



入門講座

システム技術編- 3

新しいシステムパラダイム

—大規模・複雑系への招待—

田村坦之

大阪大学 大学院基礎工学研究科 教授

Hiroyuki Tamura

A New System Paradigm

—Invitation to Large-scale Complex Systems—

1 まえがき

鉄鋼業における需要の拡大、省力化への対応、環境・資源・エネルギーを配慮した次世代生産などに対処するためには、既存プロセスの有効活用、今後の新製鉄技術への対処など、いわゆる大規模・複雑系を対象にした生産・運用・物流計画の最適化が不可欠である。

最適計画の視点で現行システムを見たとき、個別プロセスの効率最適化は比較的実現しているものの、複数プロセスにわたる大規模系の一貫最適化、異常・故障及び緊急オーダー対応のための再スケジューリング、複数の評価項目に対する複雑性の取り扱いなどの点ではまだまだ不十分である。

一方、最近コンピュータ処理能力の飛躍的向上やダウンサイジングと軌を一にして、OR(オペレーションズ・リサーチ)をベースにしたシステムティック手法及び遺伝的アルゴリズムを始めとするヒューリスティック手法の実用化、多目的最適化、自律分散スケジューリング理論の出現など、最適化とスケジューリングの理論は著しく発展してきており、大規模・複雑な鉄鋼プロセスの生産計画、運用の最適化、定量的評価の実現などを期待できる状況になってきた。システムモデリングや最適化の種々の方法論については本講座の1¹⁾、2²⁾に紹介されている。

本講座では大規模・複雑系に対処するシステム方法論として、構造モデリング、ファジィモデリング、大規模数理計画法、多目的計画法、効用理論、自律分散システム論、複雑系と創発などについて、紙数の許される範囲で概説する。

2 構造モデリング^{3,4)}

構造モデリングの目的は、対象とするシステムが大規模

で複雑なため、それを構成している多数の要素あるいは問題(サブシステム)が互いにどのような結合をしているのか不明な場合に、それらの間に存在する何らかの関係を、コンピュータの助けを借りて(グラフ理論でいう)グラフとして陽に抽出することにある。構造モデルを抽出する代表的な手法としては、ISM、DEMATEL、関連樹木法、Cognitive Map、Cross Impact Matrix 法などがある³⁾。グラフとして得られた構造モデルは、対象の定性的なモデルで、対象とする問題の理解、問題構造の分析、問題解決案の創出などに使われる。

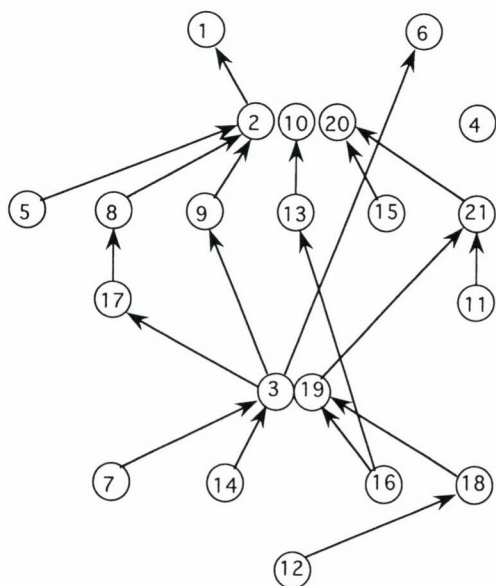
構造モデルを作成するための基礎理論はグラフ理論であるが、その高度な理論は必要なく、直感的に理解できる程度の入門的知識で充分間に合う。構造モデルは、その要素であるサブシステムを節点(点、頂点ともよぶ)とし、関係の有無を枝(線、辺、弧ともよぶ)とするグラフによって表現されることが多い。「関係」には、事象の因果関係、決定の順序関係、評価の優劣関係、先行関係、影響の多少など、対象のとらえかたによって千差万別である。

構造モデリングの概略のプロセスを示すと次のようになる⁴⁾。いま、構造モデルを抽出しようとするシステムは n 個の要素 $s_1, s_2, \dots, s_n$ から成る集合 S であるとする。要素 s_i と s_j の順序対を (s_i, s_j) と表す。集合 S に対して

$$S \times S = \{(s_i, s_j) : s_i, s_j \in S\}$$

を S の直積集合という。 S に属する2つの要素に関わる関係—これを2項関係(binary relation)という—が一つ規定されると、この関係を満たすような要素の順序対全体の集合 R が定まる。 S 上の2項関係 R は $S \times S$ の部分集合を意味し、 $R \subset S \times S$ と表せる。

$(s_i, s_j) \in R$ ならば「 s_i は s_j に対して R という関係にある」ことを意味し、 $s_i R s_j$ と書き表す。 $(s_i, s_j) \notin R$ ならば「 s_i は s_j に対して R という関係にない」ことを意味し、 $s_i \bar{R} s_j$ と書き表す。



1. 理論と実際のギャップが大きい
2. 事例研究が少ない
3. 産学共同が少ない
4. 高度成長時代の目標が喪失
5. ソフトに金を払いたがらない
6. 研究費が少ない
7. 国家的プロジェクトに参加する制御屋が少ない
8. 現代制御理論は抽象的で幅が狭い
9. 現実問題は複雑で理論を受け入れる下地ができていない
10. 理論へのニーズが発掘されていない
11. 学会のマンネリ化
12. 研究管理が不明確
13. 簡単な手法やハードウェアがない
14. 企業は問題を内部で処理したがる
15. 模倣が多く創造性に欠ける
16. 社会人教育の不備
17. カリキュラムの理論偏重
18. 論文数だけによる評価
19. 理論と実際の橋渡し役がいらない
20. 学術情報過多、産業情報過少
21. 経験の体系化の欠如

図1 構造モデルの一例

2 項関係 R の具体例としては

影響を及ぼす、優先する、勝れている、先行する、悪化させる

など、数多くのものが考えられる。このような2項関係について2つの要素項目間の一対比較(pairwise comparison)を、コンピュータと人間の対話によって繰り返す。この際、推移性(transitivity) ($s_i R s_j, s_j R s_k$ を満たすとき、 $s_i R s_k$ を満たすという性質)を仮定できるときには、すべての要素間の一対比較を行う必要はなく、推移性を用いて推論できる部分はコンピュータに推論させる。

一対比較を終えると、可到達行列と呼ばれる行列モデルに置き換わる。この行列モデルは、コンピュータの中でグラフ理論に基づいて分割および抽出の操作が施され、スケルトン行列と呼ばれる行列モデルに整理される。スケルトン

ン行列に基づいて、階層的な有向グラフが作図される。

構造モデルの一例を図1に示す。これは、「制御工学における理論と実際のギャップ」に関する問題解決を目的として構造分析を試みた結果を表している⁴⁾。

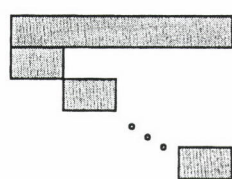
3 ファジィモデリング^{3,5)}

大規模システムを対象にして述べた構造モデルは、節点をサブシステムと考えるとサブシステム間の関係を2値論理として表した定性的モデルである。一方、物理系や工学系においては、複数のサブシステムあるいは要素間の関係を数式モデルという定量的モデルによって表現できる場合が多い。ファジィモデルは定性的な構造モデルと定量的な数式モデルの中間に位置するモデルで、そこではファジィ集合(fuzzy set)やファジィ論理(fuzzy logic)が用いられる⁵⁾。

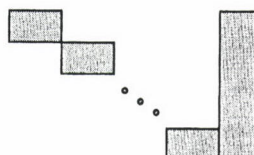
ファジィモデルとして最もよく用いられるのは、人間の持っている経験則や常識(これは自然言語によって定性的に表現される)を「もし〇〇ならば〇〇である」といった条件命題の形で表現して、ファジィ集合によって表現したものである。そもそもコンピュータは2 値的なものしか処理できないのに対して、人間の方はあいまいさの処理をたくみにやってのけるが、ファジィモデルはファジィ集合やファジィ論理を使って人間の自然言語の持っているあいまいさを数学的に扱うことができ、人間の優れた能力をコンピュータに代行させることができるという特徴を生かして様々な分野に応用されている^{3,5)}。

4 大規模数理計画法⁴⁾

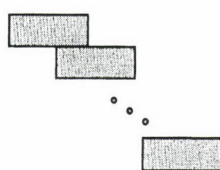
複数のサブシステム(subsystem)の複合体からなる大規模システム(large-scale system)の最適化問題を、その構造の特殊性に着目して効率的に解く方法論を与えるのが大規模数計画法である。このような複合体の最適化問題は、問題構造の形に応じた階層構造(hierarchical structure)のもとでパラメトリックなアプローチにより問題を解くところに特徴がある。そこでは分割(partitioning)あるいは分解(decomposition)と協調(coordination)という概念が重要な役割をはたす。図2に最適化問題の制約条件がもつ代表的な特種構造の例を示す。ここで、主ブロック角型構造(primal block angular structure)の問題は各サブシステム固有の制限条件と複数のサブシステムにまたがる制限条件を持った問題を表し、双対ブロック角型構造(dual block angular structure)の問題は複数のサブシステムが共有する変数を含む問題を表し、階段構造(staircase



(a) 主ブロック角型構造



(b) 双対ブロック角型構造



(c) 階段構造

図2 大規模システムにおける特種構造の例

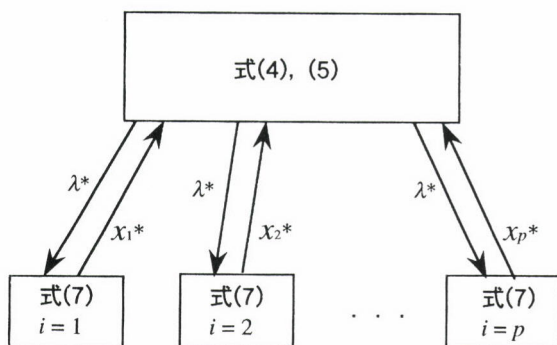


図3 2-レベル構造をもつ双対分割手法による最適化

structure)の問題は多段決定型の離散時間動的システム (discrete-time dynamical system)を表している。

主ブロック角型構造をもった線形計画問題を対象にした Dantzig-Wolfeの分解原理は古くからよく知られているが、大規模な問題の最適解を計算する上では内点法の威力に押されて、今ではほとんど使われなくなってしまった。しかし、階層構造をなす計画プロセスのもつ意味を解釈するうえでは、価格による協調法として今でも重要な意味を持つ⁴⁾。

主ブロック角型構造をもった非線形計画問題はつぎのように表される。

$$\min_{\{x_i\}} f_1(x_1) + f_2(x_2) + \dots + f_p(x_p) \quad \dots\dots\dots (1)$$

subject to

$$g_1(x_1) + g_2(x_2) + \dots + g_p(x_p) \leq b \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\left. \begin{array}{l} x_1 \in \mathcal{Q}_1 \\ x_2 \in \mathcal{Q}_2 \\ \vdots \\ x_p \in \mathcal{Q}_p \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 p はサブシステムの数、 $i=1,2,\dots,p$ に対して x_i はサブシステム i の決定変数、 $\mathcal{Q}_i$ はサブシステム i に固有の制限領域、式(1)は各サブシステムの目的関数の加形形で表現された全体の目的関数、式(2)は p 個のサブシステムにまたがった制限条件、式(3)は各サブシステムに固有の制限条件を表している。

式(1)～(3)によって表現された最適化問題を主問題 (primal problem)とする双対問題(dual problem)を考えると

$$\max_{\lambda} \phi(\lambda) \quad \dots\dots\dots (4)$$

subject to

$$\lambda \geq 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

のように表される。ここで、 λ は双対変数、目的関数 $\phi(\lambda)$ は次のように定義される双対関数を表す。

$$\phi(\lambda) = \min_{\{x_i \in \mathcal{Q}_i\}} \left\{ \sum_{i=1}^p f_i(x_i) + \lambda^T \left[\sum_{i=1}^p g_i(x_i) - b \right] \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

双対関数すなわち双対問題の目的関数は、関数 f_i や g_i の凸性を仮定しなくても、常に凹関数になるので、式(4)、(5)に示した双対問題の大域的な最適解は、ある初期値 λ_0 からスタートして、何らかの勾配法によって求めることができる。この過程で、各 $\lambda=\lambda^*$ に対する $\phi(\lambda^*)$ の値とその勾配ベクトルの値を求める必要がある。 $\phi(\lambda^*)$ を求めるには、固定された λ^* に対してラグランジュ問題と呼ばれる最適化問題を解く必要があるが、これが次に示す p 個の小規模な最適化問題に分割される。 $i=1,2,\dots,p$ に対して

$$\min_{x_i \in \mathcal{Q}_i} \left\{ f_i(x_i) + \lambda^{*T} g_i(x_i) \right\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

この解を $x_i=x_i^*$ とすると、これを式(6)に代入することにより $\phi(\lambda^*)$ の値を求めることができ、さらに、サブ勾配と呼ばれる勾配ベクトルを求めることができる。

このプロセスは双対分割手法と呼ばれるが、図3に示す2-レベルの階層構造のもとで、双対変数 λ をパラメータにして p 個の独立な小規模な最適化問題が繰り返し解かれ、双対問題の停留点が求められた段階で、主問題の最適解または準最適解が求まる。ただし、準最適解しか求められないのは、関数 f_i や g_i の凸性が成立しない非凸計画問題において双対ギャップが存在するとき、すなわち式(1)の最小値と式(4)の最大値が一致しないときのみである。

ここでは双対問題を分割して解く方法を示したが、他にも主問題のサブシステムに資源を割り当てることにより主問題を分割して解く方法もある。さらに、生産工程のスケジューリング問題を解こうとすると、離散変数(discrete variable)を含む組合せ最適化問題(combinatorial optimization problem)に遭遇するが、この問題に対する構造の特殊性を生かした分割手法については、今後の課題として残されている。

5 多目的意思決定論

複数の目的(評価基準あるいは評価属性)を同時にできるだけ高めるような解を求める問題は、多目的意思決定問題と呼ばれる。例えば、生産スケジューリングの評価基準が、生産量の最大化といった単一目的であることは稀で、納期遅れの最小化、設備の稼働率の最大化、段取り替え回数の最小化など、複数の相反する目的をできるだけ高めたいことが多い。

このような多目的意思決定における複数の目的がまったく独立で対等なものであるならば、パレート最適性以上の合理性を追及することはできない。ここで、パレート最適解とは、後で定式化するように、一つの目的を改善するには他の目的を犠牲にしなければならないような解を意味する。このようなパレート最適解は通常無数に存在する。

一般に、複数の目的がまったく独立で対等であることは稀で、複数のパレート最適解を意思決定者に示すと、それらの間に優劣の差がつくことが多い。このときには、複数の評価属性をひとまとめにする上位レベルの目的関数—これを多属性効用関数と呼ぶ—に基づいて選好判断を行っていると考えることができる。

多目的意思決定問題を数理的に扱うことの難しさと面白さは

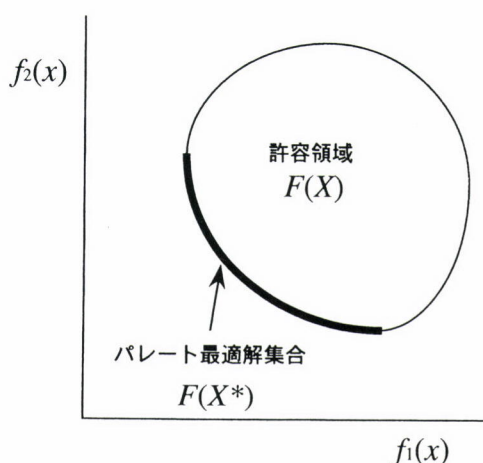


図4 パレート最適解集合

1) 多属性効用関数を陽に求めることなく、陰に存在する多属性効用関数を最大にする意思決定者の解をどのようにして求めるか？

2) 陰に存在する多属性効用関数をいかにして陽に取り出すか？

にある。1)に沿った理論が数理計画法を基礎にした多目的計画法⁶⁾で、2)に沿った理論が人々の価値観を数理モデルにしようとする効用理論⁷⁾と呼ばれるものである。

5.1 多目的計画法⁶⁾

多目的計画問題はつぎのように表される。

$$\min_x f(x) \dots\dots\dots (8)$$

subject to

$$x \in X = \{x : g(x) \leq 0\} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $x \in R^n$ 、 $f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)]^T$ 、 $g(x) = [g_1(x), g_2(x), \dots, g_m(x)]^T$ 、すなわち、 m 個の制限条件のもとで p 個の目的関数を最小にする n 次元の決定変数 x を求める問題として定式化される。 X は決定変数 x の許容領域を表す。

多目的計画問題(8)、(9)において、

$$f_i(x) \leq f_i(x^*), \quad \forall i=1,2,\dots,p \dots\dots\dots (10)$$

を満たす $x \in X$ が存在しないとき、 $x^* \in X$ を式(8)、(9)のパレート最適解(Pareto optimal solution)という。すでに述べたようにパレート最適解は一般に無数に存在し、解集合を形成する。いまパレート最適解集合を X^* 、目的関数の空間における許容領域を

$$F(X) = \{f(x) : x \in X\}$$

として、 $p=2$ のときのパレート最適解集合を図示すると図4のようになる。ここで $F(X^*)$ は目的関数空間におけるパレート最適解集合を表す。

パレート最適解集合を求める手法としては、重み付け法すなわち複数の目的関数のそれぞれの重みつき総和を最小化する単一目的の最適化問題を、重みの値をパラメトリックに変更して解くことにより求める方法、 ϵ -制限法すなわち式(8)、(9)の多目的最適化問題において r 番目の目的関数 $f_r(x)$ 以外の $(p-1)$ 個の目的関数に上限値 ϵ_k ($k=1,2,\dots,p; k \neq r$)を設定して不等式制限条件におきかえた単一目的の最適化問題を、 ϵ_k をパラメトリックに変更して解くことにより求める方法、さらに最近、遺伝的アルゴリズム(GA)の“集合による探索”という性質を使ってパレート最適解集合に属する複数の解を同時に求める方法⁸⁾などが提案されている。

多目的計画法の難しさと面白さは、パレート最適解集合を求めることもさることながら、パレート最適解集合の中から意思決定者が好む選好解をどのようにして求めるかに

ある。紙数の都合で詳細は省略するが、文献6)には、選好最適化による方法、満足化による方法、最適満足化による方法が示されているので参照されたい。

5.2 効用理論⁷⁾

多目的意思決定における複数個の評価属性をひとまとめにする上位レベルの目的関数すなわち多属性効用関数(multiattribute utility function)は、意思決定者の持っている価値観を分析して、その選好構造を定量的に抽出したものである。このような分析は効用分析(utility analysis)あるいは意思決定分析(decision analysis)と呼ばれて、様々な角度から議論されている。

このような多属性効用関数を直接求めることは困難であるので、各属性間に独立性や依存性を仮定して、直接測定する効用関数の属性の数を減らす分解表現を求めることが不可欠である。

5.2.1 期待効用モデル

意思決定者(Decision Maker、以下DMと略す)が選択することのできる代替案(alternative)の集合を

$$A=\{a,b,\dots\}$$

とする。DMが代替案 $a \in A$ を選択したときに、結果 x_i が得られる確率を p_i 、代替案 $b \in A$ を選択したときに結果 x_i が得られる確率を $q_i, \dots$ とし、起こり得るすべての結果の集合を

$$X=\{x_1, x_2, \dots\}$$

とする。このとき

$$p_i \geq 0, \quad q_i \geq 0, \quad \forall i \\ \sum_i p_i = \sum_i q_i = \dots = 1$$

を満たす。また、 X 上の効用関数(utility function)を $u: X \rightarrow R$ とすると、代替案 $a, b, \dots$ を採用したときの期待効用(expected utility)は、おのこの

$$E_a = \sum_i p_i u(x_i), \quad E_b = \sum_i q_i u(x_i), \dots \quad (12)$$

で与えられる。このように、結果が一つの属性によって規定されるとき $u(x)$ を単属性効用関数といい、複数の属性によって規定されるとき多属性効用関数という。

von Neumann-Morgensternは5つの公理を設定し、これらが成り立つときには、期待効用仮説「DMは代替案の集合 A の中から期待効用が最大になる代替案を選択する」を満たす基数的効用関数 $u(x)$ が存在することを証明した。いかにすると、このときにはDMは

$$a > b \Leftrightarrow E_a > E_b, \quad a \sim b \Leftrightarrow E_a = E_b \quad (13)$$

という規範に従って代替案を選択することを意味する。ここで、 $a > b$ は「代替案 a の方が b よりも好ましい」ことを表し、 $a \sim b$ は「 a と b の好ましさが無差別(同等)である」ことを表している。基数的効用関数とは、原点と任意の単位を

指定すると一意的に尺度化できるもので、 $u(x)$ が上記の規範を満たす効用関数であるとする、任意の定数 $\alpha > 0, \beta$ に対して

$$u^*(x) = \alpha u(x) + \beta \quad (14)$$

もまた同じ規範をみたす。このような性質を「 $u(x)$ は正線形変換の範囲で一意的である」という。また、 $u(x)$ と $u^*(x)$ とは戦略的に同値であるともいう。

いま、 $\ell_a, \ell_b, \dots$ を、おのこの代替案 $a, b, \dots$ を選択したときにDMが直面するくじ(lottery)として

$$\ell_a = (x_1, x_2, \dots; p_1, p_2, \dots)$$

$$\ell_b = (x_1, x_2, \dots; q_1, q_2, \dots)$$

と書き表すことにする。ここで、上記の規範すなわち期待効用仮説(式(2))を次のように表現する。

$$a \geq b \Leftrightarrow \ell_a \geq \ell_b \Leftrightarrow u(\ell_a) \geq u(\ell_b) \Leftrightarrow E_a \geq E_b \quad (15)$$

ただし、 $a \geq b$ は「代替案 a の方が代替案 b よりも好ましいかまたは無差別である」ことを表し、 $u(\ell_a)$ と E_a は

$$u(\ell_a) = u(x_1, x_2, \dots; p_1, p_2, \dots) \\ := \sum_i p_i u(x_i) = E_a \quad (16)$$

を表す。この関係はくじの効用がくじの期待効用で表現されることを示している。

期待効用仮説に基づいて単属性効用関数を同定することができる。また、多属性効用関数を求める場合にも、多くの単属性効用関数を同定し、これらの関数(分解表現)として多属性効用関数を求めることができる。

5.2.2 多属性効用関数

結果 $x \in X$ が n 個の属性 $X_1, X_2, \dots, X_n$ によって特長づけられているものとする。現実には多目的評価における複数の評価項目がこれに相当する。このとき結果は順序対

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n), x_1 \in X_1, x_2 \in X_2, \dots, x_n \in X_n$$

で表すことができ、起こりうるすべての結果の集合は直積集合で表される。これを n 属性空間という。

n 属性効用関数は、 $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ 上に $u: X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n \rightarrow R$ として定義される。このような n 属性効用関数を直接求めるには、複数の属性を同時に考慮してくじに関する選好判断をしなければならず、実際にはほとんど不可能である。そこで、DMの選好に関して複数の属性間に種々の独立性や依存性を仮定して、直接測定すべき効用関数の属性の次元を減少させる分解表現を求めることが重要な課題となる。

種々の独立性の中で、最もよく実地に適用されてきたのはKeeneyの効用独立性(utility independence)とその特別な場合としての加法独立性(additive independence)である。このとき、多属性効用関数は加法形(重み付き和)または乗法形の分解表現によって表される。さらに、対象と

する問題が大規模になり、互いに競合した属性間のトレードオフ関係が複雑になってくると、ある属性に関する条件付効用関数の形が、条件として与える他の属性のレベルに応じて変化する場合は現れる。このとき、効用独立性の仮定が崩れることになる。このときには、条件付効用関数の形の変化に着目し、いくつかの異った条件レベルに対する条件付効用関数の間に凸依存性(凸結合で表しうる性質)(convex dependence)を仮定して、Keeneyの効用独立性、Fishburnの二側面独立性、Bellの補間独立性などを特別な場合として含む一般的な分解表現を見いだすことができる。

この凸依存性に基づく分解表現は、ある属性に関するDMのリスクに対する態度が、他の属性レベルに依存して変化する場合は表現できるので、DMの行動原理に関する記述的モデルとしても汎用性の高い多属性効用関数を構成することができる。しかも、そこで直接測定すべき効用関数は、多数個の単属性効用関数(条件付効用関数)だけでよいという特長を備えているので、一見複雑に見える分解表現も比較的容易に求めることができる。詳しくは文献7)を参照されたい。

6 自律分散システム論⁹⁾

鉄鋼業における情報処理機能のダウンサイジング、すなわち汎用コンピュータからワークステーションやパソコンなどの小型機器への移行とあいまって、分散協調型情報処理、低価格化、ユーザフレンドリといった効果が目論まれている。鉄鋼生産計画における複数のプロセスにわたる大規模系の一貫最適化を図るとき、その対象は大規模複雑なため集中管理を行うことには限界がある。また、システムへの要求が多目的になって、多様性、柔軟性に富んだシステム構成が必要になる。自律分散システムは、集中管理型システムの画一的な処理を効率的に行うのに比べて効率性は多少犠牲にしても、多様な要求に柔軟に適應できることが期待されている。

自律分散システム(autonomous distributed system)とは「システム全体を統合する管理機能をもたず、システムを構成する各要素(サブシステム、個)が自律的に行動しながら協調(coordinate)し、全体としての秩序を形成するシステム」と定義されている。そこでは、要素間の結合や相互作用はあらかじめ設定されず、ランダムな結び付きである初期段階から、秩序ある最終段階へ成長していく自己組織化(self-organizing)機能をもつ。したがって、周囲環境や目的が動的に変化すると、協調動作を変えて目的に合った新しい秩序を、変化する環境の中に作りだすことができる。

生物は、自律分散システムが自然の中に存在する典型例である。

自律分散システムは知的システム(intelligent system)と深い関わりをもつ。分散人工知能(マルチエージェントシステム)は、複数の自律する処理主体(エージェント)が互いに対等な立場で協調して広範囲の目的を達成する仕組みである。その処理形態はボトムアップ的であり、その一般的効用としてつぎのことがあげられている。

- 1) 多数のエージェントが集まって協調動作をすることにより、単体では不可能だった作業が実行可能となる。
- 2) あるエージェントが故障してダウンしても他が肩代わりすることができるので、システムの信頼性が向上する。

生産をとりまく周囲環境の変化に適應する自律分散協調型の次世代生産システムの実現に向けて、国際共同研究プロジェクトIMS(Intelligent Manufacturing System)の研究が進められている。次世代生産システムにおける自律分散について、そのあるべき姿を展望することは容易ではない。しかし、大量生産、大量消費、大量廃棄による量的拡大に依存した20世紀型工業文明は持続不可能である。先進諸国ではものが量的に充足してしまったので、質的な向上が要求される。次世代生産技術は資源エネルギー利用を極力おさえ、環境への負荷を最小限におさえたMinimum Emission Manufacturingが望まれる。そのためには、リサイクルの推進、使用可能な部品の再利用、製品寿命の長期化など、持続可能な生産技術への変身が必要である。このような環境変化に適應できる自律分散型生産システムの構築が望まれる。

次世代の自律分散型生産システムとして、生物型生産システム^{10,11)}が提唱されている。そこでは¹⁰⁾最適化方法論の転換、すなわち、システムの目標として“最適”を考えるのではなく、“調和”という新しい概念を設けることの必要性が主張されている。その理由として、大規模生産システムのモデル化の困難性、目的関数設定の困難性、非線形性、動的環境におけるリアルタイム性などがあげられている。

7 複雑系と創発^{12,13)}

「21世紀を動かす科学10大理論」のひとつとして“複雑性の科学”が話題になっている。では、複雑系(complex system)とは、またその基礎になる複雑性(complexity)とは何をさすのか。1983年、アメリカ、ニューメキシコ州のサンタフェに、複雑系を研究することを目的としてサンタフェ研究所が設立された。複雑性について統一した定義があるわけではないが、要素還元論や対象の単純化では対処できない数々の問題を、カオスや非線形現象を扱うときのよう

に、これまでと違った視点から研究する分野といわれている。そして複雑系とは「無数の構成要素から成るひとまとまりの集団で、各要素が他の要素と絶えず相互作用を繰り返す結果、全体として見れば部分の動きの総和以上の独自のふるまいを示すもの」とされており、この複雑系に特有の現象が、予期せぬ組織化や構造化やパターンの出現となって現れる創発(emergence)と呼ばれる現象である。

すでに見てきた階層構造をなすシステムにおいて、下位レベルにある個々の構成要素間の局所的相互作用の結果、下位の構成要素を支配する法則だけでは説明できない性質や機能が上位レベルになんらかの大域的構造として出現する。この構造によって規定された全体的な特性が下位にフィードバックされて、構成要素のふるまいに影響を及ぼす。創発とはこの過程の全体であり、動的な概念である。この図式を下位から見れば機械論の見方になるし、上位から見れば目的論の見方になるが、複雑性の科学は上下双方向の見方を統合的にとらえることができ、そのときのキーワードが創発ということになる。この「全体は部分の総和以上である」という点は、以前から“システム”のもつ顕著な特性として認識されてきたが、複雑系が取り扱う非線形現象としてあらたに議論されている。わが国でよく知られている遺伝的アルゴリズムの創始者Hollandや人工生命の創始者Langtonは、ともに複雑系の先行者であることも付記しておきたい。

わが国では、神戸大学 北村新三教授を研究代表者にして文部省科学研究費重点領域研究「創発システム」が進められているが、その成果が期待される。

8 おすび

本講座では、大規模・複雑系を対象にした新しいシステムパラダイムへの入門的解説を試みた。詳しくは参考文献を参照していただきたい。これが今後の鉄鋼業における大規模一貫プロセスの生産計画、運用の最適化、定量的評価の実現などにすこしでも役に立つならば、筆者の望外の幸せである。

参考文献

- 1) 藤本英雄：ふえらむ，3 (1998)，33.
- 2) 玉置久：ふえらむ，3 (1998)，101.
- 3) 寺野寿郎：システム工学入門—あいまい問題への挑戦—，共立出版，(1985)
- 4) 田村坦之編著：大規模システム—モデリング・制御・意思決定—，昭晃堂，(1986)
- 5) 田中英夫：ファジィモデリングとその応用，朝倉書店，(1990)
- 6) 中山弘隆，谷野哲三：多目的計画法の理論と応用，計測自動制御学会，(1994)
- 7) 田村坦之，中村 豊，藤田眞一：効用分析の数理と応用，計測自動制御学会編，コロナ社，(1997)
- 8) 玉置久，森正勝，荒木光彦：計測自動制御学会論文集，31 (1995) 8，1185.
- 9) 伊藤正美，市川惇信，須田信英編：自律分散宣言—明日を拓くシステムパラダイム—，オーム社，(1995)
- 10) 沖野教郎：生物型生産システム—集中から分散へ—，朝倉書店，(1993)
- 11) 上田完次：生物指向型生産システム，工業調査会，(1994)
- 12) 吉永良正：「複雑系」とは何か，講談社現代新書，(1996)
- 13) 「21世紀を動かす科学10大理論」最新科学論シリーズ 31，学習研究社，(1996)

(1997年12月26日受付)