

学位論文題名

# Evolving Dynamics for Emergent Systems Engineering

(創発的システム工学のための進化するダイナミクス)

## 学位論文内容の要旨

近年、システム工学が扱う諸問題の多様化、複雑化に伴い、システム工学の方法論自体にも新たなパラダイムの模索が為されつつある。それは、昨今の急速なコンピュータハードウェアの進歩により、実践的解析が可能になった複雑系への挑戦である。複雑系とは、中規模の数の要素からなり、その要素間の複雑な相互作用から発生する非線型性を本質的に備えているため、工学対象として見た場合、従来型の恒常性を主体としたシステム論に基づく最適化と制御、または統計的近似による全体のダイナミクスの予測が困難な系である。このような対象にアプローチすべく、現在、自律性、適応性を内包するシステム論に関する研究が遂行中である。これは、システム自体が環境として表現される対象領域に対して自身を適合させる複雑適応系としてのシステム論の展開であり、システムの作動に伴う創発ダイナミクスを重視することから創発的システム工学と呼ばれる。

創発的システム工学には、実環境で機能するロボットを実現することを目的としたハードウェア指向の研究領域と、コンピュータ上で動作する情報処理システム構築に関するソフトウェア指向の領域があるが、本論文では後者の創発的情報処理システムの分野を扱う。この研究分野には、遺伝的アルゴリズムを始めとする進化的計算理論、自己組織化や学習に関する理論、自律分散性を主眼とするマルチエージェント系に関する理論等の研究が行われている。いずれの場合についても、コンピュータ上でのシミュレーションを基礎とする工学体系であり、それぞれについてまず対象問題がコンピュータに表現可能な形にモデル化される。しかし、このモデル化という行程には少なからず設計者の主観、恣意性が伴い、システムの機能が決定される。結果として、それらのモデルから得られる創發現象は個々の情報処理モデルについて限定され、設計者が予め与えた以外の機能を後から獲得する創発的機能創成システムの実現は不可能である。

本論文は、このような現状の創発的システム工学における問題点を明らかにし、情報処理機構自体が進化的に獲得されるダイナミクスを有する創発的システム論を展開するものである。そこで、自己創発的情報処理システムのモデルとして、複雑系に内在する諸性質から新たにプロテアンモデリングという概念を提出する。これにより、これまで個別に行われてきた創発的情報処理モデルを抽象レベルで統合することが可能であり、新たに創発システムをモデル化する際の指針を与えることができる。本論文では、まず、プロテアンモデリングにおける情報処理機構の進化ダイナミクスについて議論している。さらに、このプロテアンモデルから、創発システムが具備すべき進化ダイナミクスを実例化し、個々の進化ダイナミクスについて議論を行い、具体的な工学問題への応用を示している。本論文は5章より構成されており、以下にその概略を示す。

第1章では、序論として本論文の研究背景、目的について論じ、創発システムのプロテアンモデル設計のための指針を導いている。そこではまず、システム工学の概要とその総合的方法論であるシミュレーションという概念について説明している。次に、事象のモデル化という行程について考慮す

べき点を考察し、その万能な実現手段であるコンピュータの原理と普遍性、背後にある意味を述べている。さらに、複雑系という視点からその歴史的背景とこれまでの理論的、実践的研究についてまとめ、後のプロテアンモデリングに必要な複雑系の本質的要素として、「複数のシステム構成要素」、「相互作用としてのゲーム環境」、「環境という制約条件」を挙げている。そして、創発的システム工学の立場から複雑適応系を取り上げ、その主たる方法論である創発的計算理論の重要な概念と実例を紹介し、抽象レベルでの一般化を行っている。最後に、これらをもとに既存の方法論の問題点を議論している。

第2章では、プロテアンモデリングの定式化を行い、その進化ダイナミクスをシミュレーションにより示している。ここでは、創発する情報処理機構を実現するために万能チューリングマシン(UTM)を取り上げている。第1章で述べられているように、UTMはあらゆるコンピュータ上で実行でき得る情報処理、言い換えればあらゆるコンピュータプログラムを実現できる仮想機械であり、このUTMを基に複雑適応系を構築する。すなわちそれは、複雑系に本質的な要素のプロテアンモデルとして、「UTMのテープとしてのシステム要素の表現系」、「UTM上で実行される要素に依存した相互作用系」、及び「要素間の競合から制約条件をもたらす複雑系」という自己言及的な入れ子構造を持つモデリングである。これら3要素の一つ一つをインスタンスとして具体化すると、既存の創発的計算理論に相当するような抽象性が本論文で提出するプロテアンモデルの特徴である。本章では、コンピュータシミュレーションによって、この抽象モデル自身が自動的に作動する内部ダイナミクスを持っていること、それは多様化と自己組織化をもたらす自己創出ダイナミクスと考えられること、そして、UTMの記述に基づいていることからあらゆる情報処理システムに応用可能な点について議論している。最後に、プロテアンモデルの各要素を具体的にインスタンス化することにより創発的システムが具備すべき進化するダイナミクスの詳細な議論と工学問題への応用を図る第3章以降の導入を述べている。

第3章では、自己言及的な作動によりシステムの機能がロックインするダイナミクスと言う視点から、ハイパーサイクルを取り上げている。ハイパーサイクル理論は、元来、細胞前段階進化を集団遺伝学の立場からマクロに扱った理論であるが、自己組織を主眼とした計算理論には必須のダイナミクスを提供する。本章では、ミクロに各要素をインスタンス化することで各相互作用からハイパーサイクルが形成されることをシミュレーションによって示し、動的に変化するフィットネスランドスケープから生まれる競合的進化ダイナミクスについて議論している。

第4章では、創発システムは実物理系に内在する現象を取り込んで実現されるべきと言う視点から、物理系をインスタンス化した創発的計算モデルを提案し、そのようなモデルに基づくシステムの意義について議論している。また、コンピュータシミュレーションでは、異なる環境下でのシステムのマクロな統計的振る舞いとミクロな反応経路を示し、ある特殊な条件によってハイパーサイクルの創発が観測されることを述べている。これは、外部からのエネルギーを内部の進化ダイナミクスに変換するネットワークである。さらに、物理系に内在する現象の一例としてポテンシャル場を導入し、表現型、遺伝子型それぞれの自己組織化を通じての相互型集合的ダイナミクスによって多様なアトラクターが共存できることを示している。

第5章では、自己適応型の創発システムを最適化問題へと応用している。時系列要素を含む最適化問題に関しては、時系列の変化に伴い問題空間のランドスケープが変わるため、システム自体が自己適応のための内部評価関数を自律的に獲得する必要がある。ここでは、ラマルク型の自己適応メカニズムによってプロテアンモデルの要素を記述し、さらに遺伝的監視理論という概念をもとにした創発的制約条件によって進化ダイナミクスを制御するシステムを構築している。また、シミュレーションにより、いくつかの最適化問題においてその性能を評価している。

第6章では、本論文の結論として得られた結果を総括している。

# 学位論文審査の要旨

主査	教授	嘉数	侑昇
副査	教授	大内	東
副査	教授	宮本	衛市
副査	教授	和田	充雄

学位論文題名

## Evolving Dynamics for Emergent Systems Engineering

(創発的システム工学のための進化するダイナミクス)

近年、システム工学が扱う諸問題の多様化、複雑化に伴い、たとえば自律性、適応性を内包するシステムに関する研究、とくに複雑適応系としてシステムの作動に伴う創発ダイナミクスを重視する創発的システム工学などを含むシステム工学の新たなパラダイムが模索されている。創発的システム工学では、遺伝的アルゴリズムを始めとする進化的計算理論、自己組織化や学習に関する理論、自律分散性を主眼とするマルチエージェント系に関する理論等の研究が行われているが、コンピュータ上でのシミュレーションを基礎とする工学体系であり、対象問題はコンピュータに表現可能な形にモデル化されることが要求される。しかし、このモデル化という行程を通じて対象の持つダイナミクス、あるいは機能が決定論的に導入される。結果として、それらのモデルから得られる創発現象は個々の情報処理モデルについて限定され、設計者が予め与えた以外の機能をシステムは創発的に獲得不可能となる。さらなる創発システムの展開のためにはこれらシステムダイナミクスや機能をも創発的に創成可能な理論開発が待たれているのが現状である。

本論文は、現状の創発的システム工学における根本的な解決すべき課題を明らかにしたうえで、結果として情報処理機構自体が進化的に獲得するダイナミクスを有する創発的システム論・プロテアンモデリングを展開し、種々の実験と議論を通して展開した理論の妥当性を検証した成果をまとめたものである。以下に本研究で得られた評価すべき5つの成果を概略する。

第1に、創発的システム工学の立場から複雑適応系を取り上げ、その主たる方法論である創発的計算理論の重要な概念と実例を通して、複数のシステム構成要素、相互作用としてのゲーム環境、環境という制約条件の3つの切り口から抽象レベルでの創発ダイナミクスの一般化を行い、これらをもとに分野に内在する根本的課題を明かにしている。

第2に、情報処理機構自体がそのダイナミクスを進化的に獲得可能な創発的システム論・プロテアンモデリングを提案し、その理論展開を図り形式論的展開を行なっている。さらに展開した理論に基づく進化ダイナミクスをシミュレーションにより示している。また、プロテアンモデリングの基本概念を構成するために万能チューリングマシン(UTM)を取り上げ、UTMを基に複雑適応系を構築する場合、たとえば複雑系に本質的な要素の

プロテアンモデルとして、UTMのテーブとしてのシステム要素の表現系、UTM上で実行される要素に依存した相互作用系、及び要素間の競合から制約条件をもたらす複雑系という自己言及的な入れ子構造を構築し、これら3要素の一つ一つをインスタンスとして具体化するとともに、既存の種々の創発的計算理論をも内包可能であることを示している。

第3に、プロテアンモデリングの具体的適用例として、自己言及的な作動によりシステムの機能がロックインするダイナミクスの代表として、ハイパーサイクルを取り上げている。ミクロに各要素をインスタンス化することで各相互作用からマクロであるハイパーサイクルが形成されることをシミュレーションによって示し、動的に変化するフィットネスランドスケープから生まれる競合的進化ダイナミクスについて議論している。

第4に、創発システムの物理系でのインスタンスとしてアトモイドと呼ばれる創発的計算モデルを開発し、コンピュータシミュレーションでは、異なる環境下でのシステムのマクロな統計的振る舞いとミクロな反応経路を示し、ある特殊な条件によってハイパーサイクルの創発が観測されることや、相互型集合的ダイナミクスによって多様なアトラクターが共存できることを明かにしている。

第5に、自己適応型の創発システムを最適化問題へと応用として、ラマルク型の自己適応メカニズムによってプロテアンモデルの要素を記述し、さらに遺伝的監視理論をもとにした創発的制約条件によって進化ダイナミクスを制御するシステムを構築し、数値実験によりその有用性を検証している。

これを要するに、著者は情報処理機構自体が進化的に獲得するダイナミクスを有する創発的システム論・プロテアンモデリングを展開し、種々の実験と議論を通して展開した理論の妥当性を検証し、創発的システム論、進化的計算論の展開に新知見を得たものであり、システム工学、情報工学に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。