物は成長後、(4) 学習により環境に適応し、他の人工物と協調して機能を発現する。そして、(5) 経済や文化環境を通して次世代製品に進化し、(6) マクロ生態系の中で生物と共生し、自然の物質・エネルギーの連鎖に融合する。その具現化には、(1) 情報を一体化させた人工物の開発、(2) 人工物を結ぶネットワークの構築、(3) システム全体の振る舞いの解明、の3つの課題がある。

結局、環境問題の多くは、人工物が異なる環境においてその在り方を柔軟に変化させることができ、生物指向型人工物はそれを可能にすると考えられる。

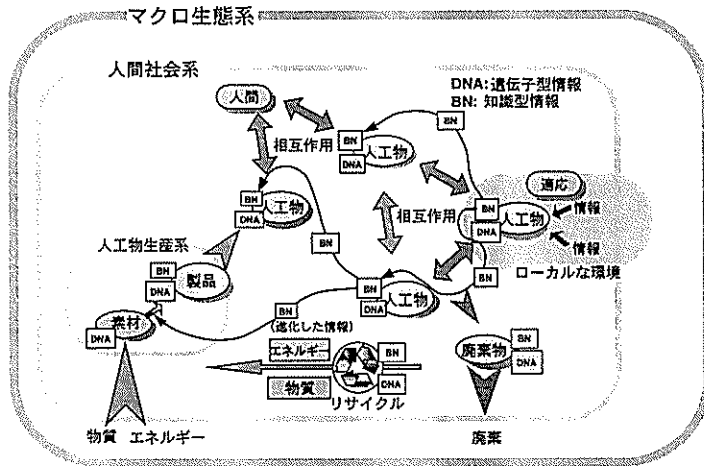


図2 生物指向による環境適応型人工物ネットワーク

3. 研究成果

3.1.人工物ネットワークのモデリング

生物指向アプローチは、既述の各クラスに有効である。クラスIに相当する代表的な問題は、ジョブショップ・スケジューリングであり、組み合わせ最適化問題の一つである。分子進化の中立説に着想をえた新しい遺伝的アルゴリズム[8]を開発し、他の研究例に比べかなり優れたパフォーマンスを得た。

次いで、人工物ネットワークモデル構築の一つとして、製造フロアレベルの生産システムのモデル構築を試みた[9]。これはクラスII問題に位置づけられる。製造フロア内における人工物とは製造プロセスを行う生産セルと素材であり、それらの間にポテンシャルフィールドを介した相互作用ネットワークを生成させ、生産セルの配置を自己組織化させようと試みた。工作物はDNA型情報を持ち、生産システ

ム内の加工セルを順次たどり、製品へと形態変換を受ける。工作物は自律移動し、また加工セルの位置をポテンシャルを通じて知ることができる。適応度は生産要求達成率と生産要求達成時間の重み付け和とした。大域環境（外部環境）としての生産要求が変動する場合、及び、局所環境（内部環境）としての加工セルが故障する場合の二つの問題設定について、進化戦略を用いた計算機実験を行った。

生産要求R（製品数量）が変動する例を図3に示す。R1は製品1、2ともに6個。R2は製品1は18個、製品2が2個である。2種類の工作物、WORK1とWORK2がフィールドの左上と右下から出発し、加工セル（○）を探しながらゴール（●）を目指して移動する。最初、R1の生産要求に対して、工作物はランダムに探索を行うが、やがてシステムは一つの秩序を形成する（同図(b)）。

その後、100世代目毎に生産要求をR2、R1に変更させると、変更直後はランダムな振る舞いを示すが、しばらくすると新たな編成が生まれているのが分かる。環境変化の直後はランダムに振る舞うが、世代進化とともに、新たな秩序を形成した。生産セルの故障発生という内部環境の変動にも同様な振る舞いを示した。このように、提案した生物指向モデルは環境変動に対して適応するシステムといえる。

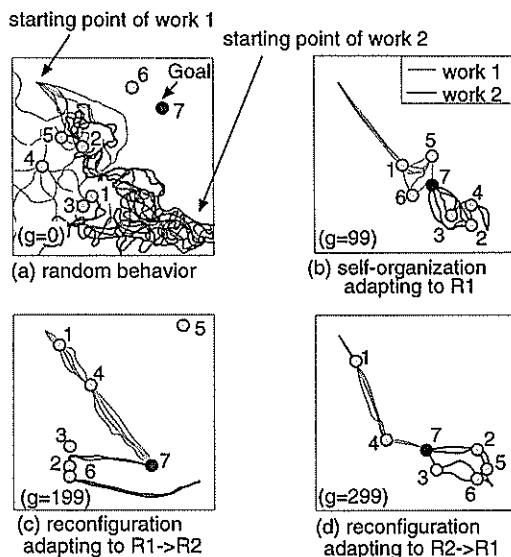


図3 生物指向生産システムの振る舞い

3.2.インタラクティブ・マニュファクチャリング

生物指向型生産システムをクラスIIIに拡張したのが、インタラクティブ・マニュファクチャリング[10]である。ここでは作動中のシステムへ人間が如何に参入できるかが中心になる。従来は、設計者から、製造者、消費者への一方であったが、インタラクティブ・マニュファクチャリングでは、人工物のライフサイクルを通して設計者、製造者、消費者、人工物に情報の双方向性を持たせる。特に、環境負荷軽減には人工物の安全性・リサイクル/リユ

ースの増進が肝要であり、消費者の意図を設計の初段階だけでなく、生産活動の多くの段階で、必要に応じて反映させることが不可欠である。

具現化には、1.人工物の生物情報の埋め込み、2.参加者（設計者、製造者、消費者、人工物）による時空間の共有化、3.システムの自己組織化等を解決しなければならない。それには仮想環境が有効である（図4）。しかし、いわゆる仮想生産のように、現実空間の写像としての仮想空間にとどまらず、現実空間を制御・運用するための仮想空間の生成が重要である。これにより、現有技術で困難な人工物へのDNAの埋め込みや自己組織化のためのポテンシャルフィールドの設定といったことが可能となる。

稼働中の製造フロアのシステム構成への人間の参入の例を示す。ポテンシャルフィールドは、加工セル機能と工作物側の生産要求に基づいて決定される。工作物搬送車は、加工可能なセルのから放たれたフィールドを感知して工作物を搬送する。工作物は加工が実行されるとフィールドを感知し移動してきた搬送車に載せられる。ここでは、システムは自己組織化されるため、設計者、製造者、消費者が稼働中に容易に参入できる。図5は、人間が仮想環境で生産セルの配置を稼働中に変更し、それに対して搬送車が適応的に挙動している例である。

3.3.経済学的考察

経済学的見地から以下の研究を行った[11]。

(1)生物指向型生産システムをあらゆる需要変動パターンに対応させるのは実際的でない。そこで、経済主体の相互依存性に基づく内生的需要変動に着目し、現実経済を分析するために、ネットワーク外部性のある寡占市場を構築し、計算機実験を行った。

(2)人工物のライフサイクル評価について、以下の2点に関して研究した。(a)産業連関論のような生産活動の従来への分析は、技術や需要が変化する場合には不十分であるため、これらを正確に表現できる理論的枠組を開発した。(b)リサイクル製品が消費者間に普及しないことはしばしば起こる。実際、そうした製品が従来型製品より値段が高いと、消費者は後者を購入する。そこで、リサイクル技術導入による経済や環境への影響を評価した。

4. 今後の課題と発展

本研究では、環境問題へのアプローチとして生物指向パラダイムを提案し、工学、情報科学、生物学、経済学、哲学の視点から総合的追究を行った。

環境の複雑さとダイナミクスへの適応は、今日の人工物活動が直面する重要課題である。人工物をめぐる環境と問題の困難さをクラス化し、生物指向アプローチの有効性を検討した。人工物を設計し、製造し、運用し、評価する諸相において、人間がシステムの内部に参入し、インタラクティブに関係しあう仕組みが不可欠である。そのことよって、人は、例えば環境に優しい人工物を製造前に完全に設計しなければならないという就縛から、そして完全設計への執着は人工物の豊かな発展性を摘むという意味で、解放されるのではないか。

これまで、理論的考察と計算機実験を通して、環境適応型人工物の有効性を基本的に確認できたと考ええる。ただし、その具現化については手がかりを示

すにとどまった。今後はプロトタイプを示し、より実現可能なものとする必要がある。本研究のアプローチは、抑制によってではなく発展による環境問題解決の可能性を視座するものであると期待する。

5. 参考文献

[1]上田：“生物指向型生産システム”，工業調査会，(1994).
 発表論文リスト
 [2]上田：“人工物環境の生命論パラダイム”，技術知の射程，吉川弘之監修，東大出版，129-150 (1997).
 [3]K. Ueda: “Differentiation of the Realms of Artifacts and Information: How Does It Relate to Parts/Whole and Inside/Outside”, *Artificial Life V*, MIT Press, 272-277(1997).
 [4]K. Ueda, J. Vaario, T. Takeshita and I. Hatono: An Emergent Synthetic Approach to Supply Network, *Annals of the CIRP*, and 48(1), 377-380 (1999)
 [5]上田：“生物指向型生産システムの展開”，日本ロボット学会誌，15(6)，830-833 (1997)

[6]K. Ueda, K. Ohkura: “A Biological Approach to Complexity in Manufacturing Systems”, *Manufacturing Systems*, 25(1), 57-65 (1996).
 [7]上田：“生物指向型生産システム-環境への適応を目指して-”，日本機械学会誌，101巻959号，61-64 (1998).
 [8]大倉，郷東，上田：“中立突然変異型GAによるジョブショップ・スケジューリング問題の解法”，日本機械学会論文集(C)，63巻614号，544-551 (1997).
 [9]K. Ueda, J. Vaario, K. Ohkura: “Modeling of Biological Manufacturing Systems for Dynamic Reconfiguration” *Annals of the CIRP*, 46(1), 343-346 (1997)
 [10]K. Ueda, J. Vaario, N. Fujii: “Interactive Manufacturing: Human Aspects for Biological Manufacturing Systems”, *Annals of the CIRP*, 47(1), 389-392 (1998).
 [11] S. H. Oda, K. Iyori, K. Miura and K. Ueda: “The application of cellular automata to the consumer's theory”, *Lecture Notes in Artificial Intelligence 1585, Simulated Evolution and Learning*, Springer Verlag, 454-461 (1999).

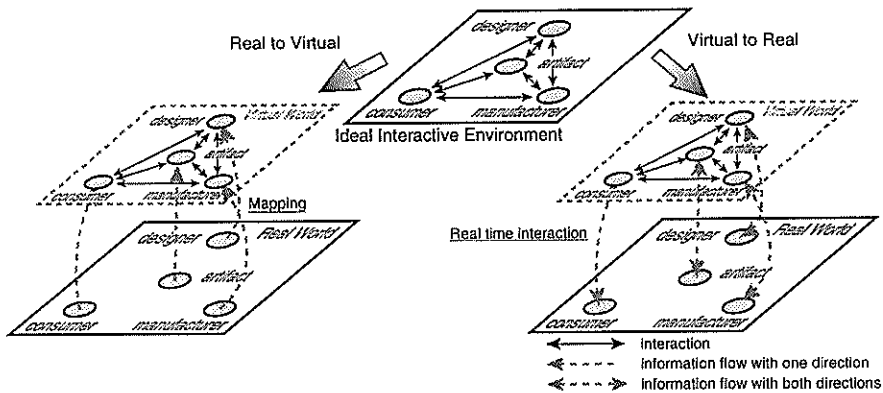


図4 インタラクティブ・マニュファクチャリングの具現化のための仮想環境

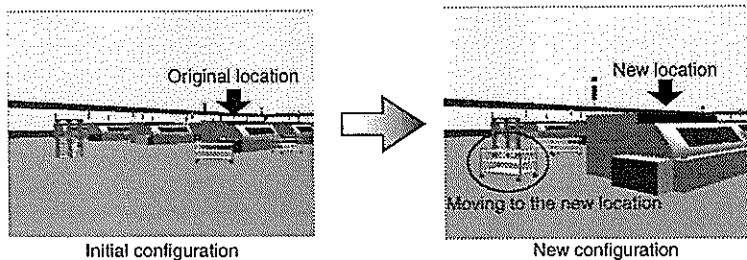


図5 生産機械の配置変更に対する搬送車の適応的挙動の例