問題解決のための階層型自律分散システムの構成†

増 市 博*・片 井 修**・榎 木 哲 夫**
西 山 高 史***・岩 井 壮 介**

A Multi-Layered Autonomous Decentralized System Architecture for Problem Solving

Hiroshi MASUICHI*, Osamu KATAI**, Tetsuo SAWARAGI**,
Takashi NISHIYAMA*** and Sosuke IWAI**

This paper introduces a novel approach of problem solving based on Autonomous Decentralized System framework, where an Autonomous Decentralized System consists of autonomous subsystems whose cooperation yields the structuredness (order) of the entire system without any control by supervisor. Thus the system is expected to have high efficiency, reliability and flexibility. We propose a general framework for Autonomous Decentralized Systems. By the use of "slaving principle", the central concept in Synergetics introduced by Haken, the proposed system forms its order without central control by supervisor. Moreover, the concepts of layered structure, "the dual control" and "the principle of marginal control" make it possible for the proposed system to realize the compatibility between "autonomy" and "cooperation", that is the most difficult point to be attained in Autonomous Decentralized Systems. Also, we implement concrete systems for solving several different kinds of problems on Transputers using the parallel processing language OCCAM, which show the effectiveness of our approach.

Key Words: autonomous decentralized system, slaving principle, problem solving, dual control, the principle of marginal control

1. はじめに

近年の半導体技術や通信技術の著しい発展を背景に、いわゆる並列あるいは分散型のシステム構成概念に基づいた問題解決に関する研究が多くなされている。しかし、このような分散・並列化されたシステムの多くは、システム全体の目標を明確化した上で部分にその機能を割り当てるといった考え方に基づいて設計されている。つまりシステムに固定的に与えられた全体目標を達成するためにシステムをいくつかのサブシステムに分割し、その後サブシステムの機能・構造を決定する。このようにトッ

ブダウン的に設計されたシステムでは、一般に多様に変化する目標・環境に適応することが困難となる。これに対し、自律分散システムはまったく新しいシステム構成概念として最近注目を集めている¹⁾。これは、まず“自律”したサブシステムが存在し、それらの“協調”の結果として秩序だった全体システムが構成されるという考え方に基づいている。この特徴に由来して、高効率性、信頼性、耐故障性、拡張性、柔軟性などの効能が期待されている²⁾。しかし、現在のところ概念だけが先行し、定義も曖昧で、具体的システム構築例は少数に留まっている。

このように自律分散システムの考え方が普及していない原因として、各サブシステムの“自律性”とこれらの間の“協調性”の共存の困難さが挙げられる³⁾。自律は全体の拘束から離れ個々の責任において自由に振る舞うことを意味し、協調は逆に自己を抑え全体の目標に協力することを意味する。自律分散システムでは、この相反する二つの概念を共存させなければならない。

本研究では秩序だった全体システムを自己組織的に生成するための枠組みとして、H. Haken の Synergetics

† 第13回知能システムシンポジウムで発表 (1991・3)

* 富士ゼロックス(株) 横浜市保土谷区神戸町134

** 京都大学工学部 京都市左京区吉田本町

*** 松下電工(株) 門真市大字門真1048

* Fuji Xerox Co. Ltd., Yokohama

** Faculty of Engineering, Kyoto University, Kyoto

*** Matsushita Electric Works, Ltd., Kadoma

(Received February 12, 1992)

(Revised May 20, 1992)

における中心概念であるスレービング原理⁴⁾を導入し、自律分散システムの構成概念を提案する。さらに、“自律”と“協調”の共存を可能とし、実際にスレービング原理を成立させて秩序形成を達成するために必要な概念として、自律分散システムの典型例ともいえる生物界についての考察をもとに、システムの階層構造化および二重制御 (dual control) とそれを支える周縁制御の原理 (the principle of marginal control)⁵⁾を導入する。

さらに本研究では、問題解決一般に潜む以下の二重性に着目することにより、自律分散システムを問題解決システムと考える。すなわち、部分問題の解が満たすべき制約条件のもと局在性(局所的整合性)とこれら解(局所解)の集合が全体として満たすべき整合性(大局的整合性)という二つの側面から問題解決を捉え、これを部分問題を解くサブシステムの局所的な自律性とシステム全体の協調性に対応させることにより、自律分散型問題解決システムの構成原理とその具体的構築を検討する。

以下第2章において、本問題解決システムの構成原理の提案を行う。第3章では提案システムにおける秩序形成の中心概念であるスレービング原理について概説する。また、秩序形成の際の“自律”と“協調”の共存の実現に不可欠な要素であるシステムの階層性、二重制御、周縁制御の原理などの諸概念を説明し、これらと提案システムとの関係を明らかにする。第4章ではとくに、制約条件の局在性と局所解の集合が満たすべき整合性という二重性をもつ問題範疇として制約充足問題と多自由度制御問題を取り上げ、提案した構成原理をそれぞれ具体的問題に適用し、問題解決システムの構築を行い、その有効性を検討する。構築システムはすべて並列処理言語OCCAM⁶⁾によってトランスペュータ上に実現されている。

2. 自律分散型問題解決システムの構成原理の提案

本研究では、Fig. 1(a)のような二層構造をもつ自律分散システム構成を提案する。図中の丸印は、すべて非同期並行的に計算を実行するプログラムプロセスを表わし、プログラムプロセス間を結ぶ線分は、情報伝達を受けもつ通信チャンネルを示す。プログラムプロセスは2種存在し、それぞれをマイクロダイナミクスプロセス(micro dynamics process)、マクロオーダープロセス (macro order process)と呼ぶ。マイクロダイナミクスプロセスとマクロオーダープロセスはシステム中に同数存在し、それぞれ一対一に対応づけられている。この対応する二つのプロセスのペアを自律分散ユニット (autonomous decentralized unit: ADU)と呼ぶ。各自律分散ユニットはそれ自身自律的な“全体”としての側面とユニット群全体に対して協調的に動作する“部分”としての側面を合わせもつものである^(注1)。自律分散ユニットの、マイクロダイナミクスプロセスが自律的側面、マクロオーダープロセスが協調的側面の役割を果たす。本提案システムは、通信チャンネルによって結合された多数の自律分散ユニットが一つの平面上に並んだ単階層構造を形成しているとみることでもできる (Fig. 1(b))。なお、マクロオーダープロセスの並ぶ平面をマクロオーダーレイヤ (macro order layer)、マイクロダイナミクスプロセスの並ぶ平面をマイクロダイナミクスレイヤ (micro dynamics layer)と呼ぶ。

(注1) A. Koestler はこのような二側面をもつシステム構成要素を“ホロン”と命名した。しかし、ホロンの場合、これらがホラーキー階層構造をなすことを前提としており、ここでのシステム構成原理とはかなり異なることから、ここでは“自律分散ユニット”と呼ぶことにした。

Fig. 1 Structure of the proposed system and the illustration of Slaving Principle

これら 2 種のプログラムプロセスは以下のように動作する。すなわち、マクロオーダープロセスは各自律分散ユニットの内部状態を保持する機能を持ち、一種の分散型共有メモリとなっている。これに対してマイクロダイナミクスプロセスはマクロオーダープロセスが保持する内部状態を変更する機能をもつ。ここで、内部状態変更を実行するアルゴリズムは

- (1) 自己触媒性
- (2) 全体目標指向性

の二つの性質を満足していなければならない。自己触媒性とは、システム全体のマクロ秩序に関して、各自律分散ユニットが自己の内部状態をこの秩序を強めるよう変更する性質で、全体目標指向性とはこの秩序形成がシステム全体の目標達成をも指向するように、内部状態変化してゆく(ユニット動作に関する)性質である。一般に、秩序を形成することのみに注目すれば自己触媒性だけが重要となるが、問題解決の観点からみれば秩序の指向性と問題解決の指向性とは一致していなければならない。これに対応するものが全体目標指向性である。これらについては第 3 章および第 4 章で触れる。

Fig. 2 に、一つの自律分散ユニットに注目した場合のマイクロダイナミクスプロセス、マクロオーダープロセス

Fig. 2 Functions of Micro Dynamics and Macro Order Processes

の働きを図示する。一つのマイクロダイナミクスプロセスは、自分自身に対応するマクロオーダープロセスと、隣接するマイクロダイナミクスプロセスに対応するマクロオーダープロセスとにアクセスし、それらの内部状態を受けとる。これら内部状態から、自己触媒性と全体目標指向性をあわせもつ状態遷移則に基づいて、次期の自己および隣接する自律分散ユニットの内部状態を決定する。決定された内部状態は、再びもとの各マクロオーダープロセスへと返される。

つぎに、各平面の役割を説明する。マイクロダイナミクスレイヤでは、各マイクロダイナミクスプロセスの自律的な内部状態変更機能により自律分散ユニットの局所的かつ部分としてのマイクロダイナミクスの側面が実現される。マクロオーダーレイヤでは、マクロオーダープロセス間の協調関係によってシステム全体のマクロな秩序の形成の側面が実現される(Fig. 1(c))。提案システムではマイクロダイナミクスプロセスとマクロオーダープロセスはすべて非同期並行的に動作する。まず、各マイクロダイナミクスプロセスが自律的に計算を始める。各マイクロダイナミクスプロセスは、隣接する自律分散ユニットの内部状態の影響を受けながら、自己触媒性と全体目標指向性をあわせもつアルゴリズムに従って動作し、その結果、マクロオーダーレイヤには一定の関係性(マクロな秩序)が発現する。その後、各マイクロダイナミクスプロセスは、自分自身の作り出したマクロな秩序に従う形で計算を続け秩序の形成がさらに進行する。このマイクロダイナミクスレイヤにおけるマイクロダイナミクスとマクロオーダーレイヤにおけるマクロな秩序の間のフィードバックループを形成したやりとりによって、統一管理機構の存在なしに、システム全体の秩序形成と問題解決が可能となる。

3. 提案システムにおけるマクロ秩序形成原理

3.1 自己組織化現象とスレイビング原理

提案システムにおけるマイクロダイナミクスとマクロな秩序の間のやりとり(フィードバックループ)によって秩序が徐々に形成されていく様子は自然界の秩序形成の際にも見受けられる。これについては、自己組織化現象に関する学問である H. Haken による Synergetics の中でスレイビング原理(隸従化原理、隸属原理)として詳しい研究がなされている⁴⁾。

Synergetics は物理現象のみならず経済、社会システムにわたる幅広い範囲の自己組織化現象を統一的に扱う学問分野であり、そこでの核心はスレイビング原理によってシステムの振る舞いを説明づけることである。

Haken は自己組織化現象の簡単な例として、レーザを

取り上げている。レーザ管の中でポンピングと呼ばれる操作によって励起状態に置かれた原子は、もとの基底状態に戻る際に誘導放出によって光を放出する。この場合、外からの光と同じ位相の光が放出される。ポンピングによって与えるエネルギーが大きくなると、励起状態の原子の密度の高い不安定構造となり、誘導放出が連鎖的におこり、原子の状態変化が協同的に進行する。その結果、レーザ管の両端にとりつけられたミラーの働きで、レーザ管の軸方向にレーザ光(マクロな秩序)が発生する。このとき、誘導放出の働きで、原子のミクロな運動が、マクロな秩序であるレーザ光に同調することになる。この誘導放出は、マクロな秩序に自己のミクロダイナミクスを同調させる性質による、すなわち原子の運動のもつ自己触媒性に基づくものと解釈される。

位相のそろった光の波というマクロな秩序は多数の原子の内部運動というミクロダイナミクスから構成されている。またその一方で、ミクロダイナミクスはマクロな秩序に隷従している。つまりマクロな秩序とミクロダイナミクスの間にフィードバックループが存在する(Fig. 1(c))。Haken は秩序形成に関してこのような隷従化現象が起きているときにスレイビング原理が成立しているといい、またこのスレイビング原理はレーザばかりでなく自己組織化現象一般に成立するものと主張している。

3.2 生物界の階層構造と二重制御

提案システムでは、スレイビング原理に示される構造をシステム内に実現し、秩序の自己組織的形成を行うことが基本的な構成原理である。しかしながら、前節で述べた自己触媒性をもつ自律分散ユニットを多数非同期並行的に動作させるだけでは秩序形成が常に生じるとは限らない。レーザの例では、たとえばレーザ管両端のミラー間距離によって秩序生成の有無が制御される。すなわち、ミラー間距離が適切なときにのみレーザ光が発生する。ここで重要なことはミラー間距離という単一の(マクロな)変数の操作によって多数の原子のミクロダイナミクスを一括して制御できることである。

本節では、現実には低次元機能しかもたない構成要素が集合することによってより高次の秩序を形成する生物界についての考察を行い、システム中でスレイビング原理に従う秩序形成を進行させるために必要となる諸概念を示す。これはまた、自律分散システムの構築を困難にしている“自律”と“協調”の共存を可能とする概念でもある。

生物界を自律分散システムとして捉えるとき、最も重要なものはそのシステム構造のもつ階層性である。動物を例に階層性をみると Fig. 3 のようになる。図中、丸で囲んだ構成要素は各階層での自律分散ユニットに相当するものである。ここでの層別化は、いずれの階層の設定

Fig. 3 Layered system structure of creatures

も、直上の階層が下位の階層にはないグローバル(大局的・総体的)な性質をもつ自律分散ユニットが生成されていることを基準に行われている。このグローバルな性質をもつ自律分散ユニットの生成を秩序形成であると考えれば、この多階層構造において一對とみた隣接する各二階層はおののが(生物界全体の中に位置づけられた一つの)自律分散システムを構成していると考えることができる。

このように一つの二階層のみに注目して自律分散システムのモデル化を行ったものが本提案システムである。すなわち、二階層の上位階層は、下位階層の構成要素の集合の仕方(秩序の形態)を表現したものであり、提案システムのミクロダイナミクスレイヤが下位階層に、マクロオーダーレイヤが上位階層に対応する。すでに述べたように、各自律分散ユニットのミクロダイナミクスの側面を実現するものがミクロダイナミクスレイヤであり、全体システムとしてのマクロな秩序の側面を実現するのがマクロオーダーレイヤである。

生物界の階層構造を支える統御原理として注目すべきことは、各階層それぞれが、下位の階層を構成する諸要素を支配する法則と、自分自身の階層の諸要素そのものに対して成り立つ法則に同時に制御されているということである。これは二重制御(dual control)と呼ばれる⁹⁾。たとえば、動物の個体はその構成要素である器官を支配する法則によって制御される。すなわち動物は構成要素である各種器官のもつ機能の働きからのがれることはない。それと同時に、個体はその個体自身を支配する法則にも制御される。つまり、個体はその個体自身の行うことのできる行動や精神活動の枠を越えることはできな

い、このようにして個体は二重制御を受けることになる。また、動物の種(個体の集団)は、構成要素である個体が行う行動や精神活動からはのがれることはできず、かつその種に備わる特有の行動の型に逆らうこともできない。つまり二重制御を受けている。このように、すべての階層はそれぞれ二重制御を受けていると考えられる。

このような各階層が受ける二重制御は、**周縁制御の原理**に従っている⁵⁾。つまり、下位の階層は、自身の諸構成要素を支配する法則に従う。一方、上位の階層の組織原理は、下位の階層に位置する自律分散ユニット間の**境界条件(boundary condition)**を決定する。ここで境界条件とは、下位の階層では確定されないままになっている諸条件のことである。たとえば、動物の個体の階層を上位、器官の階層を下位とする二階層を考えれば、筋肉その他の諸器官の機能は個体の運動が成り立ち得る可能性を開いており、そのように確定されぬまま残されている境界条件を個体の運動の組織原理(精神活動)が決定する。

3.3 提案システムにおける二重制御の実現

本研究では、前節で述べた二重制御および周縁制御の原理の概念を自律分散システムに導入することにより、スレイビング原理に従う秩序形成を制御し、また“**自律**”と“**協調**”の共存を可能にする。すなわち、システムの各構成要素(自律分散ユニット)は下位の階層を支配する法則に制御されてそれぞれ**自律的**に振る舞い、かつこの法則の制御によっては確定されない境界条件が上位の階層を支配する法則によって制御されることによって**協調的**に秩序の形成を行うことになる。

再びレーザの例(原子の階層が下位、レーザ光の階層が上位)を考えると、レーザ光は各原子の誘導放出という下位の階層を支配する法則に制御される。一方、その振る舞いは、レーザ管両端のミラー間距離によって上位の階層にも制御される(二重制御)。そして、原子の階層の支配法則だけでは確定されぬままになっている各原子の振る舞いをミラー間距離の調整によって協調的に決定することができる(周縁制御の原理)。

提案システムにおいては、生成される秩序を制御する下の階層(マイクロダイナミクスレイヤ)の法則は、非同期並行して動作するマイクロダイナミクスプロセス内プログラムのアルゴリズムで規定される。一方、上位の階層(マクロオーダーレイヤ)を支配する法則は、マクロオーダーレイヤに発現する秩序(自律分散ユニットの関係性)を制御する各マイクロダイナミクスプロセス内プログラムに共通する各種パラメータにより与えられる。この共通パラメータを操作することによって、マイクロダイナミクスプロセス内の自律的アルゴリズムに矛盾することなく、自律分散ユニット間の協調的関係性を調整し周縁制御を行

うことができ、マクロオーダーレイヤへの秩序形成が可能となる。このとき、レーザの場合と同様に、たとえばマイクロダイナミクスプロセス内プログラムの実行速度を規定するパラメータのような単一の変数の操作により多数の自律分散ユニットのマイクロダイナミクスを一括して制御することが可能となる。

以上の方法により、提案システムでは“**自律**”と“**協調**”の共存が実現可能となり、比較的単純な機能をもつ構成要素である自律分散ユニットからマクロな秩序が生成され、より複雑かつ柔軟なシステム機能が実現される。

4. 並列処理言語による提案システムの具体的構築

第1章でも述べたように、本研究では部分問題の解(局所解)が満たすべき制約条件の(ミクロな)局在性とこれら解が満たすべきマクロな整合性という二つの側面から問題解決を捉え直し、これを自律分散ユニットのもつ**自律性**とシステム全体が達成する**協調性**に対応させることにより、自律分散システムを問題解決に適用する。本章では、提案システムのもつ特徴を生かした問題解決の対象として制約充足問題と多自由度制御問題を取り上げる。構築したシステムはすべて並列処理言語 OCCAM[®]によってトランスピュータ上に実現されている。

4.1 制約充足問題に対する構築例

ここで制約充足問題とは、複数の構成要素からなる対象に対する解釈、解析、設計などを、付随する制約を充足する解を求める問題として捉えたもので、各構成要素には局所的制約条件が課せられ、さらに対象物全体にも何らかの全体的整合性、最適性が求められる問題である。

提案システムの特徴は、マイクロダイナミクスレイヤ上のマイクロダイナミクスプロセスの自律的問題解決機能とマクロオーダーレイヤ上での秩序の生成であり、この特徴を損なうことなく制約充足問題への適用を行う。つまり、制約充足問題の各構成要素(ユニット)を自律分散ユニットとし、局所的制約条件を満たすことを目的として自律的に振る舞う機能をもたせ、マクロオーダーレイヤ上に全体的整合性(秩序)を実現させることを考える。

制約充足問題の代表例に**整合ラベリング問題(Consistent Labeling Problem: CLP)**がある。これは、複数存在するユニットそれぞれに、ユニット間の制約(拘束関係)を満たすようラベル付けを行う問題である。すなわち、ユニットの集合、候補ラベルの集合、ユニットの多項組(ユニット組)の集合、さらに各ユニット組に対してラベル付け可能なラベルの多項組の候補(ラベル拘束関係)の集合が与えられ、すべてのラベル拘束関係を満たすようなラベル付けを各ユニットに対して行う問題である。この整合ラベリング問題は制約充足問題の中でもと

Fig. 4 An example of 2-tuple CLP with preference structure

くに、明確な定義が与えられ多くの研究がなされている⁷⁾。

ここでは、ラベル順序付きの2次の同次整合ラベリング問題を取り上げる。Fig. 4にその例題を示す。ラベル付けが行われる六つのユニットは丸印で表現され、それぞれに1から5の整数で表わされたラベル候補がその選好度(選好順位)の順に上から並べられている。ここでの選好度とは各ラベル候補に与えられた整数値であって図中に並べられたラベル群の上から順に選好度1, 2, ..., 5とする。リンクで結合されたユニット(ユニット組)間には制約条件(ラベル拘束関係)が課され、(a, b)の形式で示されている(両端の一方のユニットにはラベルaが、他方にはラベルbが貼られていれば、この拘束は充足されるとみなされる)。目的は、すべての制約条件を満たし、かつラベルの選好度の合計が最小となるようなラベル付けを行うことである。

ここでは、六つのユニットをそれぞれ自律分散ユニットと考える。マクロオーダープロセスに保持される自律分散ユニットの内部状態として、各ユニットに対し、五つのラベルそれぞれに確信値を導入する。つまり、各マクロオーダープロセスにそれぞれ五つの確信値が保持されることになる。ここでの確信値とは、自律分散ユニットがラベル候補中から自身のラベルを選択する際の選択の有望度を表わす整数値であって、その値が大きいほど有望であることを表わす(五つのラベル候補の中で最大の確信値をもつラベルをその時点でのユニットの代表ラベルとする)。また、マイクロダイナミクスプロセスは、各ユニットに対応するラベル拘束関係を参照しながら、確信値の変更を行うアルゴリズムによって動作する。

Fig. 5 Program structure for the 2-tuple CLP

マイクロダイナミクスは、各マイクロダイナミクスプロセスが行う確信値の変更操作に対応する。また、マクロな秩序の形成は確信値の分布パターンとして出現する。確信値間の関係が秩序となり、その全体的パターンが問題の解答を与える。

プログラムの実行過程では、まず各マイクロダイナミクスプロセスがラベル拘束関係にしたがって一斉にそれぞれの確信値の変更操作を始める。問題の解答を得ようとする全体目標指向性をもつ各マイクロダイナミクスプロセスの働きによって、マクロオーダープロセスに保持された確信値の間に局所的に拘束を満たす関係が生まれる。その後は、各マイクロダイナミクスプロセスがその関係に支配されながら計算を続けることにより、しだいに秩序が形成され、スレービング原理が実現される。

Fig. 5にプログラム構造を示す。各マイクロダイナミクスプロセスはすべて等しいプログラムプロセスで、マクロオーダープロセスもすべて同一である。例題では、すべてのユニットはほかの三つのユニットと制約(拘束)関係をもっている(Fig. 4において各ユニットはほかの三つのユニットとリンクで結合されている)。したがって各プロセスは、自分自身に対応するプロセスを含めて、合計4個のプロセスと通信可能になっている。

Fig. 6に、一つの自律分散ユニット x が x と制約関係をもつ自律分散ユニット y との間で確信値変更を行うアルゴリズムを示す。 x, y それぞれの変更アルゴリズム適用時点での代表ラベル(最大確信値をもつラベル)をそれぞれ L_x, L_y とする。 L_x と L_y が x と y の間に課された制約を満たせば、両代表ラベルに対する確信値 $w(x, L_x)$ ならびに $w(y, L_y)$ に、それぞれ両代表ラベルの選好

Fig. 6 The Micro Dynamics Process algorithm for the CLP

度 $\text{Pref}(x, L_x)$, $\text{Pref}(y, L_y)$ を関数 I に代入した値 $I(\text{Pref}(x, L_x))$, $I(\text{Pref}(y, L_y))$ を加える。もし制約を満たさなければ関数 J に代入した値を減ずる。ここで、 I, J は選好度を引数とする関数で、定義域 $\{1, 2, 3, 4, 5\}$ に対して正の整数を返す。 I は単調減少、 J は単調増加の関数である。すなわち、その時点での代表ラベルのペアが制約を満たしていれば選好度の高いラベルほど確信値の増加が大きく、制約を満たしていなければ選好度の低いラベルほど確信値の減少が大きくなるように設定されている。これは、なるべく選好度の高いラベルを採用するという全体目標指向性の実現のためである。さらに、制約を満たしていれば確信値を上げ、満たしていなければ下げるという操作は、やはり問題を解くという全体目標指向性を表わすものである。またこのアルゴリズムでは、あるユニットの代表ラベルの確信値が大きくなり変更がなくなると、隣接するユニットの代表ラベルはその固定された代表ラベルに対応した制約を満たすものに変更されていくことになる。この性質は、自己触媒性の実現を意味している。実際のプログラムでは、このアルゴリズムを自分のユニットと制約関係をもつすべてのユニットに対して繰り返し適用している。

Fig. 7(a) は、最終的に得られた結果である。網のかかった部分が選択されたラベル(代表ラベル)と充足された制約を表わしている。9本のリンクそれぞれに課された制約がすべて充足されており、本例題における最適解

Fig. 7 The resultant state and the process of computation for the CLP

が得られている。Fig. 7(b)にシステムの計算実行過程を示す。細い線が各自律分散ユニットの代表ラベルの変遷過程を示している。また、太い実線がシステム全体で充足されている制約の数の時間推移を示しており、最終的に九つすべての制約を満たした状態に至っている。この図から、各ユニットの自律的振る舞いとその中からシステム全体の整合性が生成される様子がわかる。

本システムは一度のパラメータ設定で Fig. 4 と同形式の多くの問題設定に対して有効であったが、それと同時にシステム全体の挙動は、Fig. 6 のアルゴリズム中のパラメータ値 I, J を調整することによってさまざまに変化した。つまり、自律分散ユニット自体の機能を損なうことなく、その関係性を制御するパラメータの調整のみによって秩序形成の調節が可能であった。これは、ミクロダイナミクスプロセス内アルゴリズムによる制御のみでは確定されない境界条件をパラメータ調整によって制御するもので、**周縁制御の原理**が成立しており、多数の自律分散ユニットのミクロダイナミクスを単一の変数で制御することが可能となっている。

4.2 多自由度制御問題に対する構築例

ここで多自由度制御問題とは、多くの操作変量からなる大規模システムを、各変量を制御することにより、システム全体の整合性を保ちつつ動作させる問題である。

この種の問題では、各操作(変量)の自律性とシステム全体の整合性をともに考慮した上で制御を行う必要がある。提案システムを適用するためには、多自由度制御問題の各(操作変量への)操作をミクロダイナミクスプロセスと考え、自律的に動作する機能をもたせ、マクロオーダーレイヤに全体の整合性(秩序)を実現させるという方法が考えられる。

ここでは、例題として信号機群による交通制御問題を取り上げる。一本の道路に 20 個の信号機が設置されているものとする。信号機は青、黄、赤と点灯を繰り返す、青に点灯しているときのみ車両が通行できるものとする。ここで青、黄、赤の点灯継続時間はすべて等しいものとした。各信号機の点灯の周期は一定であり、車両の通行状況に応じてその位相を自律的に変化させ、車両の通行に対して制御を行うことができる。ただし、位相を調節するときに関し、青、黄、赤の点灯継続時間は等しくなくともよいとする。このような道路に対し、その左端から一定速度かつ等間隔で車両を流入させるものとする。この例題では、各信号機の自律的制御機能をミクロダイナミクスプロセスと考える。

信号機それぞれが車両に対して行う制御動作が、Fig. 1(c)でのミクロダイナミクスに相当する。各信号機は隣接する信号機から車両の流れを介して情報を受けとるこ

Fig. 8 Program structure for a traffic control problem

とになる。これに対してマクロな秩序は、車両の流れがつくる全体的パターンである。車両の流れが円滑なものになれば、その全体的パターンも秩序だったものになると考えられる。さらに、秩序だった車両の流れは、秩序だった信号機の点灯パターンとして反映される。

このようなミクロダイナミクスとしての各信号機の動作と、マクロな秩序としての車両の流れもしくは信号機の全体的点灯パターン、との間でフィードバックループが形成され、スレービング原理が成り立つ。各信号機が一斉に制御を始めると、車両の動き方に応じて、徐々に信号機群の点灯パターンに関係(秩序)が生じてくる。つぎに各信号機が、いったん生じた関係に支配される形でみずからの制御を行い、さらなる秩序を形成することになる。

Fig. 8 にシステム構成を示す。ミクロダイナミクスレイヤ中に丸印で示した各ミクロダイナミクスプロセスは信号の制御機能を規定したプログラムであり、マクロオーダーレイヤ中の丸印は車の動きをシミュレートしたもので、本例題ではこのプログラムがマクロオーダープロセスを構成することになる。ただし実際の信号制御に適用する場合には、マクロオーダープロセスにはミクロダイナミクスプロセスによって制御される現実の世界を対応させなければならない。

つぎに、一つのミクロダイナミクスプロセスの機能を説明する。この具体例では、すべてのミクロダイナミクスプロセスすなわち信号機は、全く同じプログラムでできており、Fig. 9 にその概念図を示す。各信号機にとって、車の停止を少なくするという観点から、車の到着するタイミングとして最も好ましいのは同図における丸印の瞬間である。すなわち、青が点灯している区間の丁度中央点である。ここでたとえば、Fig. 9 の上段の×印で車が到着したとする。この場合、黄が点灯している区間であるから、車両は当然つぎの青の点灯まで停止しなければならない。このとき信号は、つぎにも前回と同じ×印のタイミングで車両が到着した場合、青の点灯区間の丁

Fig. 9 Illustration of the Micro Dynamics Process algorithm for the traffic control problem

Fig. 10 Formation of the order in lighting patterns for the traffic control problem

度中心点に当たるように、点灯の位相をずらす操作を行う。すなわち、丸印に対応する時刻と×印に対応する時刻の差の分だけ、位相を調節する (Fig. 9 の下段)。

繰り返し述べているように、各マイクロダイナミクスプロセスの機能を設定する際に重要なことは、全体目標指向性と自己触媒性をあわせもたせることである。信号機のプログラムの場合は、位相をずらすことによって車の到着を青の点灯区間に合わせることは、信号での停止回数をなるべく減らすためのもので全体目標指向性をもつことに相当する。また、隣接する信号機の制御を受けた車の動きに自己の制御を合わせてゆくアルゴリズムでもあり、自己触媒性をもあわせもつものであることがわかる。

Fig. 10 にその実行結果の一例を示す。プログラムを実行した初期段階では、各信号機はランダムに点灯している (Fig. 10 (a) の上段)。その後、スレービング原理にしたがって各信号の点灯の間に関係ができ、最終的に秩序だったパターンとなる (Fig. 10 (a) の下段)。Fig. 10 (b) は秩序が形成された後の信号機群の挙動を示したもので、信号機間の点灯の関係に帯状の秩序パターンが見られる。このパターンは、主に車の速度に対応するパラメータを調節することによってさまざまに変化する。Fig. 11

Fig. 11 Relation of the total number of car-stoppings with the elapse of time and the car speed

は、信号機によって車輛が停止させられた回数の時間推移を示したものである。この値が小さいほど信号で停止する車輛は少なく、したがってシステム全体の秩序の程度もより高いといえ、時間の経過とともに秩序の達成されていく様子がわかる。また、一般に車輛の速度が小さいほど秩序の形成も遅れることがわかる。

この例では、信号の周期は一定である。したがって、

q: average number of car-stoppings in the total course
i: time interval of cars' starting

Fig. 12 Relation of the average number of car-stoppings and the time interval of cars' starting

車輛の左端への流入間隔によっては当然対応しきれない。Fig. 12は、車輛の流入間隔*i*と車輛の停止回数*q*の関係を示すものである。流入間隔*i*の値によっては秩序が生成されない(*q*の値が大となる)ことがわかる。このようにプログラム中のパラメータを調節することによって、秩序の出現の有無が決定される。これは、各マイクロダイナミクスプロセスの機能に矛盾することなく、秩序生成にかかわる周縁制御を行うもので、二重制御を実現していることを意味している。

6. む す び

本研究では、スレイビング原理に基づいて問題解決を行う自律分散システムの構成原理を提案し、いくつかの問題解決に即して具体的にシステム構築を行った。そこでは、自己触媒性、全体目標指向性、階層性、二重制御および周縁制御の原理が中心的概念であった。

提案システムは、“自律”と“協調”の共存が実現され、統一管理機構が存在せず、構成要素間の相互作用のみによって秩序が生成されるなど自律分散システムに要求されている特性が満足されており、第1章で述べたような様々な効能が期待できる。しかし、提案システムの適用例の問題設定が現在のところ特殊なため、性能比較に適当なほかのシステムが見当たらないことから、これら効能の定量的評価は難しいと考えられる。

本論文では自律分散システムに最低限必要であると考えられる二層構造のシステムについて述べたが、今後より一般的なものとしてマイクロダイナミクスレイヤとマクロオーダーレイヤを交互に重ねた多階層構造の構成概念の導入を検討している。二層構造のシステムではマクロオーダーレイヤに局所的な秩序が複数共存する現象(秩序のクラスタ化⁹⁾)がみられる。この局所的・断片的な秩序をより上位の階層における自律分散ユニットであると捉え多階層のシステム構築を行えば、生物界の階層構造

とのアナロジーがより強く、またさらに複雑な問題解決が可能なシステムの構築が可能になると考えられる。

最後に、有益なご指摘を賜りました校閲者の方に深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 特集：分散と協調、計測と制御、26-1 (1987)
- 2) 伊藤正美：自律分散システムはいかにして構成されるか、計測と制御、29-10, 877/881 (1990)
- 3) 長田正：自律分散システムと情報処理、計測と制御、29-10, 59/62 (1990)
- 4) H. ハーケン著、牧島邦夫、小森尚志訳：協同現象の数理：物理、生物、化学的系における自律形成、東海大学出版 (1980)
- 5) M. ポラニー著、佐藤敬三訳：暗黙知の次元、紀伊國屋書店、51/81 (1980)
- 6) Pountain, D. and May, D.: A Tutorial Introduction to Occam Programming, INMOS Limited (1987)
- 7) Haralick, R. M. and Shapiro, L. G.: The Consistent Labeling Problem Part I, IEEE Transactions on Pattern Analysis Machine Intelligence, PAMI-1-1, 173/184 (1979)
- 8) 清水、山口、矢野：自律分散制御の理論について、第7回自律分散システム研究会講演論文集、1/12 (1988)

[著 者 紹 介]

増 市 博 (正会員)

1989年、京都大学工学部精密工学科卒業。91年同大学院精密工学専攻修士課程修了。同年より富士ゼロックス(株)総合研究所システム技術研究所(現 システム・コミュニケーション研究所)入所、現在に至る。システム工学、知識情報処理、とくに協調計算の研究に従事。

片 井 修 (正会員)

(Vol. 28, No. 1 参照)

樫 木 哲 夫 (正会員)

(Vol. 28, No. 1 参照)

西 山 高 史 (正会員)

1986年、京都大学工学部精密工学科卒業。91年同博士課程単位取得退学。同年松下電工(株)インフォメーションシステムセンタ AI 研究室勤務。分散並列処理システム、ロボティクスに関する研究開発に従事。

岩 井 壮 介 (正会員)

(Vol. 28, No. 1 参照)