

大規模システムにおける人間とコンピュータの
協調制御のための実用モデル化技術の研究

増位 庄一

電気通信大学 大学院 情報システム学研究科
博士（工学）の学位論文

2016 年 3 月

電気通信大学 大学院 情報システム学研究科
博士（工学）の学位論文

博士論文審査委員会

主査	田野	俊一	教授
委員	末廣	尚士	教授
委員	広田	光一	教授
委員	植野	真臣	教授
委員	南	泰浩	教授

著作権所有者

増位 庄一

2016 年

Study on Human Cooperative Practical Modeling Technology for Large-Scale System Control

Shoichi Masui

Abstract

The large-scale social systems, such as transportation system, railway system and energy system provide a lot of convenience to social life by their computerization. To operate such large-scale social systems stable and safely, it is necessary to make a good balance among many purposes and constraints which are involved in their roles naturally. To realize this purpose, it is strongly recommended to make a best collaboration between human operators of the systems, which have good skill of the overall judgement for safety operation, and the computers which have strong computational power for future prediction and visualization of current situation.

In this paper, I describe some modeling technologies necessary to achieve well balanced and coordinated collaboration between human operators and computers. Important thing in the collaboration of humans and computers, the computers, even with a limited sensor information, have a capability to estimate accurately and present timely to the human operators, the overall picture of the system current situation and its tendency.

In this study, the following three viewpoints for the man-machine good collaboration are considered as important issues.

The first one is "We must know what is happening in the system now." I have developed a physical model to visualize the state of the plant which is difficult to see and estimate for human operator without any helps by the computer.

The second one is "We must know how to change the system state in near future." I have developed an autoregressive autonomous distributed control model for the purpose. It can be used as an emergent control algorithm when the control command from the centralized control center of the social system is missing. In such case, local operator and the computer must make a decision which will be considered the best with a limited information by tight collaboration.

The third and final one is "We can use the skilled person's wisdom and know-how as

assist information for our operation." I have developed an expert system building tool which suitable for system control. It is a knowledge-based collaboration technology to take advantage of human know-how for the plant operation.

These models developed during this study were adapted to sewage treatment system, multi-stage dam control system, and as blast furnace operation system, respectively and be used practically and successfully. .

This paper is organized as follows.

The first chapter is the introduction. The purpose of this study and the research style are discussed.

In the second chapter, I describe the current situation and the tendency of large-scale system control and modeling techniques which is the main contents of this study. I will be outlined past history of the system control and modeling techniques which is used for the system control. In addition, I discussed the importance and necessity of the human and compute coordination and its modeling technology in the system control field.

The third chapter discusses collaboration in the form that the computer will support the human's understanding of current situation of targeted system. For a human operator, the most important issue for good system control is to accurately grasp the current state of the plant. However, in many cases, the lack of sensors prevent the satisfactory observation. Development of visualization model is strongly desired that can guess the current state of the plant even from the few sensor data. In this study, I had developed a plant model that is based on the physical phenomena. I had applied the model to a sewage treatment plant and were able to confirm the usability. The model can be show to plant operator the status of the aeration tank and final sedimentation basin as some visual images. This model is actually used.

Chapter IV discusses the importance of timely to-human's presentation of a future trend prediction for the individual sub-plant operation. Large scale systems are recognized as a collaborative aggregation of number of subsystems. In case of the missing of control commands which normally is received from the host in the total control center of over-all system, local sub-plant operator is forced to operate the sub-system alone by which the over-all system may not fall into unstable. In such situation, a tendency prediction by local computer must be great help for the operator, which give him the guideline and guarantee for his operation. I have developed an autoregressive autonomous distributed control model for the purpose. The developed model is used for tendency prediction and control guidance support by autonomous decentralized system concept. This model had been applied to the emergency control of serial dam control system located on a river system. The model decides each of the discharge amount based

on the limited information such as water level of each dam. For the purpose, the model includes an environment identification model by statistic calculation method, and can be used as an emergent operator's support. The result of application of this model to the serial dam control was successful and the operator of the dam can possible to have the operation allowance in case of the emergency. It incorporated in a multi-stage dam control system of an actual water system.

Chapter V is considered to introduce the knowledge and know-how of skilled operators to control computer. To stabilize the daily operations of large scale system, skilled operators are indispensable. However, because the acquisition of skilled operation is time-consuming task, the number of skilled operators has been becoming to decrease. In addition, they have been busy even for training of young people. I had developed a blast furnace operation expert system. For building a cooperative relationship with the skilled operator, developed expert system building tool is designed for easy treatment even for non ICT familiar operators. Operator can input and modify his knowledge and know-how by himself in daily operation. This model has be utilized in the daily operation of two blast furnaces control and be growing day by day.

In the sixth final chapter, I will summarize the results of this research. In addition, I have discussed how to create control models and/or control rules from huge amount of control experience data accumulation automatically with statistical analysis and rough sets analysis. Practical models described in this paper had been developed in 1980s. However, there still remain numerical large scale plants and social infrastructures which need the application of these models. I will try to develop new and practical technology for collaborative innovation.

大規模システムにおける人間とコンピュータの 協調制御のための実用モデル化技術の研究

増位 庄一

概要

交通システム、エネルギーシステム、物流システムなど大規模社会システムは、コンピュータの発展により不可欠なインフラストラクチャとして定着し、社会生活に多くの利便性を提供している。このような大規模社会システムを安定的に運用していくには、システムが抱えている多くの目的や制約をバランスよく均衡させ、かつ効果的な手段で安全かつ効率的な運用を実現する必要がある。このためには、総合的な判断力に優れた人間と高速な計算力で状態把握や将来予測を行うことができるコンピュータをうまく協調させることが必須となる。本論文では、この人間とコンピュータの調和のとれた協調を実現するために必要なモデル化技術に関して行った実用化研究について述べる。人間とコンピュータの協調において特に重要なものは、限られたセンサー情報からでもコンピュータがシステムの全体像や稼働状態の可否などを的確に推定し、人間にその結果をタイムリーに知らせることで、総合的に的確な制御判断を行えるようにすることである。そのため、本研究では、「何が起きているかを知らせる」という観点からプラントの状態を推定する物理モデル、「今後どのように変化するかを知らせる」という観点から、自己回帰型自律分散制御モデル、「熟練者のやりかたを知らせる」という観点から、システム制御向けエキスパートシステムモデル、という人間協調のための実用モデルの開発を行い、それぞれ下水処理システム、多段ダム制御システム、高炉操業システムに組み込み、実用に供した。本論文ではこれらの取り組みを以下のような観点から3つにまとめた。

- ・見る制御：見えないプラントを「見える化」する可視化型協調技術
- ・推し量る制御：目隠しされたプラントを自律的に制御する予測型協調技術
- ・経験を活かす制御：プラント操業のための人間ノウハウを活用する知識型協調技術

本論文は以下のように構成されている。

第一章は序論として、本研究の目的とその位置づけを述べる。

第二章では、本研究の主内容である大規模システム制御およびそのためのモデル化技術に

関して、これまでのシステム制御技術の歴史やモデル化状況について概説し、コンピュータによるシステム制御における制御モデルの重要性およびその人間協調の必要性について考察する。

第三章は見る制御、すなわちセンサーでは見えないプラントをモデルによってビジュアルにすることで、コンピュータが人間の現状把握をサポートするという形の協調について論じる。人間オペレータにとって、プラントの現状を正確に把握することは、制御の安定化のための必須の要件である。しかし多くのプラントではセンサーの種類や数の制約によってその要件が満たされない。数少ないセンサーデータからプラントの現状を推測できるビジュアルモデルの開発が強く望まれる状況にあった。本研究では、人間にとって理解しやすい物理現象に立脚したプラントモデル化に取り組み、プラントの動特性を単純な個別の物理過程の組み合わせによって模擬するという全く新しいラグランジュタイプのモデル化手法を開発した。具体例として下水処理場を取り上げ、曝気槽と最終沈澱池の状況をビジュアルに確認できるモデルを構築した。このモデルは実際の大規模下水処理場に適用され、オペレータの視認性が向上することで処理場操業の安定化、水質改善に役立った。

第四章は推し量る制御、すなわち相互に孤立したサブプラントの自律的制御の際に必要な個々のサブプラントの動態の将来予測を人間にタイムリーに提供するという形の協調について論じる。大規模システムは、いくつかのサブシステムの集合体として認識され、サブシステム間は比較的緩い結合によって関係づけられるという形をとることが多い。通常はサブシステム間の調整は上位の意思決定者によって行われるが、これらが機能不全になった場合に対して、個々のサブシステムが単独で運用を行いつつ、全体の系が不安定にならないような制御モデルを備えておく必要がある。具体例として1つの水系に接続して置かれたダム群の緊急時制御を取り上げる。災害時の通信線の途絶などの事故が発生した場合は、各ダムでは自己測定可能な水位など限られた情報をもとにそれぞれの放流量を決める必要が生じる。このような状況下でも安定した制御を行うために、環境同定のモデルを常にコンピュータ内でアップデートし、緊急時にはそのモデル結果に基づいて制御を行う、という環境推定型制御モデルを案出した。実水系のダム群にこのモデルを適用し、集中制御とほぼ同等の制御が実現できることを確認した。各ダムのオペレータは、コンピュータが予測した推定流入量や放水量推奨値を参照しつつ、緊急時に対応した運転制御を行えるようになった。このモデルは緊急時バックアップモデルとして、実水系の多段ダム制御系に組み込まれている。

第五章は経験を活用する制御、すなわち人間の経験知識やノウハウによって制御されているプラントに関して、熟練したオペレータが提供した制御知識やノウハウをコンピュータがそのまま模擬して制御を行うという形の協調について論じる。制御のための数式モデルが導けず、オペレータが長年の経験に基づいて操業を安定化させているというプラントが数多くある。オペレータのもつ経験をコンピュータに取り込み、日常の操業の安定化を図りたいというニーズが顕在化していた。具体例として取り上げた高炉は人間にとっても安定した操業を維持するのが難しいプラントで、その運転には長年の経験が必要とされていた。そこで、

熟練した高炉オペレータがもつ高炉運転ノウハウをモデル化してコンピュータに移植するエキスパートシステムのアプローチを適用することを考え、そのためのモデル構築を行った。このモデル化の目的は専門家である熟練オペレータとの協調的關係を構築し、制御知識自身を日々更新・成長させていけるような手段を提供することにあった。このモデルは大規模製鉄所で実用化され、2つの高炉の日々のオペレーションに活用され、日々成長を続けている。

第六章では本研究の成果を総括する。本論文の中心課題で述べた実用モデルはいずれも1980年代に開発したものである。この時代は、コンピュータ資源やセンサーなどが質量とも充実しておらず、その制限のもとでのモデル化上の工夫について論じた部分もある。しかしながら、本論文で述べた、見る制御、推し量る制御、経験を活かす制御を必要とするシステム、プラントは数多く残されており、今後もそれらが抱える問題の解消への必要性は高い。本論文で述べた考え方をベースに現代のコンピュータ資源を活用することで、さらにシステム制御の高度化、効率化を図ってゆきたい。また第六章では、今後の課題として、人間のみでは見つけ出すことができないようなデータの相互関係をマンマシン協調的に導き出す統計的アプローチによる協調について論じた。コンピュータ技術やセンサー技術の進展によって、大量のデータをハンドリングできるようになった現在、データから計算機がモデルを導出し、それを人間が吟味承認するということで、モデルの創成を協調的に行うという形を採ることができる。そこで過去の制御経験のデータの活用という観点から、統計的モデリングをシステム制御の場に持ち込むことを提案した。さらに、データからの制御ルールの創成を、ラフ集合論を用いて行う方法論について述べ、経験を活用する制御で用いることができる If～Then ルールを導出することができることを示した。これら技術はまだ実用には至ったものではないが、人間とコンピュータの新しい関係を創る方法論として有力であると考えている。システム制御が大規模社会システムの安定運用に効果を発揮する技術開発にさらに努めたい。

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 研究のアプローチ	2
1.3 研究の位置づけと本論文の構成	3
第2章 システム制御におけるモデル化	5
2.1 システム制御とは	5
2.2 システム制御におけるモデル化	8
2.3 人間との協調の必要性とその形態	11
第3章 見る制御—大規模プラントのビジュアル化モデル	16
3.1 プラントのビジュアル化	16
3.2 分布特性を考慮した下水処理プロセスのモデル化	18
3.3 曝気槽のモデル化	19
3.3.1 輸送モデル	
3.3.2 汚泥増殖モデル	
3.4 最終沈澱池のモデル化	24
3.4.1 モデルの構成	
3.4.2 パラメータの設定	
3.5 モデルの有効性の評価	29
3.6 見る制御のまとめ	
第4章 推し量る制御—分散化できるプラントの自律化モデル	31
4.1 サブプラントの自律化	34
4.2 プラント制御の分散化	35
4.3 自律分散制御モデルの導出	36
4.3.1 問題の設定	
4.3.2 自律分散制御モデルの導出	
4.3.3 制御性能の検討	
4.3.4 安定性の検討	
4.3.5 制御性能の評価	
4.4 多段ダム制御への適用	44
4.4.1 運用方式の設定	
4.4.2 シミュレーション結果	
4.5 モデルの評価	48
4.6 推し量る制御のまとめ	50

第5章 経験を活かす制御—熟練者の知識の活用モデル	53
5.1 プラント操業における知識活用	54
5.2 エキスパートシステムモデル	54
5.3 システム制御知識のエキスパートシステムモデル化	56
5.3.1 モデル化の視点	
5.3.2 フィジカル世界との接点の設計	
5.3.3 マッチングの高速化	
5.3.4 設計段階でのモデル構築	
5.4 高炉操業へのエキスパートモデルの展開	62
5.4.1 高炉操業エキスパートシステムの開発	
5.4.2 システムに対するニーズと特長	
5.4.3 システムの構成	
5.4.4 高炉実操業での評価	
5.5 経験を活かす制御のまとめ	74
第6章 結論	77
6.1 成果のまとめ	77
6.2 今後の課題	81
発表論文・書籍リスト	89
謝辞	94
参考文献	95
著者略歴	100

図目次

図 1.1	本論文の構成	4
図 2.1	大規模社会インフラのコンピュータ制御のためのモデル化	5
図 2.2	システム制御技術の発展	8
図 2.3	コンピュータ制御でのモデルの進化	9
図 2.4	研究課題	11
図 2.5	人間とコンピュータが協調することの重要性	11
図 2.6	人間とコンピュータの3つの協調の形態	12
図 2.7	課題の整理と解決方針	15
図 3.1	見る制御のための問題の設定	16
図 3.2	活性汚泥下水処理プラント	17
図 3.3	活性汚泥下水処理の機能	17
図 3.4	完全混合槽列モデル	21
図 3.5	槽数 N に関する曝気槽出口計算濃度	22
図 3.6	槽数 N に関する曝気槽出口計算濃度の評価	22
図 3.7	沈澱池動特性の離散モデル化	25
図 3.8	汚泥再浮上現象の捉えかた	26
図 3.9	沈澱池パラメータの感度	27
図 3.10	沈澱池汚泥分布の推定例	28
図 3.11	下水処理プロセスのモデル化概要とその成果	29
図 3.12	モデルの計算結果と実測値の比較	30
図 3.13	統計モデルとの比較	31
図 3.14	見る制御のまとめ	32
図 3.15	見る制御における協調	33
図 4.1	推し量る制御のための問題の設定	34
図 4.2	自律分散制御モデル化の分散制御システム構成	39
図 4.3	自律分散制御モデル	40
図 4.4	数値シミュレーションの一例	44
図 4.5	多段ダム制御アルゴリズムの概要	45
図 4.6	多段ダム制御の対象プラント	47
図 4.7	多段ダム制御のシミュレーション結果	48
図 4.8	計算能力と信頼性の関係	49
図 4.9	プラント状態変数の次元に対する所要計算能力と信頼性	49
図 4.10	推し量る制御のまとめ	51
図 4.11	推し量る制御における協調	52

図 5.1	経験を活かす制御のための問題の設定	53
図 5.2	エキスパートシステムとは	55
図 5.3	オブジェクト	56
図 5.4	システム制御向けオブジェクト階層の設計	57
図 5.5	自然語風ルール表現の設計	58
図 5.6	オブジェクトへのデータ自動取り込みの設計	60
図 5.7	システム制御向け知識処理の高速化	61
図 5.8	システム制御エキスパートシステムの設計方針	62
図 5.9	高炉とその付帯設備	63
図 5.10	高炉操業エキスパートシステム概念図	66
図 5.11	高炉操業エキスパートシステムのソフトウェア構成図	67
図 5.12	高炉操業エキスパートシステムの知識体系	68
図 5.13	知識処理端末のメニュー画面	68
図 5.14	知識入力操作遷移図	69
図 5.15	自然語風の知識入力画面	69
図 5.16	推論結果の出力	70
図 5.17	知識ベースのテスト入力操作遷移図	72
図 5.18	高炉操業管理用コンピュータ構成図	72
図 5.19	推論テスト結果	73
図 5.20	実操作と推論結果の比較	74
図 5.21	高炉操業エキスパートシステム	74
図 5.22	経験を活かす制御のまとめ	75
図 5.23	経験を活かす制御における協調	76
図 6.1	見る制御：見えないプラントを可視化するためのモデル化	78
図 6.2	推し量る制御：目隠しされたプラントを制御するためのモデル化	79
図 6.3	経験を活かす制御：プラント操業のためのノウハウのモデル化	80
図 6.4	今後の課題	82
図 6.5	データに基づくモデル自動創成の視点	83
図 6.6	人間との協調を考えた統計的システム制御の構成	85
図 6.7	ラフ集合論によるルール創成	85

表目次

表 3.1	曝気槽の諸元とモデルパラメータ	23
表 3.2	最終沈澱池の諸元およびモデルパラメータ	28

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

ものを思い通りに動かすことは人間の永年の夢であり、レオナルド・ダビンチが発明したといわれる调速機 [1] を嚆矢とする制御の歴史は、まさにその夢の実現への努力の歴史であった。20 世紀は、その夢がコンピュータという高速に数値演算を実行できる機械の出現によってコンピュータ制御あるいは計算機制御 [2] という形で、大きく可能性を広げた時代である。制御研究者たちの長い努力の結果、機械式のフィードバック制御 [3] が、電気駆動に置きかわり、さらにそれがコンピュータに置きかわることによって、制御対象となるシステムやその分野が大きく拡大し、それらの自動化が大きく進展した。

システム制御という言葉が生み出され、その言葉が示すように、社会の根幹を形作る大規模な社会システム、例えば工場の生産システム、道路や航空管制を含む交通システム、経済の急速な拡大を可能とした銀行システムや物流システムにまでコンピュータによる監視・制御・管理という概念が浸透した。このような大規模社会システムの制御においても、システム制御の基本となる概念は、観察すなわちセンサーなどによる対象の状態把握と、制御すなわちシステムの状況を決められた目標に近づけるための制御装置による操作、という 2 つのステップからなるという基本スタイルは不変である。しかし単純な機械装置やシステムに対する完全に自動化されたフィードバック制御の場合とは異なり、大規模社会システムの制御では、時には矛盾を含む複数の目標を同時にあるいは選択的に満たす必要が生じる場合があること、同じ目標を満たすために複数の制御手段が使えるその効果的な選択が必要となる場合があること、場合によっては目標そのものを変更する必要がある可能性があることなどから、総合的な判断力に優れた人間と高速な計算力によって動態把握や将来予測などが得意なコンピュータが相互に協調してシステムの運用を行うという形をとることが好ましい。この場合、コンピュータは対象システムが危険な状態にあることを察知しそれを人間に伝えるという役割を果たし、その状態においてシステムの運用を継続するかそれともシステムを停止させるか、はたまた制御目標値を変更するかなどの判断は専門的にそのシステムの運用に携わっている人間の領域に属するものであるという認識が一般的である。また、対象システムの大規模化によって、大量のセンサー情報から危険兆候をいち早く読み取ることが人間にとって次第に困難になり、コンピュータがその役割を代替することも期待されている。

このように、大規模社会システムの安全で効率のよい運用には、人間とコンピュータの共同作業、すなわち協調制御の実現が必須である。これを実現するには、コンピュータに制御すべき対象はどのようなものであり、またそれをどのように制御すべきかを、どのような形で教え込めばよいかを考える必要がある。すなわち対象のモデル化が重要になり、しかもそれが人間とコンピュータの協調という観点で組み立てられていることが必須の要件となる。

ここでいう「モデル化」は、世の中の森羅万象のなかから、システム制御の対象およびそ

れに影響を与える可能性のある周囲環境を切り出し、それらを核にシステム制御のためのアルゴリズム構築を行うという制御システムの具体化のためのインプリメンテーション全体を指す。これは、制御対象をどのように捉えるか、制御システムを含む対象世界全体をどのように記述するか、さらにどのような制御目標の実現を目指すか、プラントの故障など不具合が生じた場合にどのような対処を行うのか、人間にわかりやすい情報提供を行うにはどのようなインタラクションが必要かなど、システム設計やシステム目的の設定、さらに故障時の対応メンテナンスまでを含むかなり広範囲な概念を含むものと捉えることができる。特に大規模社会システムの制御の場合は、人間とコンピュータの相互的なインタラクションが、マンマシン協創 [4] による安定制御を実現するための重要な要素となる。

モデル化の概念は、コンピュータの出現およびその急速な発展によって自由な形式の複雑なモデルをコンピュータ自身が記憶し、蓄積し、利用できるようになったことを契機に、その重要度が増し、またモデルがシステム制御において果たす役割もますます拡大しつつある。現在ではモデル化の良し悪しおよび人間との協調のありかたが、システム制御の質を決定し、ひいては大規模社会システムそのものの価値を決める、と言っても過言ではない。その意味では、大規模社会システムのコンピュータ制御においてはモデル化、特に人間との親和性のよいモデル化を実現し、それを用いて人間とコンピュータが相互に協調してシステムを運営することこそが最も重要なキー技術となるといえる。

本研究では、大規模社会システムのコンピュータ制御に関して、執筆者が研究開発を行ってきたモデル化技術を、人間とコンピュータの協調制御を実現するという観点から整理し、協調制御のモデル化技術としての確立を試みる。ここでは、協調制御のモデルとして代表的と考えられる 3 つの大規模社会システムに関する問題解決を試みた。それらの成果はいずれも実用に供され、協調制御における本質的に重要ないくつかを具体化することに成功した。

1.2 研究のアプローチ

コンピュータだけですべての場合に対応しようとすることは、システムをブラックボックス化し、人間にとっては望ましくない方向に物事が進む可能性がある。最近 2045 年問題 [5] として、人工知能が人間を超えるかもしれないとの議論が行われているが、まさにこの問題が議論の対象となっている。一方、これはコンピュータの能力がこの議論を呼び起こすほど高まった証左とも言える。この問題は人間とコンピュータを、それぞれの得意な領域で相互に協調できるようにすることによって解消できる課題である。

人間がすべてのデータにアクセスできるようにすることは重要ではあるが、大量のデータを一時に提示されても、人間にはそれが意味するシステムの状態を把握することは困難である。システム制御においても、制御や監視のために整えられた限定されたデータだけではなく多種多様なデータが閲覧、利用できるという情報のオープン化が進展してきており、どのデータをどの順序で見ることが重要であるかを、瞬時に判断することは人間にとって非常にハードなタスクになり、重要な兆候を見逃す結果につながることもある。一方、センサーが

限定され、システムの状態を的確に把握しにくいプラントも数多く残されているし、センサー故障などによってデータが失われるようなことが生じた場合などでは、少ないデータのみでの適切な制御判断が強いられることになり、これも極めてハードなタスクになる。このような場合、コンピュータが人間の判断をサポートするための情報を適切なタイミングで提示することで、コンピュータと人間が相互に協調できる環境を作り上げることは制御システム開発において重要な要求となる。そのためのコンピュータ側の準備がモデル化であり、そのモデルが人間にとって親和性があるかどうかシステム制御の質を決定する。

システム制御では対象とするプラントを安定的に制御するために、その環境を含めて全体を設計するという視点での制御システム設計 [6] が採用されてきた。制御に必要なアルゴリズムが制御理論に基づいて開発され、それに必要なデータを得るためのセンサーが装備される、というのがシステム制御設計の形であった。そして、センシングされたデータに基づき、制御アルゴリズムに沿った制御操作が実施される。人が設計した個別的なプラントやシステムに対してこのアプローチは極めて有効に働き、想定外の外乱やセンサーの故障などの場合を除けば、対象とするプラントを安定的かつ効率的に運用することに成功した。本研究は、このシステム制御設計技術の拡張的發展として、大規模システム制御において必須となる人間とコンピュータの協調という観点からの実用的なアルゴリズムの設計及び実装を行うものである。人間とコンピュータの協調において特に重要なものは、限られたセンサー情報からでもコンピュータがシステムの全体像や稼働状態の可否などを的確に推定し、人間にその結果をタイムリーに知らせることで、総合的に的確な制御判断を行えるようにすることである。そのため、「何が起きているかを知らせ、人間のシステム把握力を活性化する」という観点からプラントの状態を推定する物理モデル、「今後どのように変化するかを知らせ、人間の総合的判断力を活かす」という観点から、自己回帰型自律分散制御モデル、「熟練者のやりかたを知らせ、人間の学習能力を伸長する」という観点から、システム制御向けエキスパートシステムモデル、という人間協調のための実用モデルの開発を行い、それぞれ下水処理システム、多段ダム制御システム、高炉操業システムに組み込み、実用に供した。本論文ではこれらの取り組みを以下のような観点から 3 つにまとめる。

- ・見る制御：見えないプラントを「見える化」する可視化型協調技術
- ・推し量る制御：目隠しされたプラントを自律的に制御する予測型協調技術
- ・経験を活かす制御：プラント操業のための人間ノウハウを活用する知識型協調技術

1.3 研究の位置づけと本論文の構成

執筆者は、大規模システム制御を可能とした技術背景には、対象システムの的確なモデル化およびそれらによるシステム状態の可視化などを通して、人間とコンピュータが協調して制御を行うという観点をもったことが含まれると考えている。モデル化技術は、制御の対象を観察し、その振る舞いがどのような原理、仕掛け、しくみによって成り立っているかを考え、それを人間が分かる形で表現して共有するための研究的要素の強い技術である。システ

ムの状況を誰もが理解しやすい形で明示できるモデルを、対象をしっかり観察することで構築し、起こったこととその原因をきちんと説明できるモデル化技術[7]を準備しなければならない。本研究はそれを意識して行った実用モデルの研究開発を主内容としている。

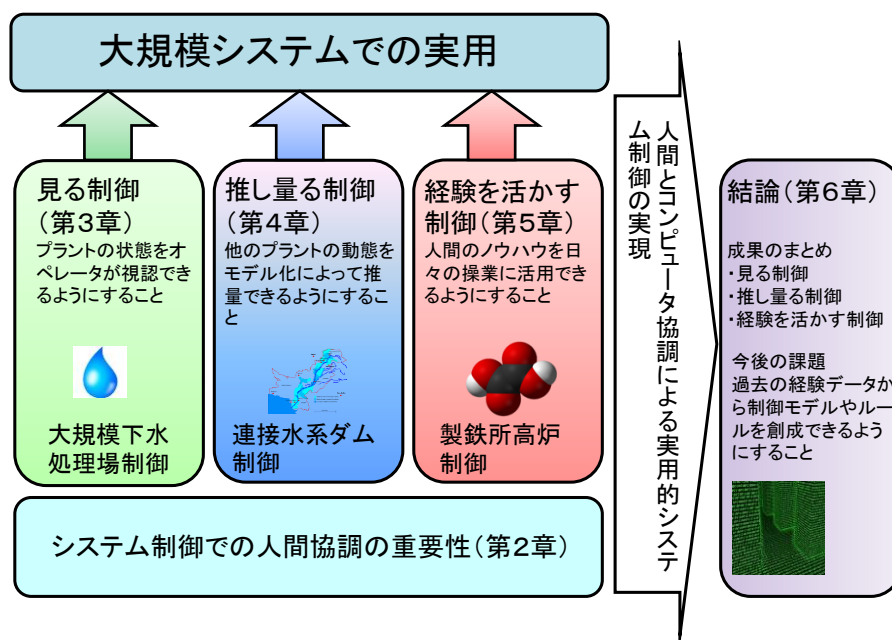


図1.1 本論文の構成

本論文は、図 1.1 に示すように、結論を含めて 6 章から構成される。第 1 章は序論で、研究の位置づけを明らかにする。第 2 章では、システム制御におけるモデル化技術および人間とコンピュータの協調の重要性について論述し、その方向性について議論する。

第 3 章から第 5 章は、論文の主内容として、執筆者が研究開発したモデル化技術を人間とコンピュータ協調の観点から整理する。第 3 章はセンサーの数が極めて限定されていてプラントの状況が見えにくいプラントの例として、下水処理場における曝気槽および最終沈澱池のモデル化方法について述べる [8]。第 4 章では、上位からの制御指示が失われるという状況において、同一水系の各ダムが自己で測定できるデータのみに基づき、他のダムの動態を推定し、単独で制御を実行できるようにする方法について詳述する [9]。第 5 章では、従来は人間が行ってきた高炉システムの操業をどのようにコンピュータに代替させるかについて、知識工学的なアプローチの例を示す。数式化しにくい人間のノウハウをコンピュータに取り込むにはどのような表現が適当であるかについて議論を行い、その具体化を図る [10]。

第 6 章は、結論として、それぞれの研究の成果をまとめる。さらに今後の課題として、過去の制御経験を含む大量のデータをハンドリングできる現在の状況に応じて、コンピュータがデータからモデル化につながる関係性を見つける方法論について議論する [11] [12]。

第2章 システム制御におけるモデル化

本章では、本研究の主内容である大規模システム制御およびそのためのモデル化技術に関して、これまでのシステム制御技術の歴史やモデル化状況について概説し、コンピュータによるシステム制御における制御モデルの重要性およびその人間との協調の必要性について考察する。

2.1 システム制御とは

システム制御とは、原子力発電所や太陽光発電所などの電力・エネルギーインフラ、新幹線網、在来線網などの鉄道インフラ、上下水道システムやバス網などの都市インフラ、高速道路や道路管制システムなどの道路・交通インフラ、工場・事業所を中心とした生産インフラなど社会基盤を形成する各種の大規模社会システムを安全にかつ効率よく稼働させることを目的としたコンピュータによる制御を指す。

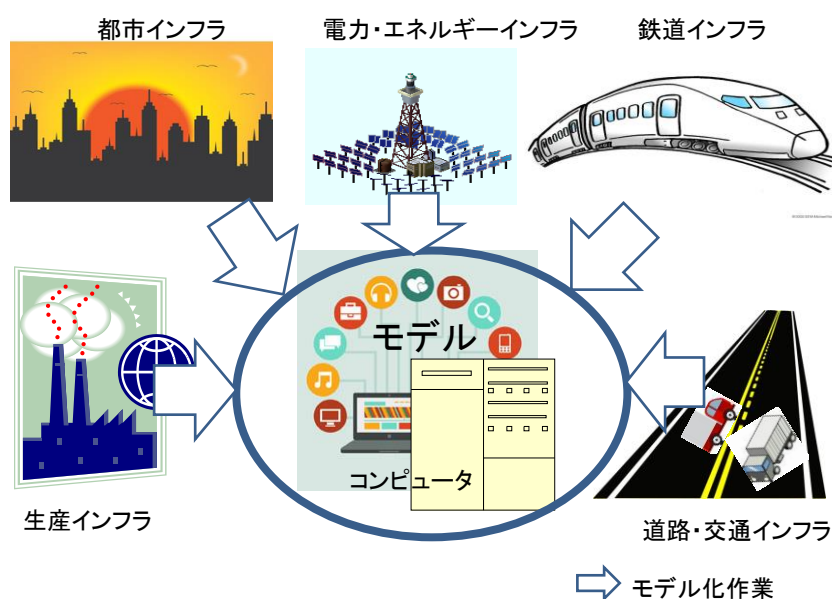


図2.1 大規模社会インフラのコンピュータ制御のためのモデル化

この大規模社会システム運用のためのシステム制御の特徴は、次のものである。

- (1) オンライン：制御対象プラントと直接的に接続され、24時間連続稼働が前提。
- (2) リアルタイム：切れ間なく上がってくるセンサーデータその他から、制御対象の状態を推定し、操作量を連続的に変化させて対象を安全な運転状況に保つことが目的。
- (3) オープン：社会全体をカバーする重要なシステムであり、その影響が及ぶ範囲を予め確定できない。

現代社会はこの大規模社会システムのコンピュータによるシステム制御なしでは、一日た

りとも成立しないということが過言でないほど社会生活に浸透している。これらの大規模社会システムをコンピュータによって制御するには、対象とする社会システムがどのような機器から構成され、どのような目的で運営されているかをコンピュータが理解できる形で教え込む必要がある。図 2.1 に示したように、システム制御の目的や、機器構成などをコンピュータの内部のモデルとして構成する過程をモデル化 [13] と呼ぶ。このモデル化では、伝統的に、システムの挙動を表現する数式の形が使われることが多かったが、最近の対象システムの範囲の広がりや関与者の多様化などによって、数式記述が可能であるという仮説が成り立たなくなっている。またモデル化自身の目的も、制御のためのアルゴリズム導出から、シミュレーションによる予測結果の人間への情報提供というように課題がシフトしつつある。これはシステム制御の目的が、制御の最適性を追求することから、人間との協調によるシステムの安定的な運用を行うという形に変化してきたことによる。

制御理論は、単純なフィードバック制御の時代から、システムの動作はある法則に従って規定されており、それは数式的に記述可能であることを前提にしていた。そして、その系を安定で望ましい方向に導くことを目的に外乱やノイズの影響をどのように取り除くかということに焦点をあてて構築され、人間が設計した機械装置や小規模システムに関しては、大きな成功を収めてきた。しかし自然現象や人間系を含むシステム制御に関しては、理論はもとより、構築方法論なども十分整備されているとはいえない。理由には、対象が複雑すぎて数式による記述ができない、環境が常に変化し最適制御が実現できない、制御目的そのものが時間とともに変化する可能性があり、またそれを予測できないなど様々な要因がある。なかでも重要なものは、このような大規模システム制御では単一の制御目的を一意に定めることができず、制御そのものが複数の目的のバランスをうまくとってその時点で最も適切なシステム状態を作り出すことを要求される点にある。たとえば、鉄道システムでは、後続の列車が遅れている場合、先行列車を時間調整のために駅で待機させるという運転整理手段 [14] がよくとられるが、システムの目的をダイヤの遵守におくならば、これは採用すべき制御方策ではない。一方、乗客輸送の最大化が目的であれば、遅延列車を含めて、列車間隔の平準化が望ましい制御方策にはなるが、先行列車のあまりの長時間の待機は鉄道サービスという観点での乗客満足の点からは望ましくない。このように複数の目的をバランスよく満足させることをコンピュータ単独で行わせることはいまだ難しく、人間の運転指令員との協調によって、各列車をどのくらい待機させるべきかを決定する必要がある。この場合、コンピュータは、それぞれの制御方策（各列車の待機時間の設定）によって、総輸送量がどう変化するか、乗客満足度がどのように増減するかなどをモデルシミュレーションによって運転指令員に提示する役割を果たし、どの戦略を採用するかは人間が判断する事項となる。このように制御の目標が単一ではなく、目的間のバランスを図らねばならないという問題は、オープンな環境下で動作する大規模社会システムそのものに内在するものであり、さらにその解決のための手段が複数存在するという事実までも考慮した人間とコンピュータの協調をベースとした制御システムの構築が必要になる。

さらに、世の中がインターネットによってネットワーク化され、誰もが容易に多くのデータや情報を得ることができるようになってきている。これはこれまで限定的であったシステム制御の関与者が急激に増加することを意味する。関与者はそれぞれの利害得失を主張するので、関与者の増加はシステムの制御目的や企業の社会的責任などを必然的に多様化、複雑化する。これまで安定化、効率化に置かれていたシステム制御目的には、無公害化、低騒音化や絶対安全などが加わり、企業としての責任には周辺住民負担の公平化や補償の充実、コンプライアンス、CSR(Corporate Social Responsibility) の拡充などが加わってくる。それに加えて、社会に対する説明責任も厳しく問われるようになってきた。システム制御といえども、このような社会変化を考慮して、より多目的な制御を効率的かつきちんとした説明付きで行う必要性が増してきている。これを全てコンピュータに担わせることはできず、この意味でも説明責任を果たすべき人間と、説明材料を準備するコンピュータの協調が必然化してきている。このように大規模システム制御をめぐる社会環境は、近年特に大きく変貌しつつあり、データの可用性、量の増大を含めてシステム制御の形そのものを考えるべき時期に来ていると思われる。

この形を考えるにあたって、これまでのシステム制御の歴史を振り返ってみる。図 2.2 にこれまでのシステム制御技術の発展の歴史を示す。この図は、制御においてどの範囲のモデル化が必要となったかと制御の中心となる自動制御機器の種類の観点から整理したものである。

対象システムに関するモデルのみに基づき専用制御器で小規模の対象機器を自動制御していた時代には、フィードバック制御 [3] が主流であった。その後、制御対象に関する状態方程式が記述できるという前提のもとで最適制御理論 [15] が登場し、コンピュータの普及とともに成功を収めた。この時代の制御モデルの特徴は、対象が数式モデルで記述可能な良構造であり、制御の目的が効率化にあったという点にある。時代が進み、モデリング技術とコンピュータシステムの進展に伴って、プラントのみならず、その周囲環境までもモデル化の対象と考える適応制御 [16] や予見制御 [17] などが発展した。この時代には、制御対象そのものは悪構造化し、数式のみでは表現できなくなりつつあったが、それでも数式表現がその中心と考えられていた。本研究での「見る制御」は、数式を用いない予見制御のためのモデル化、「押し量る制御」は、適応制御の発展モデルと位置づけることができる。

対象システムの大規模化や多目的化に伴い、問題がさらに悪構造化し、もはや数式などでは表現できない状況に対して、人間の熟練者がもつ経験値をそのままコンピュータに移植しようとする知識工学 [21] が提唱された。この概念は最初、医療診断の分野での適用が進められたが、執筆者等によってシステム制御の場に持ち込まれ、知識制御として定着していった。本研究の「経験を活かす制御」はその代表例と位置づけられる。

今後の発展の1つは21世紀におけるコンピュータが取り扱えるデータ量の飛躍的拡大に求めることができる。過去の制御経験に関する大量のデータ蓄積をベースに、統計的な処理によってモデルを構築しそれに学習機能を付加することで、環境変化に対して対応的に成長す

る制御モデルの自動創成が可能になると考えることができる。本研究ではその方法論について、今後の課題として、まとめの章で方向性を明らかにする。

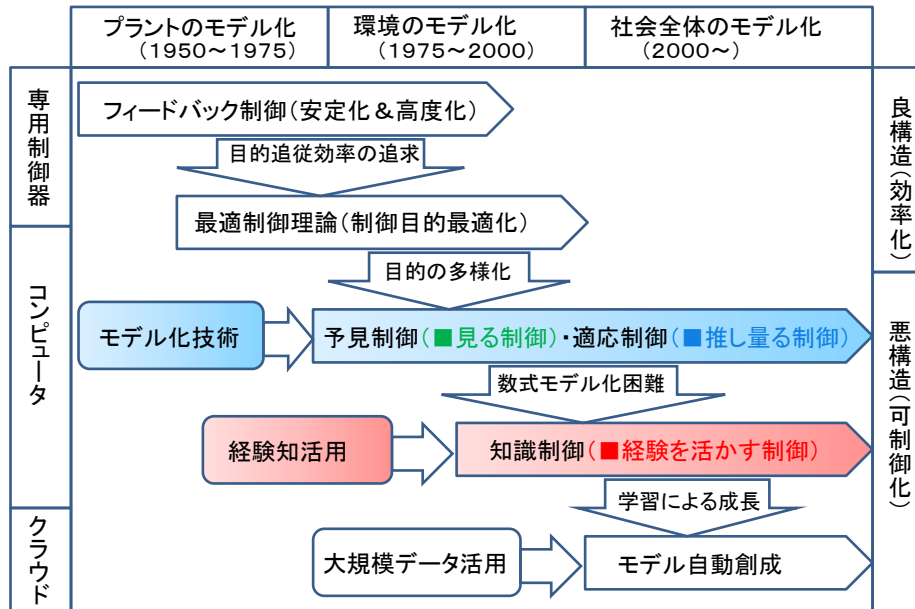


図2.2 システム制御技術の発展

2.2 システム制御におけるモデル化

コンピュータがシステム制御に導入されることにより、対象となるプラントを含むリアルな実世界ーフィジカル世界ーに加えて、それをコンピュータ内に再現したモデルを含むコンピュータ内の世界ーサイバー世界ーが創造された。サイバー世界とは、コンピュータが制御アルゴリズムを考えるベースとなる模擬世界である。このサイバー世界をコンピュータ内部に構成するのがモデル化の役割である。図 2.3 はシステム制御の発展の状況をフィジカル世界とサイバー世界の対比という観点から、システム制御におけるコンピュータの役割という形で整理したものである。

専用制御器の時代は、制御装置を含めてすべてがフィジカル世界に属していた。この時代にもモデルという概念は存在したが、それは制御システム設計上の仮定として機器や対象システムの動作を数式で表現したもので、それに基づいて、フィードバック制御系の設計がなされた。コンピュータの時代に入って、コンピュータ内にフィジカル世界を形作るプラントモデルの概念が登場した。このプラントモデルがどこまでフィジカル世界を模擬できているかが制御の質を決めることになるため、モデリングが制御システム構築の重要な要素になった。しかしながら、コンピュータ制御の黎明期は、コンピュータの能力、記憶容量の制約から、簡単な数式モデルを扱うのがやっとという時代でもあった。この時代のモデル化アプローチは、現象をどのように単純化すれば、計算負荷を減らしつつ現象をどこまで忠実に再現できるか、ということが中心に置かれていた。

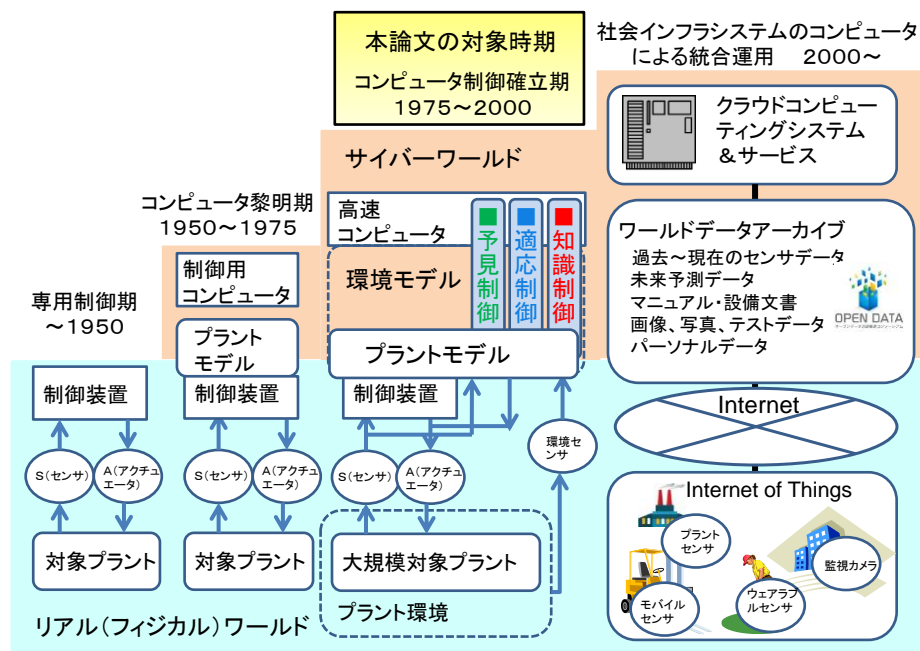


図2.3 コンピュータ制御でのモデルの進化

コンピュータの能力の向上、記憶容量の拡大に伴い、コンピュータ制御は重要性を増し、その確立期に入ったが、この時代においても、コンピュータのサイバー世界内にフィジカル世界をそっくり持ち込むのは容易ではなかった。この時代のモデルアプローチにおいては、現実世界をある視点で切り取り、それをサイバー世界内で表現するものであり、モデル化において最も重要なのは、解決すべき問題に対して、必要十分な部分を取り出し、さらにそれらを単純化・抽象化する過程で、制御の目的に合ったモデルをサイバー空間内に構築することであるという考え方が主流であった。このため、数式モデルが多用され、またそれをベースとして様々なアルゴリズムが工夫されてきた。さらなるコンピュータの発展は、対象プラントをサイバー空間内で模擬するだけでなく、その周囲の環境を含めてモデル化することを可能し、また適応制御や予見制御など未来の状態の予測に基づく新しい制御方式が研究開発され、制御の質の格段の向上がみられた。また大規模システムに関しては、システムの稼働性を高める工夫として自律分散 [18] という概念が提唱され、鉄道システム [19] を含む各種システムに適用された。これは相互の独立的なサブシステムの集合体と認識される大規模システムにおいて、一部のサブシステムの故障が全体システムに波及することがないようにするという新しい制御概念であった。自律分散の当初の応用は、ネットワークを構成するノードやルートの一部が故障しても、データが他のルートを経由して確実に目的地に届くことを保証するプロトコルを設計する、というものであった。これはシステムの自律性を高める概念として、共生自律分散コンセプト [20] という形で今日にも受け継がれている。このように、サイバー世界に対象システムの制御に必要な多くのモデルを構築し、それを用いて高度な制御を実現することで大規模なシステム制御が次々と実現された。この発展過程で

は、サイバー世界のモデル化が、コンピュータ制御実現のための重要な役割を担っており、それなしに今日の大規模システム制御の実現はなかった。対象プラントが数式で表現できる場合、すなわち多くの人工的なシステムの制御にはコンピュータは高い制御能力を発揮することが証明されたが、それ以外、すなわち数式モデル化が困難な、人間系や自然系を含む大規模システムではコンピュータの活躍の場は長らく限られていた。たとえば大規模システムの不具合の診断などは、センサーの不足などもあって、人間の熟練オペレータが経験に基づいて行わざるを得ないという状況が続いた。それを解決したのが、人工知能の一種である知識工学 [21] とそれをベースとしたエキスパートシステム [22] [23] の開発である。通常、病気の治療にあたっては、人間の身体の仕組みや病原体のふるまいなどから病気の発生メカニズムを模擬できる感染症モデルの確立が必要である。医師は多数のそれらのモデルを考慮しつつ、患者がどの感染症に罹患しているかを見極めていく。知識工学をベースとするエキスパートシステムでは、病気の原因を確定するために、医師そのものをモデル化する。医師が診断を行う診断過程、すなわち体温が高いか、咳はでるか、痛みはあるかなどの症状から原因を推定するプロセスをモデル化しようとするものであった。本来は必要な感染症モデルを構築することなくとも、高度な診断を行うことができることがわかり、医療の分野で実験的な成功をおさめたことから、他の分野にも急速に展開された。システム制御もその例外ではなかった。このモデルは、人間との親和性という面では極めて優れたものであり、従来の数式モデルでは表現できない知識、ノウハウなどをコンピュータのサイバー世界に取り込む方法論が確立したといえる。システム制御はこのようにモデル化技術とそれに基づく制御アルゴリズムの高度化という形で展開されてきた。本論文で取り上げたシステムはいずれもこの時代に開発・実用化されたものである。

21 世紀に入り、ビッグデータ [24]、Internet of Things [25] などのデータ集積・活用の技術が進展し、図 2.3 の右端に示したような Internet に結合された様々なものから集められた世界中のデータをワールドデータアーカイブに格納し、それを処理できるクラウドコンピューティング&サービスをプラットフォームとして、大規模社会インフラシステム同士を緩く結合して、相互連携させることなどが夢物語ではなくなりつつある。なかでも集められた大量のデータから学習型の制御モデルを創成できるという可能性は、さらなるシステム制御の高度化を促すキーファクターとなることが期待できる。

本研究では、このシステム制御におけるモデル化の歴史を踏まえ、図 2.4 に示す「人間との協調を実現するための大規模システム制御向け実用モデル化技術の開発」という研究課題を設定した。人間とコンピュータの協調において特に重要なものは、限られたセンサー情報からでもコンピュータがシステムの全体像や稼働状態の可否などを的確に推定し、人間にその結果をタイムリーに知らせることで、人間が総合的に的確な制御判断を行えるようにすることである。そのため、本研究では、「何が起きているかを知らせる」という観点からプラントの状態を推定する物理モデルの開発、「今後どのように変化するかを知らせる」という観点から、自己回帰型自律分散的制御モデルの開発、「熟練者のやりかたを知らせる」という観

点から、エキスパートシステムモデルのシステム制御への適用、の3つの人間協調のための
 実用モデルの開発を行い、それぞれ下水処理システム、多段ダム制御システム、高炉操業シ
 ステムに組み込み、実用に供した。

人間との協調を実現するための大規模システム制御向け 実用モデル化技術の開発

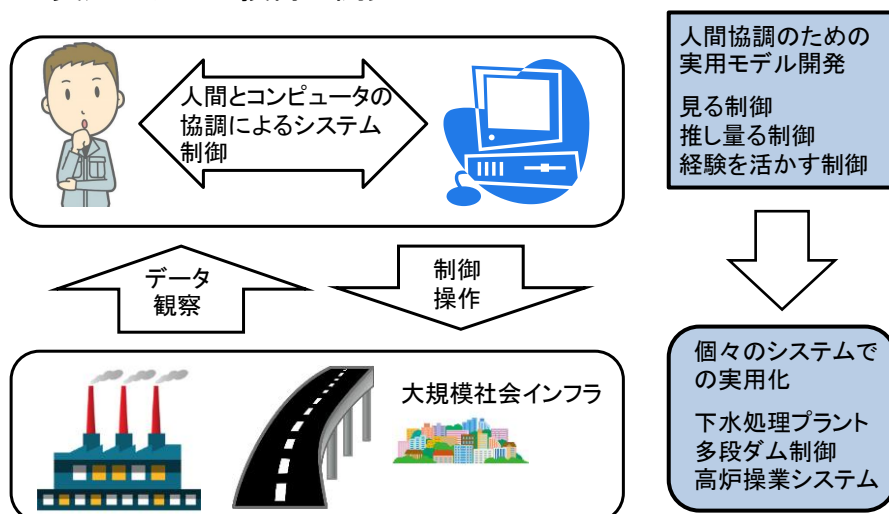


図2. 4 研究課題

2.3 人間との協調の必要性和その形態

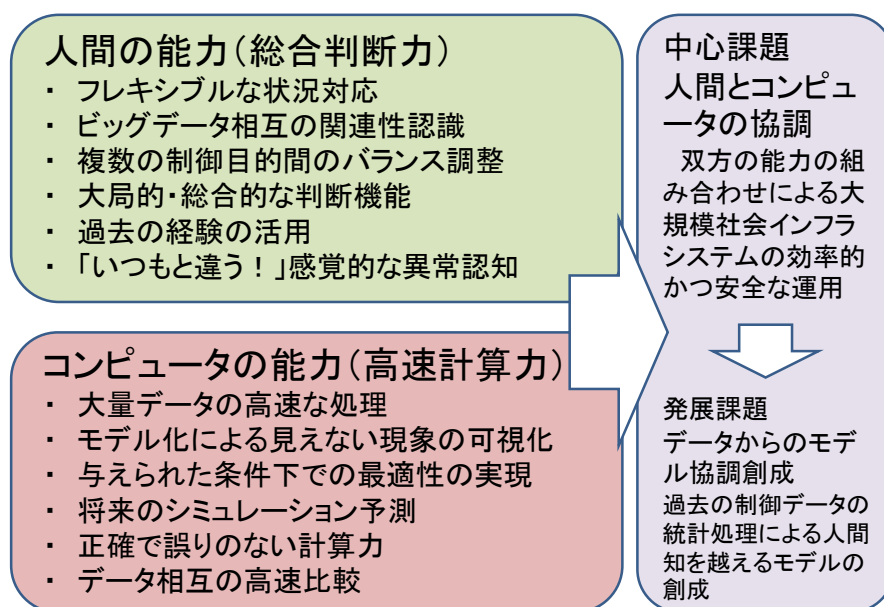


図2. 5 人間とコンピュータが協調することの重要性

システム制御の目的は、対象となる大規模社会システムを安全に効率よく運営すること
 ある。意思決定者となる人間とうまく協調し、その意思決定のための情報処理サポートを行

うことがコンピュータに最も要求される事項となる。すなわち人間が意思決定するために必要な情報をタイミングよく、的確に届けことがコンピュータの役割である。図 2.5 に示したように、人間は、フレキシブルな状況対応、「いつもと違う！」感覚的な異常検知など総合判断力に優れている。一方コンピュータはその高速計算力によって、大量のデータの高速な処理や将来のシミュレーション予測などに力を発揮する。この両者の長所を組み合わせることによって、大規模社会インフラを効率よく安全に運用するためのモデルを考えることが本研究の中心課題である。具体的には対象システムが現在どのような状況にあるかをオペレータが理解しやすく示すモデル、事故などの異常事態においてもロバストネスを確保し、将来予測に基づく沈着な決断を可能とするモデルの開発である。

本研究では、図 2.6 のような人間とコンピュータの協調に関して3つのありかたについて考察した。

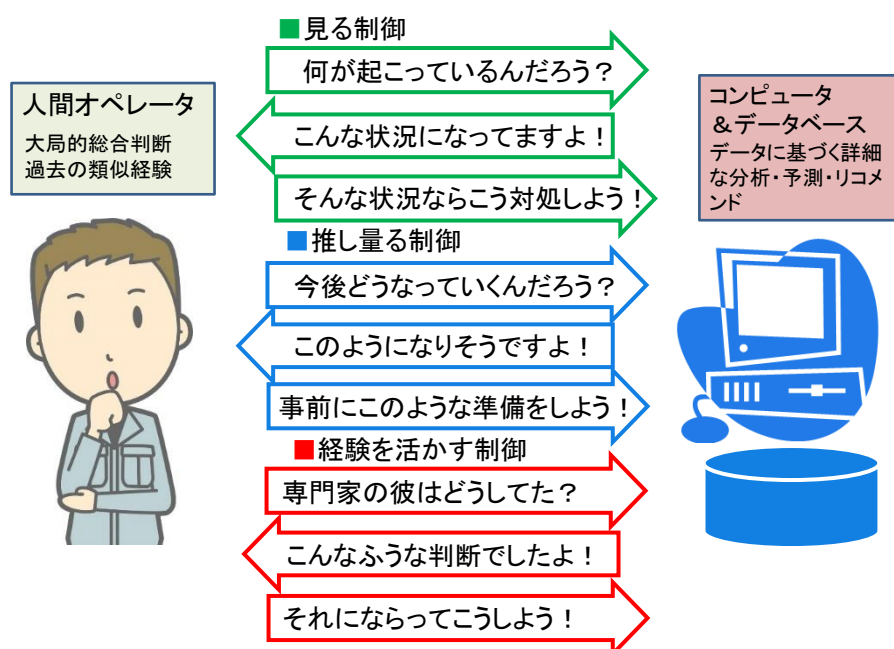


図2.6 人間とコンピュータの3つの協調の形態

第1の形態は「見る制御」である。センサーが限られていて、プラントの状態がよくわからないとき、状況を人間に分かりやすい形でビジュアルに提示することで、プラントの運転を容易化することが目的である。簡単に言えば、プラントの状態がよくわからないとき、「何が起きているんだろう？」とコンピュータに問い合わせると、「こんな状況になっていますよ！」と状況推定を視覚的に表示してくれるというものである。コンピュータが数値に裏打ちされた視覚的な情報をタイムリーに提供することによって、人間オペレータはその状態を生じさせた原因を知り、その状況において最適な制御動作を的確に選択できるようになる、というのが「見る制御」における協調の形である。第3章で述べる下水処理においては、最終沈澱池の汚泥の現在の分布状況を、コンピュータによるシミュレーションによって視認で

きるようにした。これによって、現在の最終沈澱池において汚泥と処理水の分離がどの程度進んでいるか、どの程度の濃度の汚泥が越流しているか、その越流は下水量の過多によるものか、汚泥の性質変化による沈殿不足によるものかなどを瞬時に判断することができる。人間の判断能力は視覚化によって大きく高まることを活用したアプローチといえる。このことは汚泥の越流を防止するには下水の受入量を制限すべきか、それともこの程度の越流なら下水の処理量を優先すべきか、また汚泥の性質改善のために曝気風量を適正化するのがよいかなどの、適用すべき制御動作のオペレータによる選択を極めて容易化する。またその制御を行った結果は、同じシミュレータを用いることによって事前に検証することも可能となり、これによって更に確実な制御動作の選択ができる。汚泥越流を起こさないようにすることと、下水の処理をできるかぎり多く行うことはある意味では相反する目的であり、その時点での状況（たとえば降雨の後で下水流入量の増加が予想される状況、放流河川の BOD が増加していて、これ以上の汚泥流出は避けなければならない状況など）によって適宜優先すべき目的を設定し、そのための制御動作の選択が必須となるが、コンピュータ単独ではこの判断が難しく、人間オペレータとの相互協調を可能とするモデル化が必須となる。このような人間とコンピュータがビジュアル表示を通してプラント理解を深め、協調してよりよい制御を実現することが、本研究での第一の人間協調スタイルとなる。

第2の形態は「押し量る制御」である。これまで集中制御されていた複合プラントが事故などによってサブプラント毎に個別の制御を余儀なくされたときでも、それぞれのサブプラントの安全に運転するためのしかけの構築が目的となる。サブプラントへの入力、外乱などがどのような状況になるかがわからないとき「今後どうなっていくんだろう」との設問に対して「このようになりそうですよ！」という回答があると、それへの対処を先行的に考えることができるというものである。サブプラント同士が相互に影響を与えあう大規模プラントの制御では、すべてのプラント情報を一か所に集め、全体的な最適制御計算によって個々のサブプラントの制御動作を決めることが多い。しかし、そのような全体最適化が実行できなくなったときには、個々のサブプラントでそれぞれが集めうるデータに基づいて自己の制御動作を決めなければならない状況に陥る。その状況において個々のサブプラントを制御するコンピュータが入力や外乱の予測値をモデル計算し、その計算結果を人間のオペレータがモデル計算結果の良し悪しを含めて総合的に判断して適切な制御動作を決める、というのが「押し量る制御」における協調の形である。第4章で述べる多段ダム制御においては、それぞれのダムの制御を担当するコンピュータに、各ダムへの流入量をモデル計算し、その予測値を人間のオペレータに提示できるモデルを装備した。これによって、現在のダム水位からみて満水までにどの程度の時間的余裕があるか、また満水に達した時点でダム本体にどの程度の危険が予測できるか、事前に先行放流をしておく必要があるかなどを個々のダムサイトにおいて計算することができるようになった。非常時にこれを稼働させることによって、単独でのダム制御を効率的に行えるようになる。人間の判断能力は将来の予測値を事前に知ることによって大きく高まることを活用したアプローチといえる。このことは今後流入量の増加が

予想される場合にどの程度の事前放流を行うべきか、今後の流入量が減少することが予測されるなら、ダム の耐性をふまえてどの程度まで満水超過が許されるか、ダムを通常満水に復帰させるのはどの時間帯で放水を停止すべきかなどの、適用すべき制御動作のオペレータによる選択を極めて容易にする。また今後の天気予報やその他の情報を加味して、コンピュータの予測に適宜修正を加えることは、人間のみが行えるオペレーションである。ダム本体が危険な状況に立ちいたらないことを前提としつつも、洪水時にはできるかぎり放流して受入余裕を増やしておくことと、洪水通過後は通常満水をキープするということは相反する目的であり、個々の時点での総合的な判断によって適宜優先すべき目的を設定しなおすことが必須となるが、コンピュータのみではこの判断が難しく、人間オペレータとの相互協調を可能とするモデル化が必須となる。

第3の形態は「経験を活かす制御」である。人間の専門家しかうまい制御ができないという対象がある。巨大な望遠鏡の鏡を数ミクロンの誤差で球面仕上げするなど職人技と呼ばれている分野などがそれにあたる。この職人技をコンピュータに教えこみ、そのコンピュータがその技を保存・伝承することができないかを探るのが目的となる。なぜうまく切削ができないかが分からないとき、「専門家ならどうするだろう」との設問に対して「このようにしていましたよ!」という回答を与えようというものである。それによって「それにならってこうしよう」という形をとることができる。この仕組みは自分自身の制御操作を反復する、たとえば「あのときなぜうまくできたのだろう」という設問への回答にも活用でき、応用範囲は広い。コンピュータに熟練オペレータのノウハウをインプリメントしておき、育成中の人間オペレータにその状況において最適な制御動作をアドバイスするとともに、そのアドバイスがどういう理屈に基づくものかを説明できるようにする、というのが「経験を活かす制御」における協調の形である。第5章で述べる高炉操業システムにおいては、高炉操業の専門家の運転ノウハウをコンピュータにルールとオブジェクトの形で埋め込み、高炉につけられた各種のセンサーからのデータをベースとして、専門家並みの判断で、不具合状況の検知と、その対策を立案できるようにした。これによって、今高炉はどのような運転状況にあるか、出来している不具合はどのようなものか、あるいはどのような不具合が生じそうか、出来した不具合に対してどのような手をうつべきかなどのアドバイスを与えることができる。人間の判断能力は、適切な教育によって大きく成長することを期待したアプローチといえる。このことによって、専門家が不在であっても、専門家と同様の判断を示すコンピュータがそばに控えるという形になるため、経験の浅いオペレータに最適のOJT環境をつくることができる。また専門家にとっても、日々のオペレーションの過程で気づいたことやノウハウを、コンピュータに自然な形で記録することができ、それを長期に保存することもできる。これらによってよりよい高炉制御のノウハウを蓄積することができる。高炉を安全にかつ効率よく操業することと、経験の浅いオペレータに運転を任せて教育を行うことはある意味では相反する目的であり、これを、コンピュータを介して両立させることができるのは人間協調のひとつの形となる。

以上の3つの課題では、それぞれのシステムにおいて人間とコンピュータが協調するために必要となるモデルを導出することを中心とした取り組みを行った。またそれぞれに対して必要なプログラム開発及びシステムとりまとめを行い、実用システムとしての展開を試みた。本研究で設定した課題と解決方針をモデル化の視点から図 2.7 にまとめる。

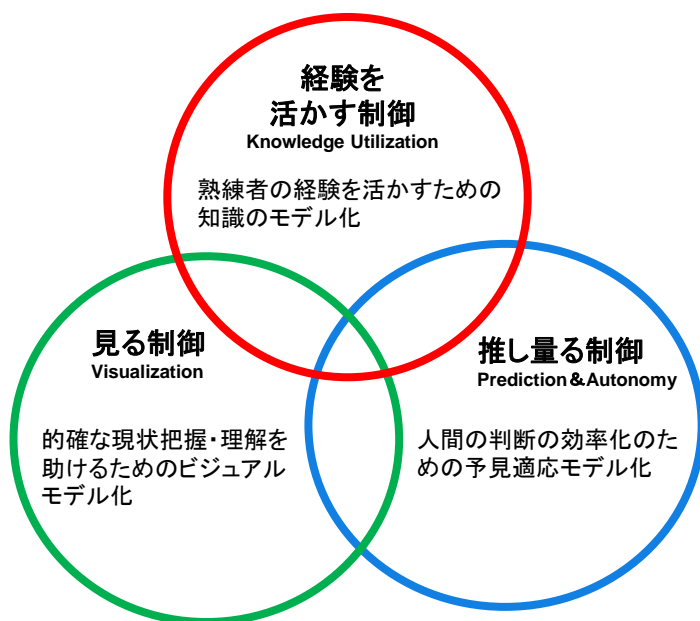


図2.7 研究課題の整理と解決方針

第3章 見る制御—大規模プラントのビジュアル化モデル

物理、化学、生物など複雑な現象の組み合わせから構成される大規模プラントでは、そのプラントがどのような状態にあるかを、プラントを制御する人間オペレータが一目で把握することができるようにすることがシステムの安定化には重要である。このためコンピュータ内にプラントの状況を推定できるモデルを構築し、そのモデルの推定結果をオペレータにタイムリーに提示するという形で、オペレータとの協調による高度で安定な制御を実施できるようにすることが必要となる。本章ではこのようなプラントとして下水処理場を取り上げ、プラント内の汚泥の動的分布状況をビジュアルに確認できるモデルの構築方法について論じる。このモデル化によってオペレータの視認性が大きく高まり、下水の処理水質を大きく向上させることが可能となる。

3.1 プラントのビジュアル化

プラントオペレータにとって、プラントの現状を正確に把握することは、制御の安定化のための必須の要件である。しかし多くのプラントではセンサーの種類や数の制約によってその要件が満たされない。そのため数少ないセンサーデータからプラントの現状を推測できるビジュアルモデルの開発が強く望まれる状況にあった

- 課題 (1) 下水処理活性汚泥処理プロセス: 汚泥総量とその所在把握が最重要な制御項目であり、水質悪化の主因である最終沈澱池からの汚泥越流防止も大きな制御課題であった。
- (2) センサーでは捉えきれない汚泥量や分布を可視化するためコンピュータとの協調が不可欠と考えられた。

解決方針

- ・主要プロセスである曝気槽、最終沈澱池での汚泥の動特性
- モデル構築
- ・モデル計算を通して、汚泥の分布をビジュアル化
- ・オペレータの視覚的現状把握によって運転操業を容易化



イメージ図: 大規模下水処理場

図3.1 見る制御のための問題の設定

図 3.1 に示したように、大規模下水処理場は、見る制御を必要とする代表的プラントである。このプラントにおける課題は、プラント内の汚泥総量の把握とその所在分布の確認が最重要な制御課題であるにもかかわらず、測定できる項目が、流入水、処理水などの流量と

一部の汚泥濃度に限られていること、処理水に交じって越流する不沈降汚泥が水質悪化につながるにもかかわらずその状況を把握することが困難であることにあった。特に最終沈殿池の汚泥の分布状況の把握は必要不可欠と考えられていた。そこで主要プロセスである曝気槽、最終沈殿池での汚泥の分布動特性を把握するためのモデルを構築した。

活性汚泥プロセスの代表的構成を図 3.2 にその機能を図 3.3 に示す。

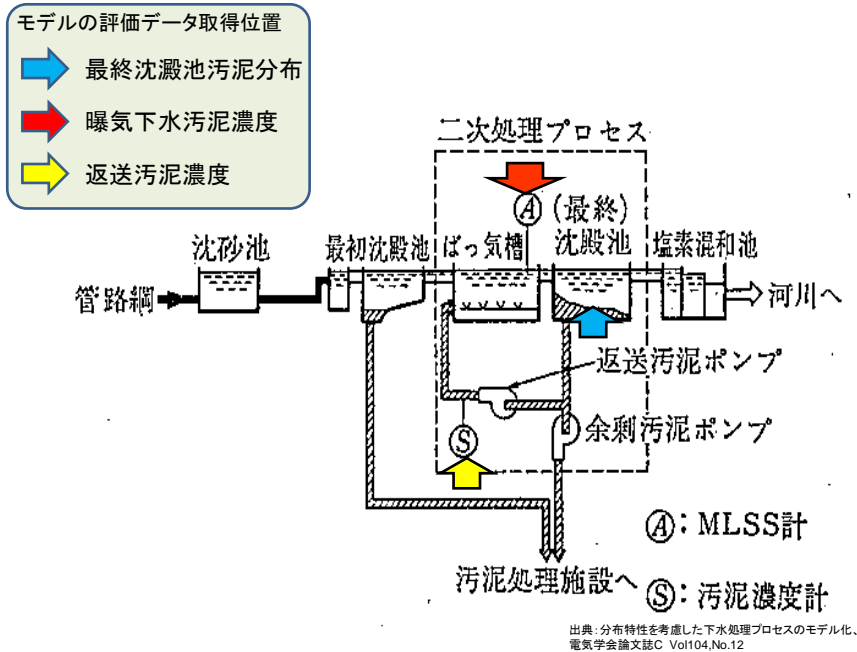
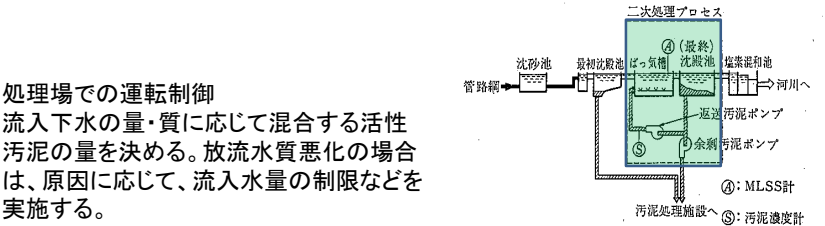


図3. 2 活性汚泥下水処理プラント



一次処理 プロセス	沈砂池	下水中の砂などの重量物を沈降分離
	最初沈殿池	下水中の無機物、有体物を沈降分離
二次処理 プロセス	曝気槽	活性汚泥と下水を混合し空気攪拌することで好気性生物反応によって下水中の有機物を汚泥に摂取除去
	最終沈殿池	曝気混合した下水(曝気下水)を沈殿作用によって、放流する処理水と再利用する活性汚泥に分離。活性汚泥の大部分は曝気槽に返送されて下水と再混合。沈殿分離がうまくできないと汚泥の流失などが生じる。
高次処理 プロセス	塩素混和池	殺菌のために処理水に塩素混和処理を行い放流。さらにリン除去などの高次処理を行う場合もある。

図3. 3 活性汚泥下水処理の機能

管路網で集められた下水は、沈砂池、最初沈澱池で砂などの重量物、無機物および固形有機物を分離された後、曝気槽に流入する。曝気槽では最終沈澱池から返送される活性汚泥と混合され、同時に曝気（下水に空気を吹き込み攪拌する）される。この過程で、有機物が活性汚泥によって消化され取り除かれる。この曝気された水と汚泥の混合下水は最終沈澱池に入り、自然沈降により処理水と汚泥に分離される。処理水は滅菌後、河川放流されるが、汚泥はサイホン管などにより沈澱池底部から引き抜かれ、その大部分は再び曝気槽に返送され、一部は余剰汚泥として系外に廃棄される。この下水浄化の主要機能は、曝気槽と最終沈澱池から成る二次処理プロセスにある。この二次処理プロセスでは、処理水の有機物濃度の低減を目的とし、返送すべき汚泥（返送汚泥）量および系外に廃棄すべき汚泥（余剰汚泥）量を制御する。この制御は

- (1) 操作量である活性汚泥が外部から供給されずプロセス内で再利用される。
- (2) 再利用までの時間遅れが極めて長い。通常は、曝気槽に返送投入された汚泥は、約 10～12 時間後に最終沈澱池から引き抜かれる。
- (3) 操作量の変化が制御量に変化を与えるまでの時間遅れも極めて長い。

などの点で通常の制御と大きく異なり、将来を見越した予見制御の採用が必須となる。更に、

- (1)、(2)項の意味でこの予見制御実現のためには、系内の汚泥量の把握およびその将来値の予測が可能なプロセスモデルの開発が必要となる。またプロセス状況をよく把握・理解し、より高度なプロセス制御を実現するためには、プロセス内の汚泥の分布状態を的確に表現するモデルが必要であった。

3.2 分布特性を考慮した下水処理プロセスのモデル化

都市下水の有機物処理 [26] に多用されている活性汚泥プロセス [27] の効率向上のためには、プロセス内の総汚泥量の制御 [28] が重要である。総汚泥量制御の目的は、曝気槽と最終沈澱池内の汚泥量の把握、およびその最適配分による高効率な汚濁負荷除去を実現することにある。人間のオペレータにとって、適切な制御方策を立案し処理水質を良好に保つためには、プロセス内の汚泥の分布状態を忠実に再現するモデルが必要不可欠である。これは系内の汚泥の的確な把握という意味のほか、処理場からの汚濁負荷のかかなりの部分（一説には 40～70%）を占めると言われる最終沈澱池越流汚泥（処理水混入汚泥）の制御が分布特性モデルの開発によってのみ実現可能となるからである。今までにも、下水処理プロセスのモデル化は数多く行われてきている [28] [29]。

その主なものとしては、

- (1) 曝気槽を完全混合槽モデル、最終沈澱池を集中定数系モデルで近似するもの [28] [29]
- (2) 曝気槽、最終沈澱池とも集中定数系で近似するもの [33]

などがある。しかし、いずれもプロセスの汚泥の分布状態の表現はもとより系内の汚泥量の把握が不十分で、総汚泥量制御には不向きであった。本研究ではプロセスの状態を表現する偏微分方程式系に対して流体力学でいう半離散化 [30] の考え方を適用し、分布特性表現を

保ちつつ、かつ計算容易な簡易モデルを導出する方法を提案し、導出できた具体的モデルを評価する。

この下水処理プロセスモデルを開発するうえで利用可能なデータは極めて限られており、曝気槽流出量、曝気槽流出水汚泥濃度（図 3.2 の赤矢印の A の MLSS 計）、返送および余剰汚泥の流量および濃度（図 3.2 の黄矢印 S の汚泥濃度計）のみである。従って、上記のようなプロセスモデル開発には、プロセスの構造や汚泥の動特性などの現象に関する先見知識に基づいて導出した物理モデルが適当である。数学的な観点からは、プロセス内の現象は偏微分方程式系で記述されるが、そのままではこれを扱うことは計算技術上、非常に難しい。そこで、プロセスのもつ汚泥の分布特性をできる限り損なうことのない物理モデルを導き出すことが重要となる。そこで、下水処理プロセスにおける輸送混合特性に着目して簡易モデルを導出する。曝気槽の場合は、押し出し流れに曝気による強制混合効果を加えた完全混合槽列モデルを、最終沈澱池に対しては押し出し流れと沈殿とを結合した汚泥柱概念に基づく移動座標系モデルをそれぞれ導いた。両者の表現形式は、槽池の特性を反映して異なるものの、分布特性の表現としてはどちらもラグランジュタイプの押し出し流れを基本としたものになっている。このモデル化によって、これまでは漠然としか捉えられなかった系内の汚泥分布を定量的に把握することができ、オペレータとコンピュータの協調的オペレーションを可能にすることができる。

3.3 曝気槽のモデル化

曝気槽内での汚泥は、流入水による出口方向への輸送、曝気による機械的攪拌、有機物摂取による増殖および自己酸化による消滅など多くの要因に影響され、複雑な動特性を示す。また、その濃度は槽内の場所により異なり、分布定数系プロセスとして次の偏微分方程式で記述される。このとき曝気槽入口に原点をおき、流れ方向の x 軸、横方向に y 軸、高さ方向に z 軸を設定する。

$$\frac{DS}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) + PS \quad (1)$$

ここで、 $\frac{D}{Dt} = \left(\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \right)$: 実質微分, K_x, K_y, K_z : 乱流拡散係数,

u, v, w : 輸送速度, P : 生物反応による実質汚泥増殖係数, S : 汚泥濃度

上式を簡略化するうえで次の仮定を置く。

(1) 曝気槽の横方向および深さ方向の濃度を一様とする ($\partial S / \partial y = \partial S / \partial z = 0$)。この仮定は、曝気槽の流下方向の長さは横方向、深さ方向に比べて十分長いこと（例えば 300m に対し 5 m、6m）、曝気は区間ごとに圧縮空気を流下と垂直方向（横旋回流方式）で行われるため、区間内は完全混合に近く攪拌されること、などからみて妥当と考えられる。

(2) 曝気槽流下方向の拡散を無視する ($\frac{\partial}{\partial x} \times \{ K_x \left(\frac{\partial S}{\partial x} \right) \} = 0$)。この拡散は、主として曝気によ

る乱流生成によって誘起される。通常の曝気は上述のように横旋回流方式によっており、これによる拡散は下水処理水の流下輸送速度に比べて十分小さいこと、輸送方向およびその逆方向の拡散がほぼ同量と見なせることから、この仮定も是認できる。通常の横旋回流式曝気槽では上記の仮定は普遍的に成立すると考えてよい。

上記の仮定に基づくと、(1) 式は次のように簡略化できる。

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -u \frac{\partial S}{\partial x} + PS \quad (2)$$

ここで、 u : 流速(m/h), S : 汚泥濃度 (mg/l), x : 入口からの距離(m), t : 時間(h),
 P : 増殖係数(1/h)

3.3.1 輸送モデル

(2) 式において右辺第 1 項は輸送項、第 2 項は増殖項である。この 2 つは分離して取り扱うことが可能であり、まず輸送項について考察する。輸送項を差分化すると次式を得る。

$$\frac{\partial S(x,t)}{\partial t} = -\frac{u}{\Delta x} \{S(x,t) - S(x - \Delta x, t)\} \quad (3)$$

更に時間変化項を差分化し並べ替えると

$$S(x, t + \Delta t) = S(x, t) \left\{ 1 - \frac{u \Delta t}{\Delta x} \right\} + S(x - \Delta x, t) \frac{u \Delta t}{\Delta x} \quad (4)$$

(3) 式は母数を $u/\Delta x$ とするポアソン過程の基礎式であり、汚泥の動的挙動の上記簡略化差分表現はポアソン過程を与えることになる。更に (3)、(4) 式を別の観点からみると、点 x の周囲 Δx の区間 $[x - \Delta x/2, x + \Delta x/2]$ の濃度は速度 $u/\Delta x$ をもつ押し出し流れと、それに続く完全混合により記述できることになり、完全混合槽列モデルでの近似の有用性が示唆される。

完全混合槽列モデル [31] は、図 3.4 に示すように曝気槽を N 個の完全混合槽が直列に連結されたものとみなし、各槽間の物質移動を押し出し流れで、各槽の濃度を槽ごとの物質収支から定めるものである。このモデルの仮定の下では、(3) 式は次の常微分方程式の形に変換できる。

$$\frac{dS_n}{dt} = -\frac{Q}{V_n} (S_n - S_{n-1}) \quad (5)$$

$$\frac{dS_1}{dt} = -\frac{1}{V_1} (Q_R S_R - Q S_1)$$

$$S_{out} = S_N$$

ここで、 S_n : n 番目の完全混合槽濃度, V_n : n 番目の完全混合槽容積,

Q : 曝気槽への流入水量 ($= Q_0 + Q_R$), Q_R : 返送汚泥流量, Q_0 : 下水流入量,

S_R : 返送汚泥濃度, S_{out} : 曝気槽出口汚泥濃度

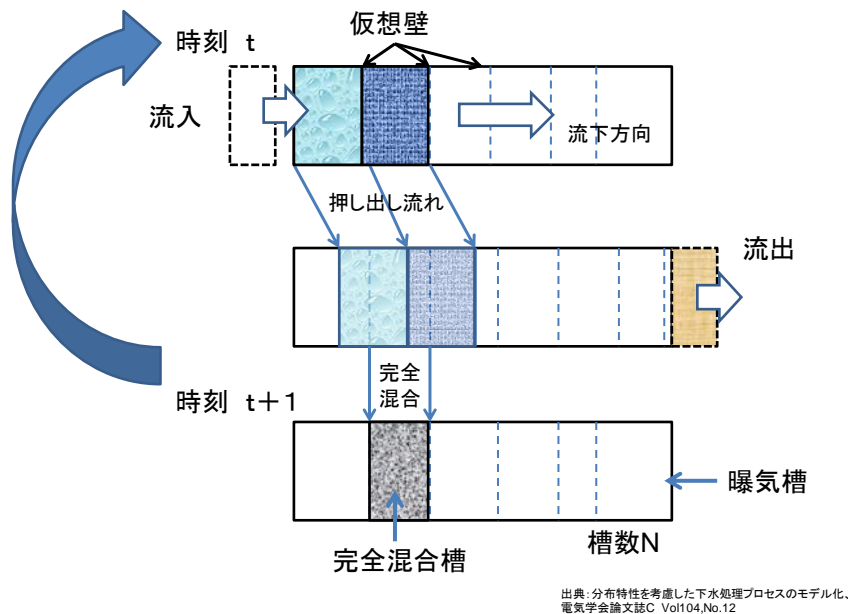


図3. 4 完全混合槽列モデル

曝気槽流速 u は、流入水量 Q に基づき次式で定める。

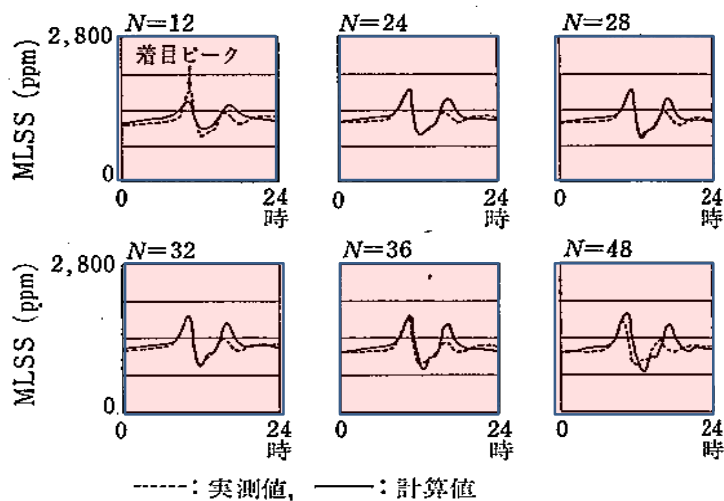
$$u = Q/W \times h$$

ここで、 W ：曝気槽の横長、 h ：曝気槽深さ

上記モデルは (3) 式での微小区間 Δx を完全混合槽という比較的大きな区間に置き換えているため、どこまでこの仮定が成立するか、すなわち完全混合槽数 N の決定が重要である。以下、これを実際の処理場から得たデータに基づき考察する。曝気槽を N 個の等容積 V の完全混合槽に分割したとき、入口での投入汚泥量 S_0 に対する出口濃度 S_N のインパルス応答は、流入水 Q が一定の場合、(5) 式のラプラス変換から容易に求められ [31]、

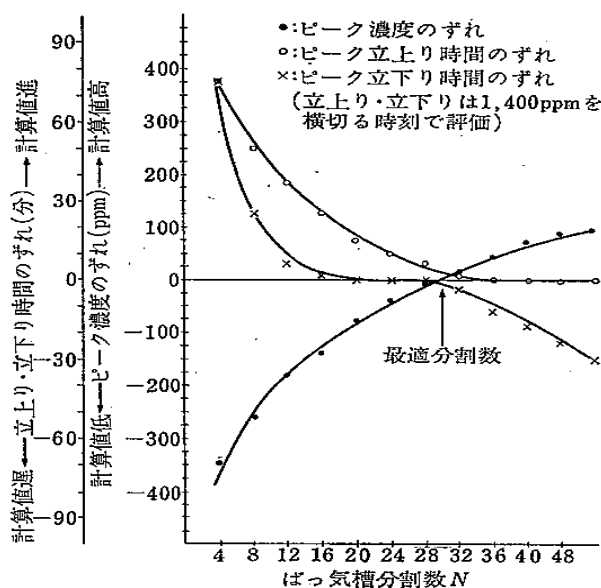
$$S_N(t) = \frac{S_0 N^N}{V(N-1)!} \left(\frac{Qt}{V} \right)^{N-1} e^{-\frac{NQt}{V}} \quad (6)$$

上式から明らかなように、 N の増加につれて立ち上がり時刻が遅れ、ピークが高くなる傾向がある。従って、実データを基にした槽数決定には、立ち上がり時刻とピーク濃度の 2 点に注目するのが良い。この観点から実際の処理場のデータに基づくシミュレーション解析を行った。対象とした処理場は、曝気槽体積 10000 m^3 、日最大時間流入量 $3000 \text{ m}^3/\text{h}$ である。曝気槽の分割数に応じたシミュレーションの結果を図 3.5 に示すが、分割数 28、32 のときの一致度が良好であることが観察される。



出典: 分布特性を考慮した下水処理プロセスのモデル化、
電気学会論文誌C Vol104, No.12

図3. 5 槽数Nに関する曝気槽出口計算濃度



出典: 分布特性を考慮した下水処理プロセスのモデル化、
電気学会論文誌C Vol104, No.12

図3. 6 槽数Nに関する曝気槽出口計算濃度の評価

立ち上がり時刻、ピーク濃度の実測値、計算値との差をグラフ表示した結果を図 3.6 に示す。この結果からこの処理場の場合、分割数 30 の時の一致度が最も良いと結論できる。また図 3.6 は (6) 式で示される傾向との良い一致を示している。この分割数 30 のとき、1 つの完全混合槽体積は約 330 m^3 である。一方、この解析に用いた計算単位時間 5 分間の流入水量は最大時約 250 m^3 であるため、槽体積／計算単位時間最大流入量比は 1.3 となる。この比自体はシミュレーション条件ならびに用いるデータにより若干変化するが、種々の解析実験の

結果からほぼ 1～1.5 の範囲に安定的に入っており、大略の目安として、この範囲内の分割が良い一致を示すと考えてよい。

上記の分割の目安は、次のように物理的解釈ができる。処理場での曝気槽の流動特性を観察すると、多流入時には混合の少ない押し出し流れの性格が、逆に少流入時には完全混合に近い性格が現れる。この物理特性は、上記分割目安に従った分割時に計算上最も良く表わされ、物理的にもモデルとして適当であると結論できる。

3.3.2 汚泥増殖モデル

次に (2) 式の右辺第 2 項 PS、すなわち増殖項について考察する。汚泥の増殖は、一般に下水中の有機物および汚泥濃度の非線形関数として、生物学的理論考察より導かれた Monod [32] 形のモデル [33] [34] で記述される。

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{\mu_m C}{Y(K_s + C)} S + K_c K_d S$$
 (7)

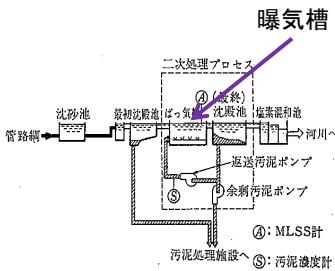
$$\frac{dS}{dt} = \frac{\mu_m C}{K_s + C} S - K_d S$$

ここで C：有機物濃度，S：汚泥濃度， μ_m, Y, K_s, K_d, K_c ：モデルパラメータ（表 3.1 参照）

(7) 式のパラメータの設定は、前述のように増殖量が汚泥濃度の 3～5%と小さいうえ、汚泥濃度計の検出精度が 1%であるため、実データから決定することは困難を伴う。更に、現状では他の適当な比較基準データも得られないため、(7) 式による有機物除去率が一般に言われているように 90%前後となるように値を定める。この結果を表 3.1 に示す。

表3. 1 曝気槽の諸元とモデルパラメータ

出典：分布特性を考慮した下水処理プロセスのモデル化、電気学会論文誌C Vol104, No.12



パラメータ	意味	パラメータ値
μ_m	最大増殖率 (1/h)	0.02
Y	収率係数	1.5
K_s	解離定数	10.0
K_d	自己酸化率	0.7
K_c	基質転化率 (1/h)	0.0024
完全混合槽数		30
ばっ気槽横長		6.3m
ばっ気槽深さ		5.3m
ばっ気槽流下方向長さ		300m

3.4 最終沈澱池のモデル化

最終沈澱池での汚泥挙動は、基本的には流入水による流下方向への輸送および汚泥の重力沈降により記述される。流入側の底に座標原点を置き、流下方向に x 軸、水面方向に z 軸を取り、流下方向の濃度を一様と仮定した場合の汚泥の挙動は次式で表わされる。

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -v \frac{\partial S}{\partial x} + \omega \frac{\partial S}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (8)$$

ここで、 S : 汚泥濃度 (mg/l), v : 輸送速度 (m/h), ω : 沈降速度 (m/h),
 D_x, D_z : 乱流拡散係数 (m²/h)

沈澱池のモデルは数多く提案されている [33] [35] が、その多くは流下方向への汚泥の輸送を無視した集中定数表現を取り、沈澱池内の汚泥分布把握への考慮が欠けていた。またそれを拡張し一様な流下方向流れを仮定したモデル [36] も提案されているが、これも流下側壁面での汚泥の再浮上の効果を記述できず、汚泥分布把握という面では不十分であった。更に最終沈澱池を N 槽に分割し、曝気槽に対する槽列モデルと同様の観点から、そのモデル化を行う手法など [37] [38] が提案されている。この手法は、沈澱池内の汚泥分布を知ることができる点で進んでいるが、オイラー的視点に立脚するため、流入汚泥の特性が時間的に変化する過渡期の取り扱いが不得手であるという欠点を有している。下水の制御では、この過渡期における制御が最重要である点からみて、この欠点は致命的である。

そこで、単位時間内に流入した下水の塊（汚泥柱と称する）の流下方向への輸送軌跡を考え、その軌跡上での汚泥状態変化を捉える特性曲線法を利用しモデルを導出した。これは、従来のオイラー形座標系では (8) 式の偏微分方程式で記述される現象がラグランジュ形の移動座標系を用いることで、次式のように簡略化できることに着目したものである。

$$\frac{\partial S_L}{\partial t} = \omega \frac{\partial S_L}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial S_L}{\partial z} \right) \quad (9)$$

ここで S_L : 輸送軌道上（すなわち 1 つの汚泥柱内で）の汚泥濃度

(9) 式を更に簡略化するため、1 つの汚泥柱内の汚泥分布を一様と考えると、次の常微分方程式が得られる。

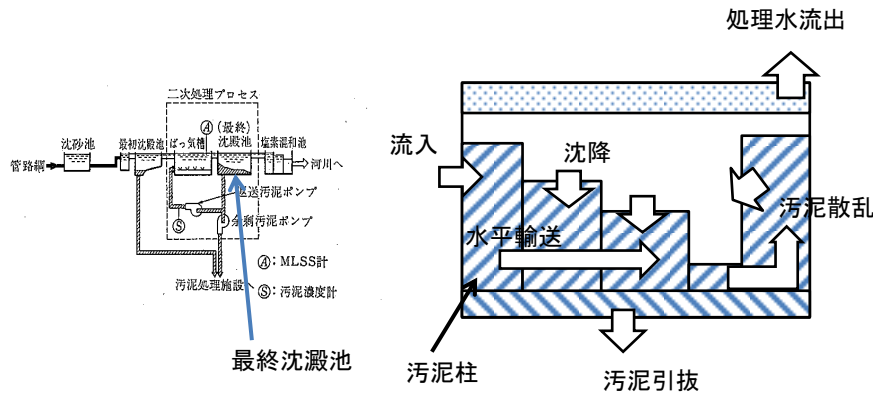
$$\frac{dS_L}{dt} = \omega S_L \quad (10)$$

3.4.1 モデルの構成

最終沈澱池内での汚泥の動特性を観察し、図 3.7 に示す次の 5 つの基本的現象から成ることを見いだした。

- (1) 流入水による流下方向への輸送
- (2) 重力による沈降

- (3) 流下側壁面での汚泥の再浮上
- (4) 沈澱池底からの汚泥の引き抜きとそれに伴う沈降
- (5) 沈澱池表面からの流出



出典: 分布特性を考慮した下水処理プロセスのモデル化、
電気学会論文誌C Vol104, No.12

図3. 7 沈澱池動特性の離散モデル化

この5つの現象を、前述の汚泥柱の概念を用いてそれぞれ次のように具体化する。

単位時間内の流入水量を Q としたとき、それに対応して、次式で定義される高さ H 、流下方向長さ F の新汚泥柱が生成されると考える。

$$H = H_{in} + \beta(Q - Q_{in})^2 \quad (11)$$

$$F = Q/(W \times H) \quad (12)$$

ここで、 H_{in} : 沈澱池流入口高さ (m)、 Q_{in} : 基準化流入量 (m^3/h)、
 β : 汚泥柱高さパラメータ (h^2/m^5)、 W : 沈澱池横長 (m)

この新汚泥柱の生成により、既存の汚泥柱は距離 F だけ流下方向に位置を移動すると考える。
なお、新汚泥柱の濃度は流入水の濃度と等しいとする。

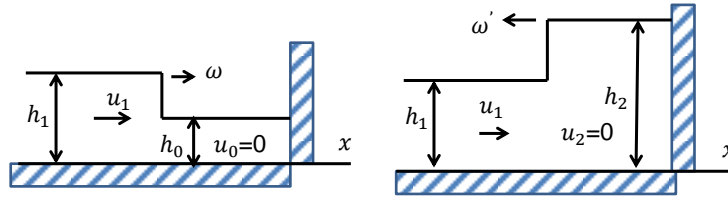
汚泥柱内での汚泥沈降は (10) 式で表現され、時刻 t の汚泥柱濃度 $S_L(t)$ は、計算時間幅を Δt として

$$S_L(t) = (1 + \omega \Delta t) S_L(t - \Delta t) \quad (13)$$

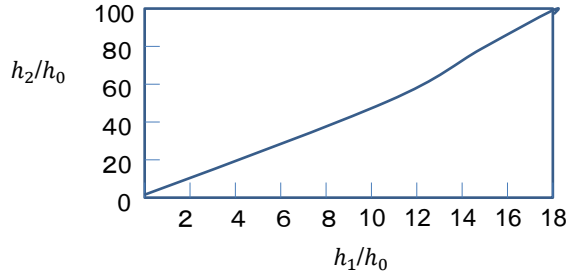
ただし、一定の圧密濃度 s_a 以上に達した汚泥柱は沈降を起こさないものとする。

(13) 式は汚泥柱高さ $H(t)$ の次式の変化と同等である。

$$H(t) = H(t - \Delta t)/(1 + \omega \Delta t) \quad (14)$$



(a) 段波の反射



(b) 段波の反射波高の算定図

出典：分布特性を考慮した下水処理プロセスのモデル化、
電気学会論文誌C Vol104, No.12

図3.8 汚泥再浮上現象の捉えかた

流下側壁面での汚泥浮上現象の記述のため、段波の壁面反射理論を援用する。すなわち、図 3.8 (a) の状況において、反射波の高さ h_2 は同図 (b) で算定できる [39]。そこで、実際には図 3.8 (b) をテーブルの形でもたせ、高さ h_2 を求めることとし、流下側壁面から計算上はみ出る形となる汚泥を斜線領域内に一様散乱させる。このようにして生成された斜線領域は、流下側壁面から新しく流入した汚泥柱として取扱う。この汚泥柱は、通常の汚泥柱と全く等価（すなわち、次の時点で再び押し出される）に取り扱われる。

沈澱池底からの汚泥引き抜きは、底面から一様に行われると考える、すなわち、沈澱池内の汚泥柱は引き抜き流量 Q_R に見合う高さ H_{out} の部分を取り去られるとし、引き抜き汚泥濃度を次式で算出する。

$$H_{out} = \frac{Q_R}{A} \quad (15)$$

$$S_R = \sum_{i=0}^M S_i H_{out} W F_i / Q_R \quad (16)$$

ここで、 A ：沈澱池表面積， M ：沈澱池内汚泥柱数， $S_i W F_i$ ：第 i 番目の汚泥柱濃度および長さ

処理水の流出は、池表面からやはり一様に行われるものとし、処理水汚泥濃度 S_F を次式で求める。

$$H_F = (Q - Q_R) / A \quad (17)$$

$$S_F = \frac{\sum_{i=0}^M \epsilon(H_i - H_S + H_F)}{Q - Q_R} S_i (H_i - H_S + H_F) W F_i \quad (18)$$

ここで、 H_F ：放流深さ， $\epsilon(x)$ ： x のステップ関数， H_i ： i 番目の汚泥柱高さ，

H_S ：沈澱池深さ

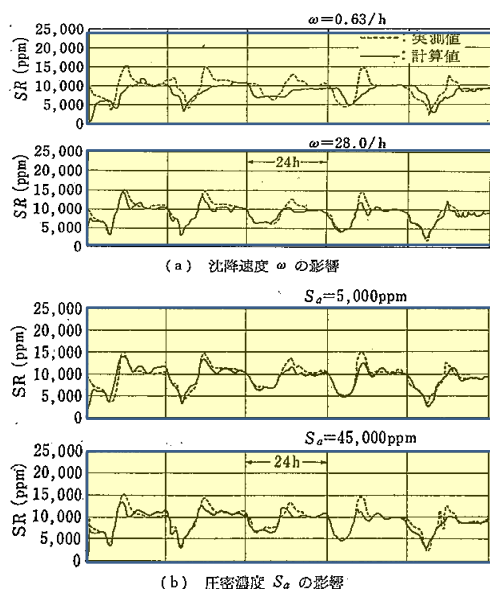
以上をまとめると、各汚泥柱は、その属性として高さ、汚泥濃度、位置をもち、前記の 5 つの基本的現象に対応する操作により、その値を変化させつつ沈澱池内を移動し、最終的には引き抜き操作により全て引き抜かれることになる。

3.4.2 パラメータの設定

以上の沈澱池モデルは多くのパラメータを含む。以下、その決定法を考察する。パラメータの決定に用いる実測データは極めて少なく、引き抜き汚泥濃度 S_R が唯一の時系列データである。従って、ここでは処理場における観察結果を加味し経験的に決めたものもある。その場合も、できる限り一般的に利用できるよう努めた。

輸送距離 F を規定するパラメータである Q_{in} 、 β については、 Q_{in} に平均最小流入量を与え、 β は平均最大流入時に (11) 式の高さ H が池深の 90%となるように定めた。これは、多流量時に入口付近で汚泥散乱が見られるという知見に基づいたものである。

汚泥沈降を規定するパラメータは、沈降速度 ω および圧密濃度 S_a である。沈降速度 ω は、その値を小さくすると、 S_R にピークが現れなくなり、更に時間遅れを生じる。逆に値を大きくすると、 S_R の変化パターンが角張った形になり、実測値に対し時間進みの傾向が生じる。この様子を図 3.9 (a) に示す。一方、圧密濃度はその値を小さくすると時間遅れを生じさせ、大きくすると時間進みを生じさせる。その様子を図 3.9 (b) に示す。この 2 つのうちでは、沈降速度 ω の感度が高い。これらに関しては、2 つを交互に変えながらその値を決定した。



出典：分布特性を考慮した下水処理プロセスのモデル化、
電気学会論文誌C Vol104, No.12

図3.9 沈澱池パラメータの感度

最終的に得られたパラメータおよび沈澱池諸元の一覧を表 3.2 に示す。

表3. 2 最終沈澱池の諸元およびモデルパラメータ

出典：分布特性を考慮した下水処理プロセスのモデル化、
電気学会論文誌C Vol104, No.12

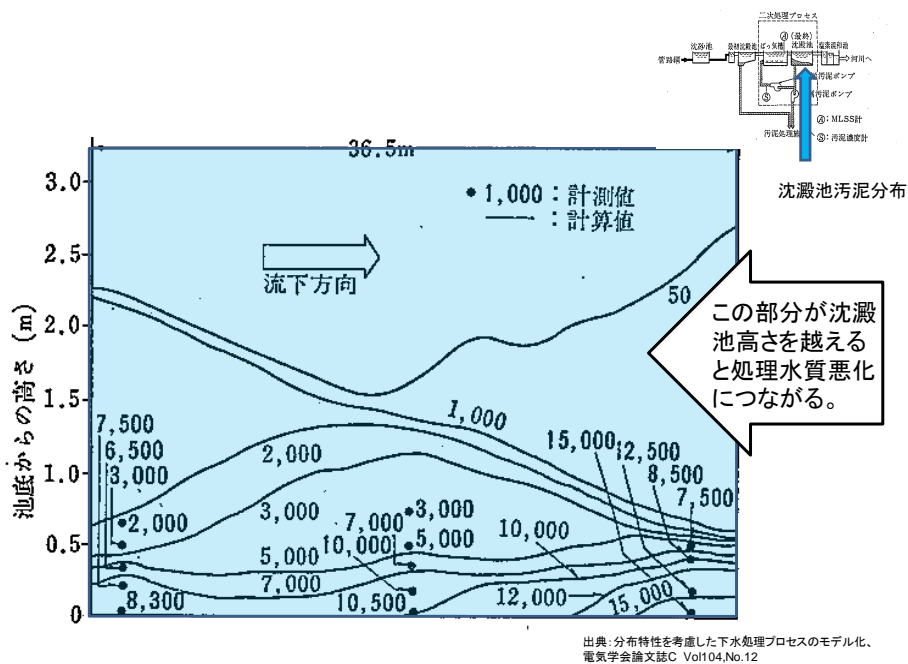
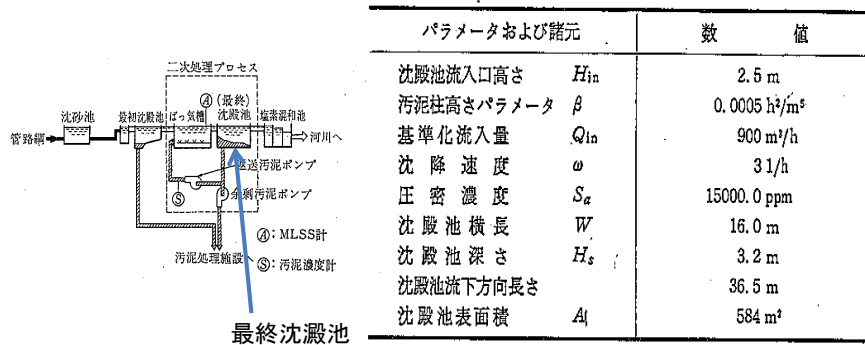


図3. 10 沈澱池汚泥分布の推定例

このモデルによる沈澱池汚泥分布の推定結果を、計測値と比較したものを図 3.10 に示す。計測値は実際の大規模処理場において執筆者が計測を行った結果であり、モデルのシミュレーション結果は、その時点を含む数日間にわたる計算結果から取り出したものである。大局的にはほぼ一致しているとみることができ、本モデルの妥当性が確認できる。本モデルは沈澱

池の動特性をラグランジェ的視点に立った汚泥柱という概念でとらえ直し、更にその汚泥柱に対する 5 つの基本操作によって模擬できることを示した点に特長がある。これは、沈澱池内汚泥分布の推定が可能というユニークな特性に結び付き、現象理解の上で大きく貢献できる。

3.5 モデルの有効性の評価

以上のべた曝気槽、最終沈澱池のモデルの概要を図 3.11 に示す。

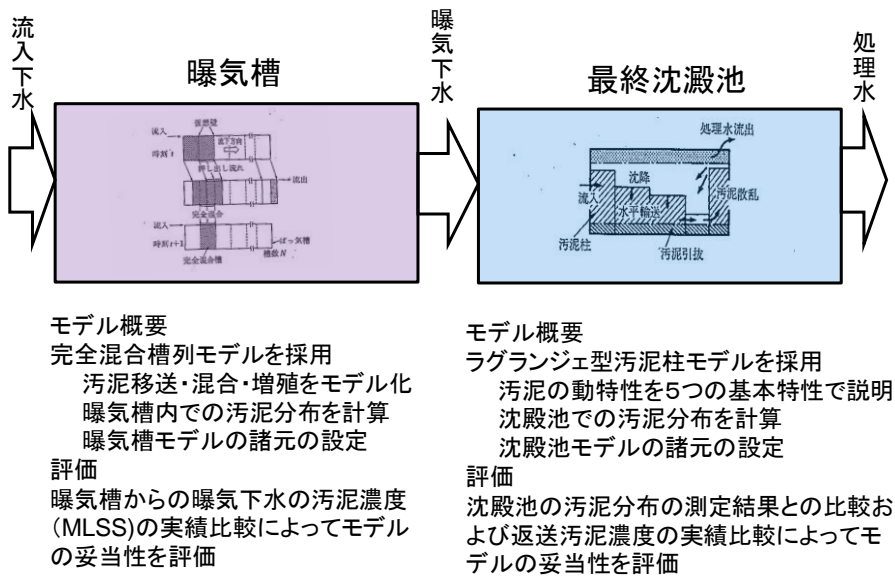


図3. 11 下水処理プロセスのモデル化概要とその成果

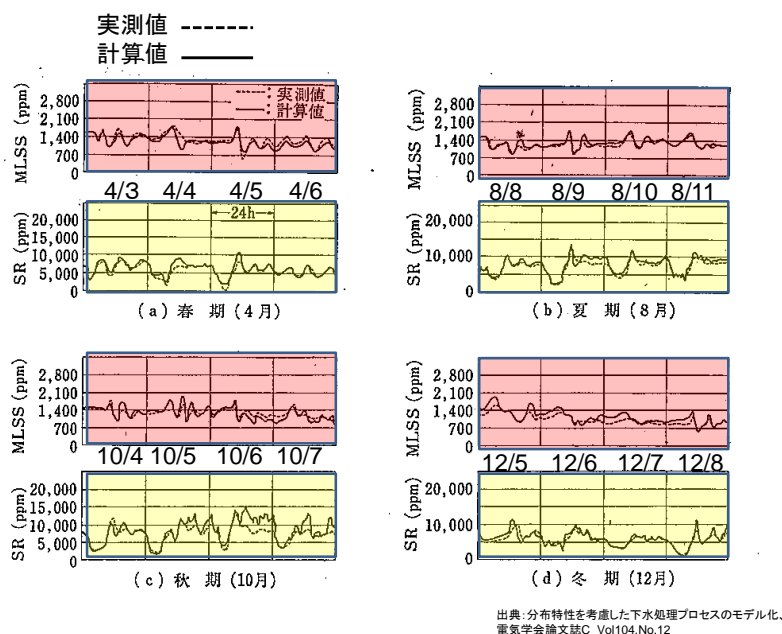
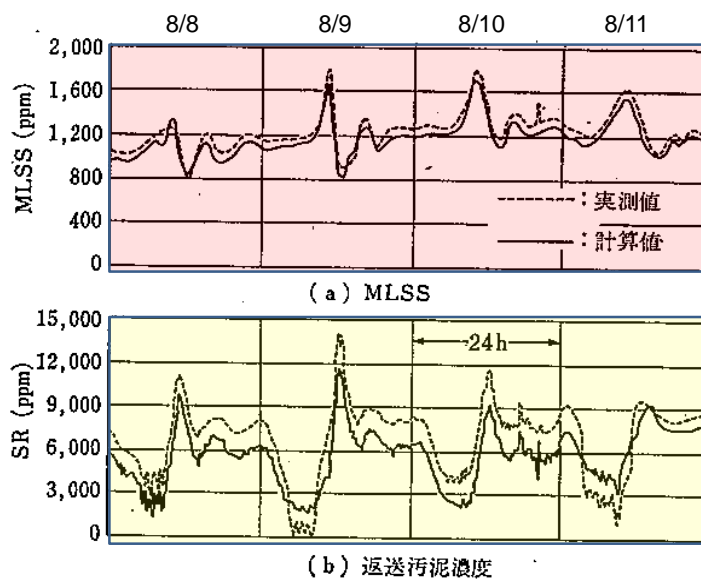


図3. 12 モデルの計算結果と実測値の比較

モデルの有効性評価のため、約 1 年間にわたる実処理場データを用いたシミュレーション実験を行った。流入水量、返送汚泥流量、余剰汚泥流量の実測値をモデルに入力し、曝気槽出口の汚泥濃度 $MLSS$ と返送汚泥濃度 S_R の計算値と実測値を比較した結果を図 3.12 に示す。同図は、季節ごとに同一パラメータでシミュレーションした結果であり、各季節上段は $MLSS$ 、下段は S_R の比較である。この図から、冬期の $MLSS$ は活性汚泥の活動性向の影響によってややずれが大きいものの、全般的にはよい一致を示している。秋期 3 日目の返送汚泥濃度のずれは、降雨の影響によるもので、このような特殊ケース除けば、1 年間にわたり、図 3.12 で示した程度の一致をみることができた。

モデルの精度面での評価のため、図 3.12 の夏期のデータに関して AIC 基準 [40] に基づく統計モデルとの比較を示す。統計モデルは最小自乗規範の下での最良推定を与えるものであり、このモデル出力との比較は提案モデルの精度判定に好都合である。

図 3.13(a)は曝気槽出口の $MLSS$ を流入量、返送汚泥流量およびその濃度から説明する統計モデルの結果、同図(b)は返送汚泥濃度を曝気槽流出量、返送汚泥濃度、余剰汚泥流量、曝気槽出口 $MLSS$ から説明する場合の結果である。この統計モデルと我々の提案モデルの入出力は完全に一致している。図 3.12 の夏期データと図 3.13 の比較から、提案モデルの精度は統計モデルのそれに匹敵すると考えてよい。すなわち、提案した物理モデルは精度のよい統計モデルと同程度の精度を示し、かつ統計モデルでは表現しえない分布特性の掌握が可能である点で有力である。更に、本モデルの精度は、物理モデル化に関する最近の発表および統計的手法を用いたモデル化手法[41]などと比較しても遜色なく、特に前 2 者に比較して時系列変動の追従性が良い結果が得られている。



出典: 分布特性を考慮した下水処理プロセスのモデル化、
電気学会論文誌C Vol104, No.12

図3.13 統計モデルとの比較

3.6 見る制御のまとめ

大規模下水処理場において、オペレータとコンピュータが協調して処理水質を向上させ、操業を安定化するためのモデルとして、活性汚泥下水処理プロセスの汚泥の分布特性の表現が可能モデルを開発した。このモデル化によって、系全体の汚泥の総量およびその分布をオペレータが把握できるようになり、またこれまでブラックボックス的であった最終沈澱池の汚泥の沈降分布をビジュアルに視認できるようになった。このことは汚泥の処理水への混入制御が可能になることを意味する。

モデル化にあたっては、分布特性の離散表現にあっては簡易性を重視し、対象に関する先見的知見を十分に利用するよう努めるとともに、具体性を高めるためにパラメータ設定法の確立に意を払った。

曝気槽に関しては、槽内での汚泥拡散を表現する偏微分方程式を、定性的知見を用いて常微分方程式に変換することにより、その離散化表現がポアソン過程で近似できることを見出した。これは同じポアソン過程を基礎とする完全混合槽列モデルに理論的基礎を与えるものと言える。この完全混合槽列モデルの離散化パラメータである分割槽数に関しては、実データによる感度解析を通して、各混合槽体積が計算単位時間内の最大流入量の1~1.5倍になるよう設定するのが良いとの結論を得た。これは今後の同種のモデル化での有力な知見となる。なお、曝気槽内での増殖分については、データ不足から定量的な結論を得るのは至らなかった。ただし、増殖量は汚泥総量の3~5%以下と、その寄与は小さいため、増殖を表現するMonod式において有機物除去率が90%となるよう定めれば大きな誤差なく、汚泥分布特性の表現が可能である。このモデル化によって曝気槽内の汚泥の分布を大局的に把握可能とすることが

でき、オペレータの視認性を高めることができた。残念ながら曝気のための泡などの影響で、曝気増の流下方向での MLSS の分布測定ができないため、実測値との比較はできていないが、出口での MLSS の推移からみて、このモデル化はかなりよい精度を持つものといえる。

最終沈殿池に関しては、特性曲線法の採用とその曲線上での濃度の一様性の仮定により、簡易な常微分方程式表現が得られることを示し、その具体化として汚泥柱という概念に基づく離散化表現法を与えた。この方式の特徴は、従来のモデルでは表現できなかった流下側壁面での汚泥再浮上現象の取り扱いが可能なことで、これにより初めて池内汚泥分布の推定ができた。本モデルは最終沈殿池固有の特徴を表現するパラメータを多く含んでおり、その設定変更のみで種々のタイプの沈殿池に適用しうる一般性を有している。さらにこのモデルを利用することによって、図 3.10 に示したように、最終沈殿池内の汚泥の分布をかなりの精度でシミュレートできるため、汚泥越流の対策を含めて下水処理のオペレーションをビジュアル確認しながら行うことが可能となった。

導出したモデルの妥当性、すなわち近似仮定の正しさを確認するため、モデル精度に関する実験を行った。その結果、実測値との適合性は極めて良好であり、かつ精度面では最良と思われる統計モデルと比較しても、遜色のないものであることが明らかになった。本モデルは、従来モデルに比べて分布現象の記述性が優れており、現象理解のためのシミュレータやオペレータガイダンスへの直接の適用が可能であるほか、その計算容易性からプロセスフィードフォワード制御のための予測モデルとして、利用できる。このモデルは実際の下水処理場のシステムの一部として実用に供された。以上のまとめを図 3.14 に示す。

課題

計測値のみからではオペレータにはその動態をイメージ化しにくいプラントに関して、コンピュータ内に物理モデルを構築することによって、マンマシン協調による安定した制御の実現を図る。

成果

- ・大規模下水処理場の2次プロセスを例に、物理モデルを構築し、その妥当性を実データによって確認した。
- ・いままで見るができなかった最終沈殿池における汚泥の分布状態を見えるようにすることで、水質汚濁の最大の要因である汚泥越流防止など高度な運転操作を操作員との協調で行えるようにした。
- ・大規模下水処理場の運転制御システムとして組み込み、実用に供した。

論文等

増位, 塩谷: 分布特性を考慮した下水処理プロセスのモデル化, 電気学会論文誌C, Vol.104, No.12, pp. 295-302, 1984
S. Masui, M. Shioya, T. Ohto, S. Nogita: Organic Load Control of the Activated Sludge Process based on Predicted Daily Variation of Influent Load, Water Science Technology, Vol.13, IAWPR, pp.387-392, 1981

図3. 14 見る制御のまとめ

この「見る制御」において、人間とコンピュータがどのように協調するかを図 3.15 にまとめた。従来は、限られたセンサーデータをもとにして、ある意味ではブラインド制御に近い

流入下水量に応じた汚泥の定率返送や巡回目視による汚泥越流に対する臨時的な流入制限措置が主流であった下水道処理に対して、ビジュアルなコンピュータモデルを導入することによって汚泥量分布や汚泥越流のオンライン把握を可能とし、流入制限などによって下水水質を良好に保つ手段を提供することが可能となった。また汚泥性状の悪化などで汚泥沈降が不良化することが予想できる場合には曝気風量や曝気時間の変更などによって汚泥性状の改善を図るなどの対策をうてるようになることも期待できる。下水処理においては、処理水量を一定の水準以上に保つこと、処理水をできる限り良好に保つことなど複数の目的を、状況に応じてバランスよくタイムリーに均衡させることが重要で、コンピュータがその均衡のための判断データを提供する重要な役割を果たすものとなる。




	限られたセンサーからの情報に基づく運転 定期巡回による越流などの把握	流入下水量に応じた定率汚泥返送 汚泥越流時発見時の臨時的処理
	汚泥量分布の定量的把握 越流状況のオンライン把握	汚泥越流防止のための流入下水量の量的制御 汚泥性状に応じた曝気制御
	曝気槽の現在状況の提示 最終沈澱池の現在状況の提示	流入下水量に対応する処理量確保と越流による水質悪化のバランス調整

図3. 15 見る制御における協調

第4章 推し量る制御—分散化できるプラントの自律化モデル

大規模プラントは緩い結合を持ったサブシステムの集合である場合が多い。個々のサブシステムのオペレータにとっての最重要事項は、通常受けられるはずの上位の指令所からの制御指示が、通信途絶などの事故で受けられない場合の対応である。サブシステム間では緩いといえども関連性があるので、唯我独尊的な制御は不時には全体系の停止や破壊につながるため、他のサブシステムを含む環境からの影響を図りつつ、自分のサブシステムでの最適化を考える必要がある。このタスクは頻繁に生起することではないだけにオペレータの経験は当然浅く、コンピュータが環境に関する情報を収集し、それに基づく予測を提示してオペレータの適切な判断をサポートするという形の協調が必須となる。本章では、他のサブシステムの影響を適応的に学習予測することで、個々のサブシステムの自律性を確保する自律分散制御モデルによる協調について論じる。これを同一の水系に置かれたダム群の制御に適用し、各ダムでは水位や放流量など自己測定が可能な情報しか得られない想定下でも、オペレータとの協調の下で、安定した制御が可能であることを明らかにした。

4.1 サブプラントの自律化

大規模システムは、いくつかのサブシステムの集合体として定義され、通常はサブシステム間の調整は上位のコンピュータあるいは意思決定者によって行われる。そのため、他のサブシステムとの関連についてはサブシステムのオペレータは考える必要はない。

- 課題 (1) 同一水系に設置されたダム群の安全な運転制御は、平常時には水系全体の総合指令所の指示に基づいて行われる。
(2) 総合指令所からの指示が途絶した場合には、自ダムのコンピュータによる流入量予測情報や操作量推奨値などに基づき、マンマシン協調によって安全に自ダムを運転制御することが各ダムのオペレータにとって最大の課題となる。

解決方針

- ・多段ダムそれぞれが、周囲環境からの影響を織り込みつつ独自の運転制御を計画実施できるよう適応予測モデルを装備した自律分散型制御方式を開発
- ・将来流入量などの定量的把握によりオペレータの制御判断の余裕度が大きく拡大する



イメージ図：大規模ダム

図4. 1 推し量る制御のための問題の設定

しかしその上位からの指示が失われた場合には、オペレータは独自の判断でのサブシステムの制御を強いられる。そしてその時点で使えるデータは極めて限られるものになることが多い。このような状況に対してそれぞれのサブシステムの自律化を図るモデルが「押し量る制御」モデルである。この場合、オペレータもさることながらコンピュータにとっても、限定されたデータによる予測や状態判定をこなさねばならない状況となる。

ある水系に接続して置かれたダム群の制御は、押し量る制御を必要とする代表的プラントである。このプラントでは、通常の場合は、ダム制御の総合指令所によって個々のダムの最適放流量が計画され、各ダムは指示された放流を実施するという集中型の制御形態がとられている。しかし災害時の通信線の途絶などの事故が発生した場合は、各ダムでは自己測定可能な水位など限られた情報をもとにそれぞれの放流量を決める必要が生じる。このような状況下でも水系全体の安全性を確保できるような安定した制御を行うことがこのプラントにおける大きな課題である。そこで環境同定のモデルを常にコンピュータ内でアップデートしておき、緊急時にはそのモデルに基づいて環境からの影響を加味した適切な制御を行うという自律分散型制御モデルを考案した。具体例として実水系のダム群にこのモデルを適用し、集中制御とほぼ同等の制御が実現できることを確認した。各ダムのオペレータは、コンピュータが予測した推定流入量や自ダムから放出すべき放流量の推奨値などを参照し、緊急時に対応した運転制御を自らの判断のもとで行える。このモデルは緊急時バックアップモデルとして、実水系の多段ダム制御系に組み込まれている。

4.2 プラント制御の分散化

プラントの大規模化、複雑化に伴い、制御システムの信頼性向上がプラント設計における本質的要求となっている。特に、社会の基幹的骨組みとなる電力インフラ・鉄道インフラのような比較的疎結合なサブシステムの集合体からなる大規模システム／プラントでは、システム／プラントの一部が故障した場合、故障を局限化しシステム／プラント全体に波及させないという意味でのシステム信頼性—サブシステムの自律性確保—が重視される。集中制御モデルでは全システム／プラントの制御が一台の大型コンピュータで行われるため、システムの信頼性はそのコンピュータの信頼性に大きく依存し、その解決策としてのコンピュータ多重化はコストや緊急時の切り替えなどの面で負担が大きい。この原因が情報や制御の集中にあると考え、その代替案として制御モデルの分散化が一般化してきた。分散制御モデルが、信頼性の面で集中制御モデルに優ることはすでに多くの文献[42]に見られるところである。

分散制御モデルの構成法については多数の論文があり、具体的な提案 [43] [44] [45] もなされている。その形態の一般形は階層構成である。この構成はプラント制御を担当するローカルコントローラ群（制御のためのコンピュータ）と、それらを統括するコーディネータ（監視調整のためのコンピュータ）との二階層から成る階層モデルで代表される。しかし、システム信頼性および実用性の観点からは、次のような問題を含んでいる。

(1) コーディネータが、集中制御モデル同様、情報の集中点になり、この故障がプラントの

全停を招く恐れがある。

(2) コーディネータとコントローラがその機能を全く異にし、それぞれの故障対策が複雑化するうえ、コーディネータの解くべき問題は集中制御システムと劣らぬほど大きい。

(3) 階層構成で採用される制御方策は、プラントの動特性を定常と仮定して構築されている。しかし、現実にはこの仮定が成立しない場合が多く、非定常性への対応が必要となる。

このような階層構成の問題点を克服するため、本研究ではコーディネータを排した対等分散制御モデルについて考察する。ここで考案した対等分散制御モデルは、サブプラント間の干渉をローカルコントローラ自身が適応的予測モデルを用いて自律的に予測し、その予測値をもとに各ローカルコントローラが相互に独立して制御を実行するという自律分散概念[55]に基づいている。以後この形を自律分散制御モデルと呼ぶ。その特徴は、コーディネータを排除し、ローカルコントローラ間の調整を各コントローラ自身に受けもたせることにより、コントローラの独立性を確保する点にある。この結果、情報の集中点の解消による信頼性の向上と適応機能による非定常性への対応が同時に達成できる。この自律分散制御モデルは、オペレータにとっては、状況適応的に信頼できる情報、たとえば他のシステムからの影響の予測値などをコンピュータが常時提供してくれるものとなり、それに基づいてシステムを安定して運転するためにスムーズな意思決定を行うことが可能となる。また情報途絶時にも比較的良質な制御を継続できる手段が用意されるという意味でも、安全なオペレーションのための基礎情報を得ることができる。

提案方策に似たものとしては、ハイウェイ制御[45]や電力網の負荷周波数制御[46]などが挙げられる。前者は制御区間の重複によるコントローラ間の調整能力向上という興味あるモデルを提案したものであるが、そのモデル自身はプラント制御に不向きである。後者はプラントの非定常性への対応が考慮されていない点に問題がある。

以下では自律分散制御モデル[47]を導出し、その安定性、制御性能について考察する。具体的適用例として同一水系多段ダムの洪水時制御の例を通してモデルの適用方法を示す。また本制御モデルが非定常プラントに対して有効に機能することを確認する。最後に、信頼性および計算量について、集中制御モデルとの比較の形で定量的に考察する。

4.3 自律分散制御モデルの導出

4.3.1 問題の設定

制御対象であるプラントの動特性が次式で表わされるものとする。

$$x(t+1) = Ax(t) + Bu(t) \quad (1)$$

$$x(t_0) = x_0$$

ここで x : n 次元状態変数ベクトル, u : m 次元操作量ベクトル, A : $n \times m$ 次元行列,

B : $n \times m$ 次元行列

制御の目標は次の指標 J の最小化とする。

$$J = \sum_{t=t_0}^M \{x^T(t+1)Qx(t+1) + u^T(t)Ru(t)\} \quad (2)$$

ここで、 M ：制御期間、 Q ： $n \times n$ 次元半正定値行列、 R ： $m \times m$ 次元半正定値行列、 T ：転置

通常の大規模プラントにおいては、操作量 $u(t)$ の影響が全ての状態変数 $x(t)$ に影響することはまれで、操作量の影響範囲に着目すると、プラントをいくつかのサブプラントに分割できる場合が多い。数学的には、(1) 式の行列 B がサブプラント毎の操作量ベクトル u に関し、ブロック対角となる、ということを意味する。例えば、電力配分網、上水配水網、多段ダムなどでは、それぞれ地域の電力網、単位配水網、個々のダムといったサブプラントに分割でき、各々単独でも制御されうる。このようなプラントにおいては、制御目標自体もサブプラントごとの制御目標に分割されうる。すなわち、(2) 式で行列 Q 、 R がサブプラントごとにブロック対角化できることになる。この制御目的の分割は、プラントの操作量の影響範囲という観点から行えば合理的なものにできる。

以上の考察に基づけば、(1) (2) 式で示されるプラントの制御問題は次の様な分散制御に適した形に書き直すことができる。

$$x_i(t+1) = A_{ii}x_i(t) + B_i u_i(t) + \sum_{j=1}^N A_{ij}x_j(t) \quad (3)$$

$$J_i = \sum_{t=t_0}^M \{x_i^T(t+1)Q_i x_i(t+1) + u_i^T(t)R_i u_i(t)\} \quad (4)$$

ただし、添え字 i はサブプラント i に関係するものを表し、かつ $j \neq i$ 、 N はサブプラント数である。

4.3.2 自律分散制御モデルの導出

上記の問題の最適解は、最適制御設計において次式で与えられる。

$$u_i(t) = -(B_i^T S_i(t) B_i + R_i)^{-1} B_i^T S_i(t) A_i x_i(t) - \theta_i(t) \quad (5)$$

$S_i(t)$ は次のリカッチ方程式の解行列である。

$$\begin{aligned} \bar{S}_i(t) &= A_i^T \bar{S}_i(t+1) A_i - A_i^T \bar{S}_i(t+1) B_i (B_i^T \bar{S}_i(t+1) B_i + R_i)^{-1} B_i^T \bar{S}_i(t+1) A_i + Q_i \\ \bar{S}_i(M) &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

(5) 式におけるベクトル $\theta_i(t)$ は、集中制御もしくは階層制御方策の場合には状態フィードバックの形に記述でき、

$$\theta_i(t) = \sum_{j=1}^N T_{ij} x_j \quad (7)$$

となる [48]。しかし、この式を計算するにはサブプラント i の操作量決定には全プラントの状態変数を知る必要がある、この問題に対して個々のサブプラントが全く独立しており、自分自身の状態変数 x_i のみを観測しうる場合を想定し、(5) 式の $\theta_i(t)$ について考える。この状況下では、(7) 式のような状態フィードバックは用いることができない。そこで、まず何らかの方法により (3) 式右辺第 3 項 $\sum_{j=1}^N A_{ij}x_j(t)$ の予測値が得られたと考える、これを

$\xi_i(t)$, $t = t_0 \sim M$ とする。このときベクトル $\theta_i(t)$ はベクトル $\xi_i(t)$ を用いて次式で与えられる。

$$\theta_i(t) = -(B_i^T S_i(t) B_i + R_i)^{-1} B_i^T (S_i(t) \xi_i(t) + \frac{1}{2} P_i(t)) \quad (8)$$

$S_i(t)$ は(6)式の解行列であり、 $P_i(t)$ は次の方程式の解行列である。

$$\begin{aligned} \bar{P}_i(t) = & 2A_i^T \bar{S}_i(t+1) \xi_i(t) + A_i^T \bar{P}_i(t+1) - 2A_i^T \bar{S}_i(t+1) B_i (B_i^T \bar{S}_i(t+1) B_i + \\ & R_i)^{-1} B_i^T \bar{S}_i(t+1) \xi_i(t) + \frac{1}{2} \bar{P}_i(t+1) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\bar{P}_i(M) = 0$$

このモデルは、観測できない他のサブプラントの状態量 x_j による当該プラントへの影響 $\sum_{j=1}^N A_{ij} x_j(t)$ の代替として、その予測値 $\xi_i(t)$ を用いるものであり、正しい予測値が得られれば少ない計算量で最適に近い制御を行うことができる。しかし、この予測値は他のサブプラントの状態変数に関連しているため、制御期間全体にわたって正しい値を得ることは期待できない。そこで、次に示すようなパラメータ適応形モデルによる予測を考える。(3)式において、現時点 t 以前のサブプラントの状態量および操作量は既知であるので、他サブプラントからの干渉量 $\xi_i(t-1) \sim \xi_i(t-K)$ は計算可能である。このデータからの将来値を予測するため、 $\xi_i(t)$ の動特性が次の自己回帰式を満たすと仮定する。

$$\xi_i(t) = -\sum_{l=1}^K \phi_l \xi_i(t-l) + \omega_{ti} \quad (10)$$

ここで、 ϕ_l ：自己回帰係数， K ：回帰項数， ω_{ti} ：サブプラントの各次元の観測雑音（簡単のため一律に平均0，分散 σ^2 の白色雑音とする）

前述のように $\xi_i(t)$ は他サブプラントの状態量からの影響に関する予測値であり、ひいては他のサブプラントの操作量の影響を受けるものであるため、(10)式の係数 ϕ_l を制御期間全体にわたって一定と考えることはできず、時間経過に伴い逐次得られる $\xi_i(t)$ 情報をもとに更新していく適応形係数推定を行う必要がある。(10)式において

$$f_t^T = [\xi_i(t-1), \xi_i(t-2), \dots, \xi_i(t-K)]$$

$$\psi_t^T = [-\phi_1, -\phi_2, \dots, -\phi_K]_t$$

とおき、次式を得る。

$$\xi_i(t) = f_t^T \psi_t + \omega_{ti} \quad (11)$$

$t-1$ の時点での係数ベクトル ψ の事前確率密度が正規分布 $N(\psi_{t-1}, \beta_{t-1})$ に従うとすると、Bayesの推定法によりデータ $\xi_i(t)$ を得たとき ψ の事後確率密度 $N(\psi_t, \beta_t)$ は次式で得られる[49]。

$$\psi_t = \beta_t (\beta_{t-1}^{-1} \psi_{t-1} + \sigma^{-2} \xi_i(t) f_t) \quad (12)$$

$$\beta_t = (\beta_{t-1}^{-1} + \sigma^{-2} f_t f_t^T)^{-1} \quad (13)$$

(12)(13)式は次の漸化式の形で記述でき、 β_i の初期値 $\beta_0 = mI$ (m ：適当に大きい正定数，

I：単位行列）を与えることにより逐次計算が可能となる。

$$\psi_t = \psi_{t-1} + \sigma^{-2}(\xi_i(t) - f_t^T \psi_{t-1}) \beta_t f_t \quad (14)$$

$$\beta_t = \beta_{t-1} - (\sigma^2 + f_t^T \beta_{t-1} f_t)^{-1} \beta_{t-1} f_t f_t^T P_{t-1} \quad (15)$$

$$(14) \text{ 式で得られる係数ベクトル } \psi_t^T = [-\phi_1, -\phi_2, \dots, -\phi_n]$$

を用いれば $\xi_i(t)$ の予測値が次式で得られる。

$$\bar{\xi}_i(t+P) = -\sum_{l=1}^{K-P+1} \phi_{l+P-1} \xi_i(t-l+1) - \sum_{l=1}^{P-1} \phi_l \bar{\xi}_i(t+P-l) \quad (1 \leq P \leq K) \quad (16)$$

$$\bar{\xi}_i(t+P) = -\sum_{l=1}^K \phi_l \bar{\xi}_i(t+P-l) \quad (K \leq P < \mathcal{M})$$

ここで、 $\bar{\xi}_i$ ：予測値， \mathcal{M} ：予測期間

予測期間 \mathcal{M} に関しては制御対象の動特性に依存するため、一般的な決定法の議論は困難である。各サブプラントが定常状態にあるときは、(14) 式の係数は一定値に収束するので長期間の予測が可能となるが、非定常状態においては短期間の予測しか有効にはならない点に注意を要する。我々は (6) 式で与えられる $S_i(t)$ がほぼ一定値に落ち着く期間を用いる。

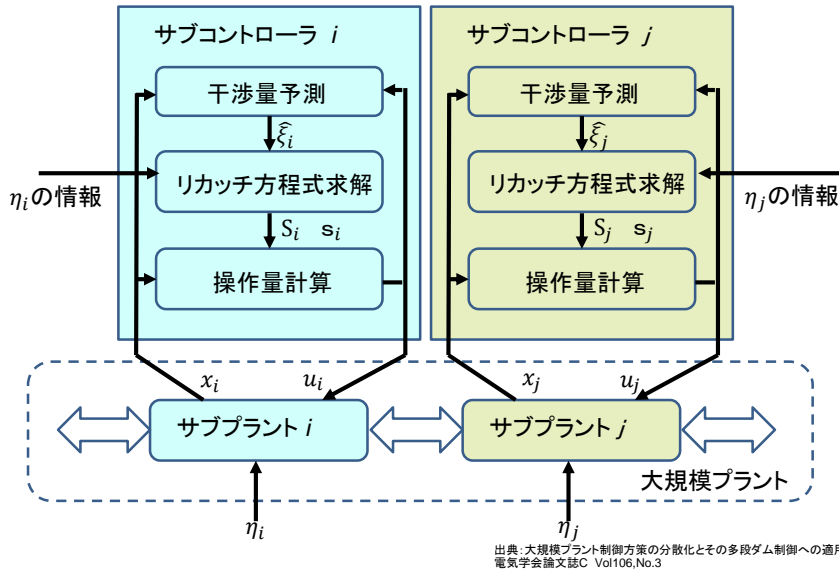


図4.2 自律分散制御モデルでの分散制御システム構成

以上の分散制御モデルでの制御システムの構成の例を図 4.2 に、主要なモデル方程式を図 4.3 に示す。図 4.2 で、 η は各サブプラントへの直接の外乱を示す。この図から明らかなように、自律分散制御モデルは、各サブプラント毎に、サブコントローラが独立して制御を実行するというシステム構成となる。

状態方程式	$x_i(t+1) = A_{ii}x_i(t) + B_i u_i(t) + \sum_{j=1}^N A_{ij}x_j(t)$
制御目標	$J_i = \sum_{t=t_0}^M \{x_i^T(t+1)Q_i x_i(t+1) + u_i^T(t)R_i u_i(t)\}$
操作量計算	$U_i(t) = -(B_i^T S_i(t)B_i + R_i)^{-1} B_i^T S_i(t)A_i x_i(t) - \theta_i(t)$
リカッチ方程式求解	$\bar{S}_i(t) = A_i^T \bar{S}_i(t+1)A_i - A_i^T \bar{S}_i(t+1)B_i(B_i^T \bar{S}_i(t+1)B_i + R_i)^{-1} B_i^T \bar{S}_i(t+1)A_i + Q_i$ $\theta_i(t) = -(B_i^T S_i(t)B_i + R_i)^{-1} B_i^T (S_i(t)\xi_i(t) + \frac{1}{2}P_i(t))$ $\bar{P}_i(t) = 2A_i^T \bar{S}_i(t+1)\xi_i(t) + A_i^T \bar{P}_i(t+1) - 2A_i^T \bar{S}_i(t+1)B_i(B_i^T \bar{S}_i(t+1)B_i + R_i)^{-1} B_i^T \bar{S}_i(t+1)\xi_i(t) + \frac{1}{2}\bar{P}_i(t+1)$
干渉量予測	$\bar{\xi}_i(t+P) = -\sum_{l=1}^{K-P+1} \phi_{l+p-1} \xi_i(t-l+1)$ $-\sum_{l=1}^{P-1} \phi_l \bar{\xi}_i(t+P-l) \quad (1 \leq P \leq K)$ $\bar{\xi}_i(t+P) = -\sum_{l=1}^K \phi_l \bar{\xi}_i(t+P-l) \quad (K \leq P < M)$
凡例	u : 操作量、 A : $n \times m$ 行列、 B : $n \times m$ 行列、 Q : $n \times n$ 行列、 R : $m \times m$ 行列、 $\xi_i(t)$: 干渉量、 ϕ : 自己回帰係数、 K : 回帰項数

図4.3 自律分散制御モデル

図4.2、図4.3から明らかなように、この自律分散制御モデルは、プラントの分割によって生じる制御誤差を各コントローラに持たせたパラメータ適応形予測器で補償するものである。時刻ごとにその時点で得られる最良の予測値に基づき、最適操作量を求めていく、という前進形動的計画法に類似した方策を取っている。ただしこれによって制御期間全体にわたる最適制御が得られる保証はない。しかし、次の諸点からみて十分に実用的なものであると考えられる。

- (1) 各サブプラントの独立性が保たれ、プラント全停の危険がなくなると同時に、プラント自体の部分故障に対しても他のサブプラントの準最適運転が可能となる。
- (2) 各コントローラの計算量が小さく、小形コンピュータで十分対応できる。更に、各コントローラの制御方策が同一で、共通バックアップコンピュータの待機構成が取れ、システムの信頼性を低コストで向上できる。
- (3) オペレータにその時点での予測値を示すことで、オペレータの判断を加味した制御方策を立案するサポートを行うことができ、緊急時という制約下で、人間との協調による適切な制御を実現できる。

4.3.3 制御性能の検討

干渉量の予測誤差が制御に与える影響を評価し、提案モデルの制御性能を調べる。

前節ではコンピュータ利用に便利な離散時間系についての制御則を導出したが、以下では式の誘導に便利な次の等価連続時間系を考える。

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= \bar{A}_{ii}x_i + \bar{B}_i u_i + \bar{y}_i \\ x(t_0) &= x_0 \end{aligned} \tag{17}$$

$$J_i = \int_{t_0}^M (x_i^T Q_i x_i + u_i^T R_i u_i) dt \quad (18)$$

$$u_i = -R_i^{-1} \bar{B}_i^T \bar{S}_i x_i - R_i^{-1} \bar{B}_i^T \bar{P}_i \quad (19)$$

$$\bar{S}_i = -\bar{S}_i \bar{A}_{ii} - \bar{A}_{ii}^T \bar{S}_i - \bar{S}_i \bar{B}_i R_i^{-1} \bar{B}_i^T \bar{S}_i - Q_i \quad (20)$$

$$\bar{P}_i = (\bar{S}_i \bar{B}_i R_i^{-1} \bar{B}_i^T - \bar{A}_{ii}^T) \bar{P}_i - \bar{S}_i \bar{\xi}_i \quad (21)$$

ただし $\bar{y}_i = \sum_{j=1}^N \bar{A}_{ij} x_j$, $(M)=0$, $\bar{P}_i(M)=0$, \bar{A}_{ij} , $\bar{B}_i : A_{ij}, B_i$ の連続時間系表現

上記の系で、すなわち予測誤差のない場合の操作量、制御量を u_i^* 、 x_i^* 、(21) 式の解を P_i^* とすると [50]、

$$u_i^* = -R_i^{-1} \bar{B}_i^T (\bar{S}_i x_i^* + \bar{P}_i^*) \quad (22)$$

$$\dot{x}_i^* = (\bar{A}_{ii} - \bar{B}_i R_i^{-1} \bar{B}_i^T \bar{S}_i) x_i^* - \bar{B}_i R_i^{-1} \bar{B}_i^T \bar{P}_i^* + \bar{y}_i \quad (23)$$

が成立する。そこで $\bar{\xi}_i = \bar{y}_i + \Delta y_i$ とし、誤差 Δy_i により操作量が $u_i^* + \Delta u_i$ 、制御量が $x_i^* + \Delta x_i$ 、更に \bar{P}_i^* が $\bar{P}_i^* + \Delta P_i$ に変化したとすると、(17) (19) (21) ~ (23) 式により次の方程式が得られる。

$$\Delta \dot{x}_i = (\bar{A}_{ii} - \bar{B}_i R_i^{-1} \bar{B}_i^T \bar{S}_i) \Delta x_i - \bar{B}_i R_i^{-1} \bar{B}_i^T \Delta \bar{P}_i + \Delta \bar{y}_i \quad (24)$$

$$\Delta \dot{P}_i = (\bar{S}_i \bar{B}_i R_i^{-1} \bar{B}_i^T - \bar{A}_{ii}^T) \Delta P_i - \bar{S}_i \Delta y_i \quad (25)$$

ただし $\Delta x_i(t_0) = 0, \Delta P_i(M) = 0$

(24) 式の系が安定であるとすれば、行列 $\bar{A}_{ii} - \bar{B}_i R_i^{-1} \bar{B}_i^T \bar{S}_i$ の固有値の実部は全て非負となる。この固有値の実部の最大値を $-\alpha$ ($\alpha > 0$) とする。(25) 式の系は (24) 式の随伴系 [51] であるから不安定となり、その固有値の実部最小値は α となる。

さて、(25) 式の系の基本解行列を $\Phi(t, M)$ とすれば

$$\begin{aligned} \Delta P_i &= - \int_M^t \Phi(t, \tau) \bar{S}_i \Delta y_i d\tau \\ &= \int_t^M \Phi^{-1}(\tau, t) \bar{S}_i \Delta y_i d\tau \end{aligned} \quad (26)$$

すなわち

$$\begin{aligned}
\| \Delta P_i \| &\leq \int_t^M \| \Phi^{-1}(\tau, t) \| \| \bar{S}_i \Delta y_i \| d\tau \\
&\leq K \int_t^M e^{-\alpha(\tau-t)} = \frac{K}{\alpha} [1 - e^{-\alpha(M-t)}]
\end{aligned} \tag{27}$$

ただし $K : \| \bar{S}_i \Delta y_i \|$ の最大値で $O(\| \Delta y_i \|)$

次に、(24) 式の系の基本解行列を、 $\Psi(t, t_0)$ とすると、(27) 式および固有値に関する上記考察から

$$\Delta x_i = \int_{t_0}^t \Psi(t, \tau) \left[-\bar{B}_i R_i^{-1} \bar{B}_i^T \Delta P_i + \Delta y_i \right] d\tau \tag{28}$$

従って

$$\begin{aligned}
\| \Delta x_i \| &\leq \int_{t_0}^t \| \Psi(t, \tau) \| [-k_1 \| \Delta P_i \| + \| \Delta y_i \|] d\tau \\
&\leq \int_{t_0}^t e^{-\alpha(\tau-t)} \left[\frac{k_1 k}{\alpha} (1 - e^{-\alpha(M-t)}) + \| \Delta y_i \| \right] d\tau \\
&= \int_{t_0}^t [C_3 (e^{-\alpha(\tau-t)} - e^{-\alpha(M-t)}) + \| \Delta y_i \| e^{-\alpha(\tau-t)}] d\tau \\
&= C_1 - C_2 e^{-\alpha(t-t_0)} + C_3 e^{-\alpha(M-t)}
\end{aligned} \tag{29}$$

$$k_1 = \| -\bar{B}_i R_i^{-1} \bar{B}_i^T \|, \quad C_1 = \frac{k_1 k}{\alpha^2} (1 - e^{-\alpha(M-t_0)}) + \frac{\| \Delta y_i \|}{\alpha},$$

$$C_2 = \frac{k_1 k}{\alpha^2} + \frac{\| \Delta y_i \|}{\alpha}, \quad C_3 = \frac{k_1 k}{\alpha^2}$$

(29) 式において、 C_1, C_2, C_3 はいずれも $O(\| \Delta y_i \|)$ である。従って $\| \Delta x_i \|$ は $\| \Delta y_i \|$ のオーダーで押さえることができる。予測器をもたない単純フィードバックシステム [51] では、 $\Delta y_i = -\bar{y}_i$ であるため、予測誤差 $\| \Delta y_i \|$ が $\| \Delta y_i \| / \| \bar{y}_i \| \ll 1$ 、すなわち、他のサブプラントからの干渉量に比べて小さい場合には、予測により制御性能の向上ができることになる。

4.3.4 安定性の検討

本制御モデルによるプラント全体の安定性を考える。ここでも (17) ～ (21) 式の連続時間系を用いるが、連続時間系の安定は離散時間系での安定を保証する [50]。

(23) 式より、全プラントの動特性は

$$\dot{x} = (A_D - BG)x - BGP + A_E x \tag{30}$$

$$A_D = \text{diag}[\bar{A}_{ii}], \quad A_E = [\bar{A}_{ij}] \quad (i \neq j), \quad B = \text{diag}[\bar{B}_i], \quad G = \text{diag}[\bar{R}_i^{-1} \bar{B}_i^T \bar{S}_i],$$

$$P = \left[\bar{P}_1^T \mid \bar{P}_2^T \mid \cdots \mid \bar{P}_n^T \right]^T$$

(30) 式に、 $x_A = x - [A_D - BG + A_E]^{-1}BGP$ の変換を施すと

$$\dot{x}_A = (A_D - BG)x_A + A_E x_A \quad (31)$$

(31) 式から漸近安定条件を導くと [48]、

$$2 \| A_E^T S \| < \lambda_{\min}(Q + G^T R G) \quad (32)$$

S : 各サブプラントのリカッチ方程式 (20) の正定解から成る対角行列, $\lambda_{\min}(\alpha)$: 行列 α の最小固有値

(32) 式は、(30) 式のシステムの安定条件式となり、 $\| A_E^T \|^2$ が小、すなわちサブプラント間が弱結合のときにはプラントが安定になること、そして (32) 式が満たされるようにサブプラント分割をなすべきであることを示している。実用上の観点からは、(32) 式をみたすようプラント分割がなされていることを前提とすると、万一プラントに発散傾向が見られたとき（これは予測誤差が極めて大きくなったときのみ生じる）にも、予測による補償項、すなわち (30) 式の BGP を 0 とすることにより、プラントの安定化が図れることになり、安全性は確保できることが確認できる。

4.3.5 制御性能の評価

提案した分散制御モデルの制御性能を簡単な数値実験により確認する。

プラントの動特性を次のように仮定する。

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -0.1x_1 + 2x_2 + 2u_1 + \sqrt{0.2}\zeta_1 \\ \dot{x}_2 &= -x_1 - 0.2x_2 + 3u_2 + \sqrt{0.5}\zeta_2 \end{aligned} \quad (33)$$

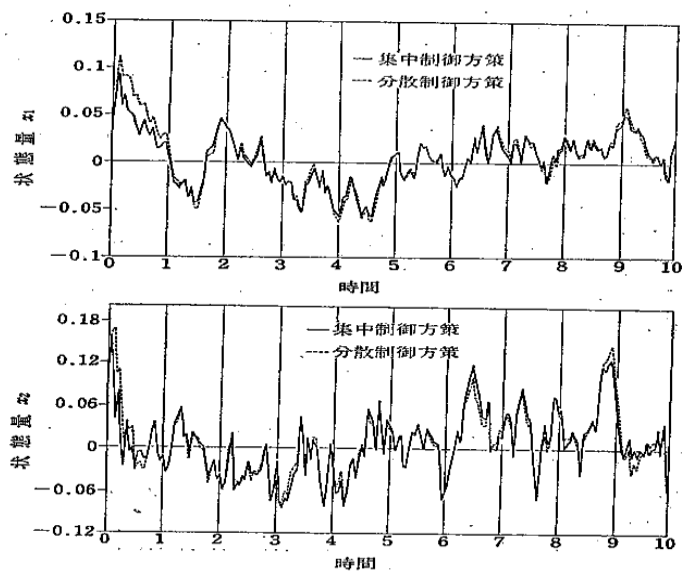
ここで、 ζ : 基準化された白色ガウス雑音

制御目標は次の J の最小化とする。

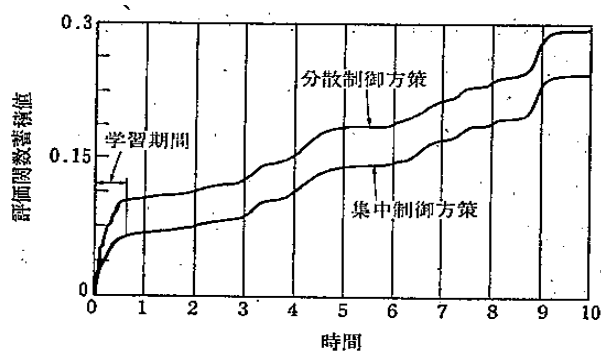
$$J = \int_0^T (2x_1^2 + 3x_2^2 + u_1^2 + 2u_2^2) dt \quad (34)$$

実際の計算は上式を差分化し、離散系で数値解を得た。そのときの条件は 制御期間 T : 10 時間、離散時間幅 5 分、予測制御期間 : 1 時間である。

このプラントに対する集中系による最適制御モデルと、提案の自律分散制御モデルとの比較を図 4.4 に示す。(a) 図は各状態量の比較であるが、制御初期を除けばほとんど一致しており、この自律分散制御モデルで最適に近い制御が行えることが示されている。これは(b) 図の評価関数累積値の比較からも容易にうかがえる。なお、制御初期は他プラントからの干渉の動特性の学習としての、 ψ の調整期にあたり、若干の効率低下が引き起こされるが、この低下は、長期の定常制御を考えればあまり問題にならない。制御性能に関しては、このほかにも種々のケースについて実験したが、いずれも最適に近い制御が可能であった。



(a) 集中系の制御性能との比較



(b) 累積評価関数値の比較

出典: 大規模プラント制御方策の分散化とその多段ダム制御への適用
電気学会論文誌C Vol106, No.3

図4.4 数値シミュレーションの一例

4.4 多段ダム制御への適用

同一水系にカスケードに設置された多段ダムでは総合指令所による集中制御が通常は実施されている。大雨洪水発生など緊急時において、総合指令所の機能不全、指令所—ダム間などの通信途絶などが発生した場合、各ダムがそれぞれの判断において制御を続行し、それぞれを安定的に運用することは、国土の保全、住民の安全を図る上で重要である。



制御目的
ダムの上下限水
位を遵守する範
囲で最適の放水
量を決定

制御戦略

- ① 流入量予測値を適応型自己回帰モデルによって予測
- ② その予測値に基づいて制御目的を満たす最適放流計画を立案
- ③ 計算された流入量、最適放流計画に基づくダム水位計算
- ④ 水位が上下限範囲内ならそのまま制御を実施
水位違反がある場合は、その補償分を放流計画に上乗せ
- ⑤ 自己水位の観測に基づき、流入量予測回帰モデルを更新
- ⑥ オペレータとの協調のために指示流入予測によるシミュレーションも可

図4. 5 多段ダム制御アルゴリズムの概要

上記のような非常事態において、各ダムが図 4.5 に示した制御アルゴリズムに基づき、考案した自律分散制御モデルによる制御を実施することで、ダム群全体の保全が図れることを示し、提案モデルの実適用が可能であることを明らかにする。多段ダム群の制御は、制御対象のもつ広域分散性、高信頼化の要求からみて、集中制御 [52] より分散制御に向いている。またダム流入量の予測困難性を考えると、階層制御による最適性は意味が薄れ、むしろ信頼性、頑強性を重視する提案モデルの有用性が高くなることも明らかにした。

4.4.1 運用方式の設定

河川に配置された各ダムの貯水池の動特性は、次の方程式で記述できる [53]。

$$\begin{aligned} A_i(h_i(t+1) - h_i(t)) &= q_i(t) - V_i(t) \\ V_i(t+1) &= V_i(t) + u_i(t) \\ q_i(t) &= \begin{cases} r_1(t) & (i=1) \\ V_{i-1}(t - T_i) + r_i(t) & (1 < i \leq I) \end{cases} \end{aligned} \quad (35)$$

ここで A_i : 上流から第 i 番目の貯水池の湛水面積, h_i : 第 i 番目の貯水池の水位,
 q_i : 第 i 番目の貯水池への流入量, V_i : 第 i 番目の貯水池からの流出水量,
 u_i : 第 i 番目の貯水池からの流出水量変化量, これは操作量に相当する,
 r_i : 降雨による第 i 番目の貯水池への流入水量, I : ダムの段数,
 T_i : 第 $i-1$ 番目の貯水池流出水が第 i 番目の貯水池に到達するまでの時間遅れ

制御の目的は、各貯水池の水位を目標水位に維持することと、各貯水池からの流出水量の変化を最小化することに置く。従って、制御指標 J は次式で与えられる。

$$J = \sum_i \sum_{t=0}^T [a_i (H_i - h_i(t+1))^2 + u_i^2(t)] \quad (36)$$

ここで H_i : 第 i 番目の貯水池の目標水位, a_i : 重みパラメータ

更に、制約条件として次の 2 点の考慮が必要である。

(1) 貯水池上下限の遵守

$$H_{i \min} \leq h_i \leq H_{i \max} \quad (37)$$

(2) 流出水量変化量に関する制限

$$|u_i| \leq b_i + C_i V_i \quad (38)$$

ここで $H_{i \min}, H_{i \max}$: 第 i 番目の貯水池の最低および最高貯水位,

b_i, C_i : 各ダム操作規程から導かれる適当な定数

上記の問題において、各貯水池をサブプラントと見なし、提案した分散制御方策を次のように適用する。

(1) サブプラント間干渉として各ダムへの流入水量 $q_i(t)$ の動特性を次式で仮定する。

$$q_i(t) = -\sum_{l=1}^{10} C_l q_i(t-l) + \omega_t \quad (39)$$

上式は (10) 式と全く同じ形であり、前章の予測アルゴリズムを用いて (16) 式の形で将来の流入水量予測値 \bar{q}_t が得られる。(39) 式の流入水量 $q_i(t-l)$ は、自ダムの水位観測値 h_i から次式で推定する。

$$q_i(t-l) = A_i (h_i(t-l+1) - h_i(t-l)) + V_i(t-l) \quad (40)$$

すなわち、この場合プラントから得られる情報は、ダムの水位のみであると仮定している。

(2) 上記の流入水量予測値 \bar{q}_i を用いて、第 i 番目のダムの放流量変化値 $u_i^*(t)$ を次式で計算する。

$$\begin{aligned} u_i^*(t) &= G(t) \{h_i(t) + \bar{q}_i(t)\} + E(t) V_i(t-1) + F(t) - V_i(t) \\ G(t) &= H(t+1) / ((1 + H(t+1) - J(t+1))) \\ E(t) &= 1 / (1 + H(t+1) - J(t+1)) \\ F(t) &= K(t+1) / (1 + H(t+1) - J(t+1)) \end{aligned} \quad (41)$$

$H(t), J(t), K(t)$ はそれぞれ、 $H(T)=0, J(T)=0, K(T)=0$ とし、次の方程式を逆時間で解いて求める。

$$\begin{aligned} H(t) &= H(t+1) (1 - G(t)) + J(t+1) G(t) + a_i \\ J(t) &= (J(t+1) - H(t+1)) E(t) \end{aligned} \quad (42)$$

$$K(t) = (J(t+1) - H(t+1)) (F(t) + G(t) \bar{q}_i(t)) + H(t+1) \bar{q}_i(t) + a_i A_i H_i$$

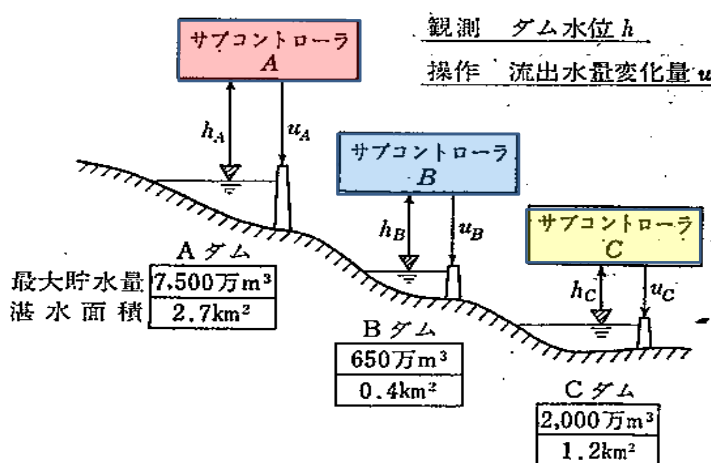
この自律分散型ダム制御方式は、流入水量 q_i の逐次予測機能を持つため、洪水時のように流入水量の変化が激しく、その予測が困難なときにも現実的な対応策として有効である。

(37) 式、(38) 式で示される制約条件は、その取り扱いに相制限を伴う最適制御方策を考慮する必要があり、計算上の複雑さを伴うため、次のような実用的アプローチで解決する。

- (1) 前述の方法によって最適放流計画をたてる。
- (2) 放流計画に関し、(38) 式の放流量制約のチェックを行い、違反する場合は制約を満たすように放流量を修正する。修正は制約を超える分を削減するという方法による。
- (3) 放流計画および流入水量予測値に基づき貯水池水位の予測計算を行い、一定期間先までの水位が (30) 式の上下限制約を超えないことを確認する。もし上下限違反の生じる場合は、(36) 式の重み a_i を適宜変更して(1)に戻る
- (4) 求められた放流計画に基づく制御を実施する。
- (5) 現時点の水位観測値から流入水量計算を行い、自己回帰式による流入水量推定値が、最小自乗フィットするように回帰係数を修正し、(1)に戻る。

4.4.2 シミュレーション結果

シミュレーションのため、図 4.6 に示す 3 つのダムを仮定する。これは実水系のダムをモデルとした設定になっている。



出典: 大規模プラント制御方案の分散化とその多段ダム制御への適用
電気学会論文誌C Vol106, No.3

図4. 6 多段ダム制御の対象プラント

貯水池の諸元も、現実存在する多段ダムの値を用いている。洪水規模は、各ダムの計画洪水量（ダム設計時に構造上耐えうる最大洪水規模として仮定された量）を超えるものを設定した。

シミュレーションの結果を図 4.7 に示す。図中には、上流ダムのコントローラが 1 つ下流のダムのコントローラに対し、流出水量の計画値を通知するという通信機能を加味した場合（集中制御モデルの場合に相当）の結果を合わせて示した。この図から提案した分散制御方案は、次の諸点からみて多段ダム制御に対し有効であると言える。

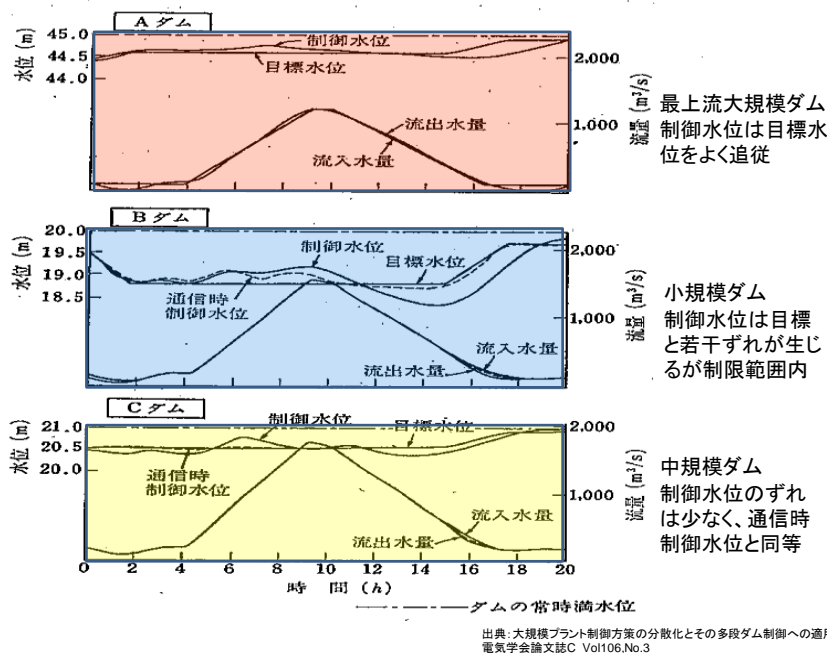


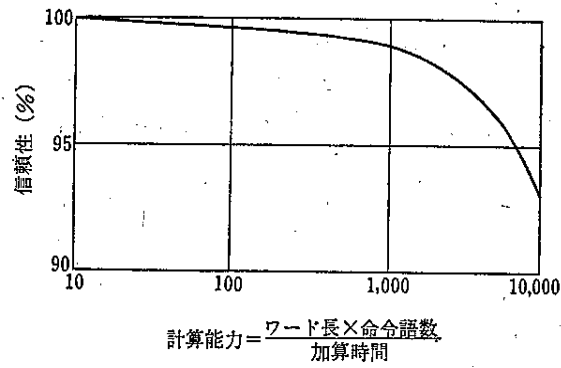
図4. 7 多段ダム制御のシミュレーション結果

- (1) 計画洪水量以上という厳しい流入条件にもかかわらず、いずれのダムにおいても貯水池上限制約（常時満水位）が遵守できている。目標値追従という制御目的の観点からは、A ダム、C ダムでは最大偏差 30 cm以下と良好な制御が行えている。B ダムでは貯水池面積が小さいため、水位の振れはかなり大きい、最終貯水量の確保、上限制約の遵守が可能で、実用上の問題は少ない。
- (2) 上流ダムの放流計画を下流ダムが受け取るという通信機能を付与すれば、制御性能は格段に向上する。従って実用的には通信を加味したシステム構成をとるのが良い。提案した分散制御方策は、通信途絶の場合にも、各ダム制御が十分機能することを保証するもので、その意味で信頼性の高い方策を提供するものと言える。この例では予測値と真の流入水量との差はモデルの設定条件を満たすに十分小さく、制御性能は予測により向上している。

4.5 モデルの評価

提案の自律分散制御モデルの有効性を計算量と信頼性の観点から、集中制御モデルとの比較において評価する。このため次の仮定を置く。

- (仮定 1) 制御モデルの計算負荷 L_N は解くべきリカッチ方程式の次元に比例する。
- (仮定 2) 計算能力 150 のコンピュータが 4 次元プラントの集中制御モデルの計算ができる。
- (仮定 3) コンピュータの計算能力と信頼性の関係を MTBF から導出し図 4.8 とする

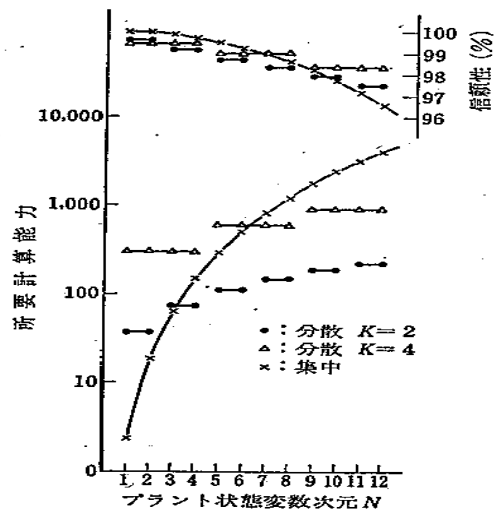


出典: 大規模プラント制御方式の分散化とその多段ダム制御への適用
電気学会論文誌C Vol106, No.3

図4. 8 計算能力と信頼性の関係

上記の仮定に基づくと、状態変数の次元が N であるプラントに対する集中制御モデルの計算負荷 L_c [54] は、

$$L_c = 2.34N^3 \quad (43)$$



出典: 大規模プラント制御方式の分散化とその多段ダム制御への適用
電気学会論文誌C Vol106, No.3

図4. 9 プラント状態変数の次元に対する所要計算能力と信頼性

自律分散制御モデルの計算負荷 L_D は、分割された各サブプラントの状態変数の次元を K とし、各サブコントローラの計算負荷を予測のための計算を含めて、仮定 1 の 2 倍と考えると ($[Z]$ は Z を越えない整数を示す)

$$L_D = [N/K] \times 4.68 \times K^3 \quad (44)$$

プラント状態変数の次元 N に対する所要計算能力およびその信頼性の計算結果を図 4.9 に示す。ただし、 K は 2 および 4 の場合を示す。同図から次元数の増大に伴い、所要計算能力および信頼性とも分散制御のほうが優るようになること、および分散度が大きいほど所要計算能力が少なく済む反面、信頼性は低下することがわかる。

以上の考察および自律分散制御モデルが、環境変化に対し強い適応性をもちコントローラの故障が限定できる点、および各サブコントローラのもつアルゴリズムが同一でバックアップ用コントローラが容易に任意のコントローラの代替が可能であり、低コストで高い信頼性を達成できる共有バックアップ構造が採用できる点からみて、提案モデルは実用的に優れたものと結論できる。

4.6 押し量る制御のまとめ

多段ダムのように集中系操作が一般的で、かつサブシステムが比較的緩く結合している大規模システムは数多い。このようなシステムにおいて集中制御を担当する指令所からの制御指示が失われた時には、それぞれのサブシステムオペレータは自プラントのコンピュータが提供してくれるプラント状況と自らの経験によって、自サブシステムを安全に、かつ全体の系に危険を及ぼさないように運転制御することが強いられる。これを可能するには、自サブシステムで得られるセンサー情報のみから周囲環境の影響を推測できるモデルの開発と、そのモデル計算を行うコンピュータのサポートを得て、自サブシステムのみならず、系全体を安定的に運転制御するためのマンマシン協調制御方式を定式化する必要がある。

本研究で定式化した方式は、自己回帰型適応制御と最適制御を組み合わせた構成を持ち、適応制御によって環境変化を、最適制御によってその情報をベースとした操作量の計算を行うもので、オペレータには環境変化の将来予測と、その予測を基にした最適操作量推奨値を提示することができる。この制御方式は、一部故障の影響が限定できるというコントローラ自律性とアルゴリズムの一様性により特徴づけられる。すなわち、各コントローラは自律的動作が可能で、他のコントローラの故障に影響されにくい制御構造を提供するものとなり、制御システムの信頼性向上も期待できる。またアルゴリズムの一様性により、安価な信頼性向上策である共有バックアップ構成の採用が可能となる。計算負荷面では、プラント変数が 6 以上の場合には集中制御方策に比して小さくすることができ、しかもそれを多数のコントローラで分担することになるため、安価なマイクロコンピュータの採用によるコストの低減が可能となる。このことは、2 変数制御系に対するシミュレーション実験を通して実験的に証明した。更に、計算量、信頼性の 2 つの観点から提案モデルと集中制御モデルを比較し、提案モデルの特徴と適用可能性を明らかにした。

この自律分散制御モデルは、オペレータにとっては、状況適応的に信頼できる情報、他のシステムからの影響の予測値など、をコンピュータが常時提供してくれるものであり、それに基づいてシステムを安定して運転するための高度な判断を行うことが可能となる。また情

報途絶時にも比較的良質な制御を継続できる手段が用意されるという意味でも、安全なオペレーションのベースと位置付けることができる。提案した自律分散制御モデルの適用対象は、プラントが比較的緩い結合をもつ均質なサブプラントに分割できるという場合である。この種のプラント特性は上水道配水網、電力配電網など現実によくみられ、提案方策の適用性は広い。

具体例として1つの水系に接続して置かれたダム群の緊急時制御を取り上げ、実規模データでの実験を行った。この方式は自己測定可能な水位データや放流量など限られた情報をもとに最適放流量を決める方式で、環境同定のモデルを常にコンピュータ内でアップデートし、緊急時にはそのモデル結果に基づいて制御を行う、という環境推定型制御モデルになっている。実水系のダム群にこのモデルを適用した結果、集中制御とほぼ同等の制御が実現できることを確認した。各ダムのオペレータは、コンピュータが予測した推定流入量や放水量推奨値を参照しつつ、緊急時に対応した運転制御を行えるようになる。このモデルは緊急時バックアップモデルとして、実水系の多段ダム制御系に組み込まれている。推し量る制御の成果を図4.10にまとめた。

課題

サブシステムの制御において、指令所からの指示が失われたという状況において、測定可能な限定されたセンサーデータのみから、環境の動向を把握し、系全体の安定化を図れるようにするためのモデルの構築とそれを用いたマンマシン協調制御方式の確立

成果

- ・同一水系に設置された多段ダム制御を例に、適応型自己回帰モデルと、最適制御モデルの組み合わせによって安定した制御が実現できることを示した。
- ・適応型自己回帰モデルによって将来の環境変化を先取りして推し量れるようにすることで、指令欠落でも人間とコンピュータの協調で安定した操作を実現できるようにした。
- ・2級河川水系多段ダム制御システムの緊急時モデルとして組み込んだ。

論文等

増位, 船橋, 大成: 大規模プラント制御方策の分散化とその多段ダム制御への適用, 電気学会論文誌C, Vol.106, No.3, pp.33-40, 1986
M. Funabashi, S. Masui, & F. Wakamori: A Reliable Scheme for Controlling Large Scale Plants and its Application to Multiple Reservoir Operation, Proc. of IFAC 8th World Congress, 1981

図4.10 推し量る制御のまとめ

この「推し量る制御」において、人間とコンピュータがどのように協調するかを図4.11にまとめた。従来は、単独制御で、流入量の増加が見込めるときは、緊急時の対策としてダム本体の安全を担保するため、最大放流を行ってできる限り水位を低位に保つという手段が採用されることが多かった。このことは流入量の減少にうまく追従することができず、貯水水量の回復に多大な時間を要する結果につながるがあった。モデルの導入によって、限られたデータからでも将来の流入量や水位の予測が可能となることによって貯水水量の迅速な回復を行える手段が提供できた。ダム制御においてはダム本体の安全を保つことが最優先とな

るが、これを担保しつつ貯水量の回復が容易になることは、ダムオペレータの負荷軽減に大きな役割を果たすものとなる。また予測された水位や流入量を参考として、実際の観測水位との差分を人間が考慮することによって、放流量を状況適応的に増減することや、天候などの外乱要因を考慮して制御のタイミングを調整するなどの措置を講じることができるようになり、協調の幅を大きく拡大することができた。




	<p>集中制御喪失時の 緊急対応</p> <p>水位状況を見なが らの安全確保運転</p>	<p>ダム本体安全のための最大放流 制御</p> <p>貯水水量回復の大幅遅延</p>
	<p>モデルによる将来 水位の動向理解</p> <p>予測結果の信頼度 確認と制御調整</p>	<p>貯水水量の迅速回復のための適 応制御の実現</p> <p>ダム本体安全の確保</p>
	<p>自律分散モデルに 基づく流入水量、 水位の将来予測の 提示</p>	<p>予測結果と現在値の比較による予 測値信頼度の視認的確認と制御 指示の状況対応調整</p>

図4. 11 押し量る制御における協調

第5章 経験を活かす制御－熟練者の知識の活用モデル

数式化、自動化が難しい大規模プラントでは、熟練したオペレータがプラント全体を監視し、不具合を発見してそれを修正／修復するという操作オペレーションを繰り返し行っている。しかし操作や不具合事象などに習熟するには多大の時間が必要で、かつそのノウハウを伝えるにはマンツーマンの徒弟式教育しか手段がなかった。熟練オペレータにとっても、代替者がいないという状況は苦痛を伴うものとなり、操業に追われて新しい知識獲得ができないというジレンマも生じていた。このため熟練者の代替が可能なコンピュータモデルを構築することで、コンピュータを熟練者に仕立て上げ、未熟なオペレータとコンピュータの協調で、熟練者並みの操業パフォーマンスを上げようとする試みを開始した。これが可能となれば、熟練オペレータ自身も知識の伝授というコンピュータとの共同作業を通して知識の整理や新しい発見が可能となることも期待された。そのため人間のオペレータ自身が自らのオペレーションをそのままコンピュータに覚え込ませることができるシステム制御向けエキスパートモデル化方法 [56] [57] を開発した。

高炉操業はその内部でどのような物理／化学反応が生じているかについてわかっておらず、熟練したオペレータによる経験ベースの運転が主体になっていた。本章では、この高炉操業のコンピュータ化を目指したエキスパートシステムモデル構築について論じる。開発したモデル化方法論に基づき、開発した高炉操業エキスパートシステムは熟練オペレータと遜色ない運転が可能であり、製鉄所高炉操業システムとして実用化された。

- 課題 (1) 高炉は複雑な熱化学プラントであり、熟練した人間オペレータでしかうまく操業が行えなかった。その知識・ノウハウをコンピュータに取り込み、かつ日々の運用変化に容易に対応できるようにすることが必要であった。
- (2) それによって、未熟者にとってはコンピュータとの協調で熟練者並みのパフォーマンスが可能となり、熟練者はコンピュータへの知識入力でノウハウの整理、発見が可能になる。

解決方針

- ・コンピュータの専門家でない制御エキスパートが理解しやすく、自らの知識を入力できるエキスパートシステムモデルを開発
- ・高炉操業エキスパートシステム開発に適用し、現場オペレータ自身による知識ベースの作成、編集を実現
- ・現場オペレータの知識の継承が容易化



イメージ図：高炉

図5.1 経験を活かす制御のための問題の設定

5.1 プラント操業における知識活用

プラント規模の大規模化や、プロセスの複雑化などによって制御のための数式モデルが導けず、熟練したオペレータが長年の経験に基づいて操業を安定化させているというプラントが数多くある。熟練者の経験は失われる可能性が高く、そのため熟練オペレータのもつ経験をコンピュータに取り込み、日常の操業の安定化をはかると同時に、若年者への経験の継承を図りたいというニーズが顕在化していた。

高炉では熟練した熟練オペレータによる監視操業が一般的である。数式ベースのモデル化は、高炉そのものの動特性がよくわからないという状況の下では実現の見通しは今もない。内部でどのような物理／化学反応が生じており、どのような制御が最適であるかについても明確にはわかっておらず、コークスと鉄鉱石の投入制御というかなり長い遅れタイムをもつ制御手段しかとれない高炉の操業は、人間のオペレータの永年の経験に依存せざるを得ない状況にあった。そこで、図 5.1 に示したように、人間がもつ高炉運転ノウハウをモデル化してコンピュータに移植するエキスパートシステムのアプローチを高炉に適用し、高炉モデル化の新しいアプローチを開拓した。実際の高炉への適用実験においては、熟練したオペレータに遜色ない精度を上げるに至ったが、このモデルの効用は制御の質ではなく、専門家であるオペレータとの協調的関係を構築するため、制御アルゴリズム自身を日々成長させていけるような手段を提供することにある。このモデルは実際の大規模製鉄所で実用化され、2 つの高炉の日々のオペレーションに活用されているほか、熟練オペレータのノウハウ伝承にも役立っている。

5.2 エキスパートシステムモデル

エキスパートシステムはエキスパートと呼ばれる人間の専門家の判断過程をコンピュータが代行できるようにしたものである。エキスパートシステムは、図 5.2 に示すように推論機構とよばれる知識処理プログラムと、特定の分野の問題についての専門家の知識を記述したルール群を含む知識ベースからなる。外部データはデータベースに格納され、それらのデータが知識ベース内のどの知識に合致するかが推論機構によってチェックされ、それらの適用可能な知識を順に連鎖させることによって推論結果を得、ユーザインタフェースを介して、一般社会からの問い合わせに対して、専門家の知識に基づく回答を与えるというしくみである。1980 年代以降、実世界の問題を解く実用的手法としてエキスパートシステムが広く利用されるようになった。エキスパートシステムでは、知識ベースは「もし…ならば…」という形式の自然言語的なルール表現で記述されることが多い。例えば、「もし材料投入後経過時間が 5 時間以内で、炉体温度が 1200℃以上で、かつ低下傾向ならば、その原因が材料詰まりである可能性が高い (0.8)」などがルールの典型になる。このルールで「もし~ならば」までは条件部、「その~高い」までは結論部とよばれることが多く、(0.8) はこのルールの確信度 (信頼度数値) である。

推論機構は、このルール群を使って推論を行うプログラムである。推論機構は、まずルー

ルの条件部とオブジェクトメモリと書かれた記憶域に格納されているデータが一致するかどうかを調べ、もし一致していれば、そのルールの結論部を新たなデータとしてデータベースに書き込む。生成された（結論部であった）データがさらに別のルールの条件部と一致していれば、更なるデータが書き込まれ、という形で推論が進行する。

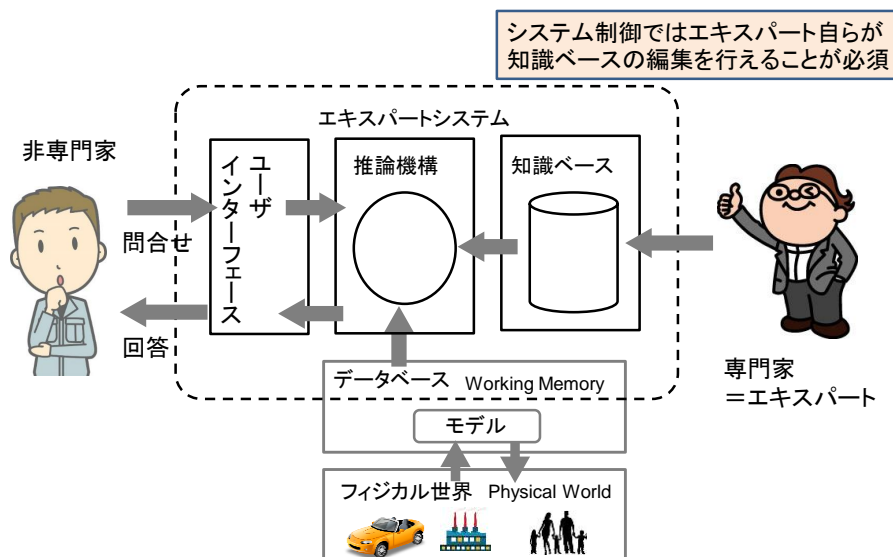


図5.2 エキスパートシステムとは

このようにルールの連鎖による三段論法的な推論によって結果が導出される。この過程では命題論理、一階述語論理などが使われ、論理の連鎖をたどることによって利用者に対して「何をしているか」「どう推論したのか」などを説明することができる。

エキスパートシステムは通常のプログラムと比較したとき、以下のような利点がある。

- ・ ルールを自然言語的に表現できるため、専門家や利用者の知識を平易に入力できる。
- ・ 知識をルールの形で知識ベースに蓄えるため、知識が多くなってもプログラム（推論エンジン）を書き変える必要がない。
- ・ ルールの追加・修正・削除などが比較的容易である。
- ・ 推論の根拠が説明可能であるので、利用者やオペレータが安心できる。
- ・ 専門家の知識を、エキスパートシステムにすることで後世に引き継ぐことができる。

一般に、エキスパートシステムが扱える問題は、人間のエキスパートが行うことを真似ることによって解決できるものである。問題領域の専門家から経験則を聞き出す過程は結構難しく、あいまい過ぎてルール化できない場合や、ルールが相互に矛盾するなどの場合が生じることもある。知識エンジニアとは、このような場合に領域の専門家を援助して、知識の整合化を図る人を指す。エキスパートシステムは、従来のアルゴリズムで決定することができない悪構造の問題解決のために使われることが多い。大規模システム制御ではこの「悪構造」の問題に直面することが多く、エキスパートシステムはその解決のためのモデル化方法とし

て有用である。

5.3 システム制御知識のエキスパートシステムモデル化

医療診断などに使われる一般的なエキスパートシステムでは、分野の専門家にはモデルの理解ができず、そのままではシステム制御には不向きである。さらに外界との接点などに関しても、システム制御特有のしかけが必要となる。そこで人間、特に熟練したオペレータとの協調という観点を前提に、専門家自身が知識の入力や改変などが行える新しい構築ツールの必要性が生じた。このために執筆者自身が、システム制御向けエキスパートシステム構築ツール EUREKA(Electronic Understanding and Reasoning by Knowledge Activation)[70]を設計開発し、実用に供した。

5.3.1 モデル化の視点 [58]

ここでは自動車の運転制御を例にして、モデル化の考え方を説明する。

自動車の運転を考えると、自動車そのものをどのようにモデル化するか、また運転という制御動作をどう表現するかが第一の課題になる。自動車運転者から見える自動車とは、アクセルを踏み込みことで加速し、ブレーキによって減速ないし停止し、ハンドル操作によって右折、左折、車線変更などを行い、シフトレバーの操作によってトルクを調整できる機械である。開発したシステム制御向けエキスパートシステム構築ツール EUREKA ではこれを図 5.3 に示すようなオブジェクト[59][60]で表現する。自動車の諸元を示す属性データと、動作を表現する動作メソッドからなるモデル形式である。



図5.3 オブジェクト

アクセルの踏み加減によってどのような速度がどの程度の時間で達成できるかなどは、車体重量やエンジン性能などの属性データを用いて数式で表現することができる。その他ブレーキの利き具合、シフトとトルクの関係なども自動車の諸元がわかれば数式で記述でき、動作メソッドとして定義できる。このオブジェクト形式を用いれば、シフトレバー位置、アクセルの踏み具合、ブレーキの掛け具合などを外部から与えることによって、その自動車の速度や、サイバー道路上の位置を計算して返す、という自動車のモデル化が可能となる。このモデル化をひとつひとつの自動車に対して行うこともできるが、自動車の速度などは個々の自動車の重量やエンジン性能などが決まれば同一式で算出できるので、それらの諸元を属性データとすることで、速度計算の数式を汎用メソッドとして利用できる。これを可能とするのが、オブジェクト指向のクラス概念である。一般的なオブジェクト指向プログラミング[59]では、クラス階層数に制約が置かれることはなく、当該オブジェクトがもたないメソッドやデータは上位のクラスのそれを利用することが原則となる。しかしながらあまり深い階層は、システム制御においては混乱を生む要素となる懸念がある。人間との親和性という観点からは、サイバー世界のオブジェクトは、フィジカル世界のものやことと、ほぼ一対一、それを見るだけでイメージがつかめるものであることが望ましい。すなわちシステム制御におけるオブジェクトは、フィジカル世界の実体の写像として定義されるべきである、と結論づけた。このことから、システム制御のためのオブジェクトは、人間の理解容易化という観点から、インスタンス主体とすべきであるとした。そこで図 5.4 に示すように、EUREKA のクラス階層は 2 段までと定めた。

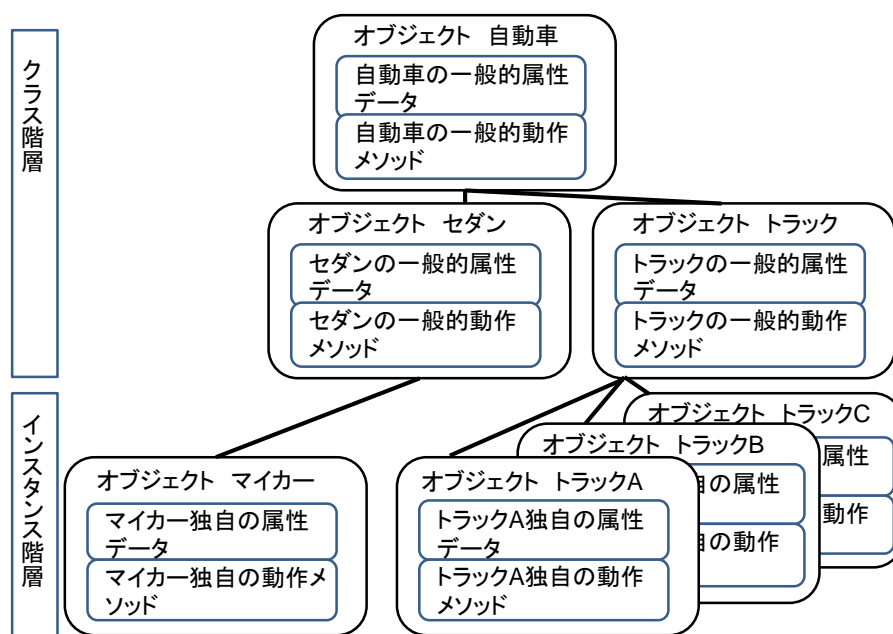


図5. 4 システム制御向けオブジェクト階層の設計

オブジェクトとして自動車を表現できることは分かったが、それでは自動車オブジェクト

に外部から与えるべきシフトレバー位置、アクセルの踏み具合、ブレーキの掛け具合などは、どうして決めればいいのか。これは人間の運転者が行っている制御動作をサイバー世界に取り込むことで実装可能である。ドライバーは周囲の自動車の状況、自車の速度、路面の状況、天候などを総合的に判断し、その状況にあった速度を設定し、その速度を達成するために必要なシフトレバーの位置、アクセルやブレーキの踏み具合を決めている。そのような総合判断と意思決定をサイバー世界において表現するにはどのような表現が適切であろうか。我々はそのような表現の候補として、人間の意思決定プロセスに類似していると思われる IF～THEN～型のルール形式を採用することを考えた。この形式はエキスパートシステムとして、人間の知識をコンピュータに埋め込む際に多用された形式で、人間との親和性は十分検証されている。

例えば

IF 自車の前 10 メートルに他車が存在しない

現在の自車速度が制限速度以下である

THEN 自車のスピードを制限速度まで加速する

というような運転ノウハウがルールとして表現できる。図 5.3 オブジェクトの属性データから、他車位置情報と現在の速度を示す数値や情報が引き出され、ルールの条件部との一致度によって、制限速度まで加速すべきかどうか意思決定される、という図 5.5 で示したような形をとらせることができる。

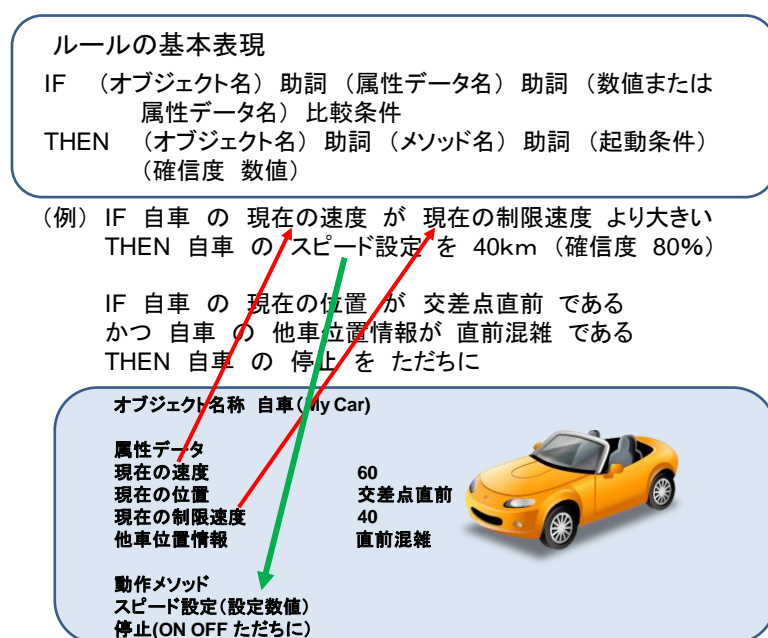


図5. 5 自然語風ルール表現の設計

以上述べたように、システム制御のためのエキスパートシステムモデルにおいては、制御対象に関するデータとその動作をオブジェクトの属性データと動作メソッドで、人間の運転

に関する知識をルール形式で表現することで、システム制御の観点からのモデル化が可能となることがわかった。このような分析を通してシステム制御を設計していくことが EUREKA のエキスパートモデル化方法である。

オペレータの知識を記述するルールは、人間との親和性を上げ、知識の獲得を容易化するために、自然語の話し言葉に近いものとする表現を採用すべきと考えた。

採用したルールの表現は、図 5.5 に示したように

IF	(オブジェクト名)	助詞	(属性データ名)	助詞	(数値または属性データ名)
比較条件					
THEN	(オブジェクト名)	助詞	(メソッド名)	助詞	(起動条件)
(確信度 数値)					

を基本とし、条件 (IF) 部は「かつ (AND)」や「または (OR)」の接続詞によって複数の条件を記述、結論 (THEN) 部も接続詞「かつ (AND)」によって複数のメソッドの起動を可能とした。助詞は日本語としての滑らかさを確保するためのもので、任意のものを使うことができるようにしてある。

IF	(オブジェクト名)	助詞	(属性データ名)	助詞	(数値または属性データ名)
比較条件					
接続詞	(オブジェクト名)	助詞	(属性データ名)	助詞	(数値または属性データ名)
比較条件					
THEN	(オブジェクト名)	助詞	(メソッド名)	助詞	(起動条件)
(確信度 数値)					
かつ	(オブジェクト名)	助詞	(メソッド名)	助詞	(起動条件)
(確信度 数値)					

さらにこのルールそのものに確信度を与えた。これは曖昧な知識を現場のオペレータから引き出すことを容易にする、という観点から設定したものであるが、オペレータの気持ちの負担を軽減するという副次的効果が生じ、オペレータ自身が自分の知識を自由かつ気楽に入力できる下地になった。またこの確信度の調整によって、推論過程の制御あるいは調整もある程度の自由さをもって行うことも可能となった。

5.3.2 フィジカル世界との接点の設計

大規模プラントのエキスパートモデル設計論としてはルール設計およびオブジェクト設計だけでは十分とは言えない。フィジカル世界の個々の対象要素に関する測定データや諸元をどのようにサイバー世界に取り込むかが次の課題になる。言葉を変えるとフィジカル世界とサイバー世界間のデータマッピング、図 5.2 の「オブジェクト 自車」の属性データである「現在の速度」「現在の位置」「現在のシフトレバー位置」「現在のアクセル状況」など計測データをどのタイミングでオブジェクトの属性データに反映させるかという問題である。

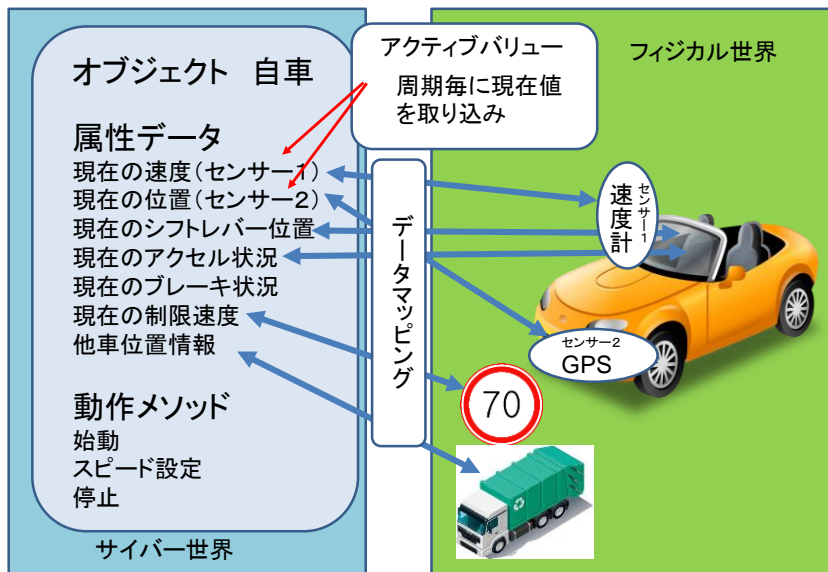


図5.6 オブジェクトへのデータ自動取り込みの設計

それぞれのデータを計測するセンサーは備えられているとして、そのセンサーとオブジェクトの属性データの間をどのように表現すればよいかを考えた。これはサイバー世界とフィジカル世界のマッピング方法のモデル化にあたる。このための方策として、図 5.6 に示したようにオブジェクトの属性データにセンサー識別番号を埋め込むという手段で、属性データとセンサーの紐づけを行う形を採用した。そしてセンサー識別番号を付与された属性をアクティブバリューと呼んで、このアクティブバリュー属性のデータをシステム周期ごとに紐づけされたセンサーからデータ入力してデータ属性を書き換えることで、サイバー世界にフィジカル世界のデータを取り込むという形をとった。この方式はセンサーからのデータを明確にサイバー世界内で位置づけるという観点から自然であり、システム設計者やオペレータに受け入れやすいものということができる。

ルールにはさらにそのルールを適用すべきタスク番号を付与する [61]。タスクとは、制御のため一連の関連動作の集合を指し、例えば診断タスク、操作量決定タスクなどがある。同じタスク番号をもつルールは、当該タスクが実施される場合のみに条件部のチェック、ルールの実行を許可される。このタスク分割もシステム制御におけるエキスパートモデル化の特徴で、これによってオペレータの制御知識がいつ使われるべきかを明示的に指定でき、かつルールの処理時間を大きく短縮することができる。

5.3.3 マッチングの高速化

システム制御向け知識処理では、リアルタイム性の確保が極めて重要である。どんどんと変化するデータに対してどのルールがマッチするかを高速に処理する必要があり、基本的には図 5.8 に示したような手法を用いて、できる限りの高速化を行った [58] [63]。またさら

に工夫を重ねる [64] [65] ことで推論実行にリアルタイム性を持ち込むことを可能とした。

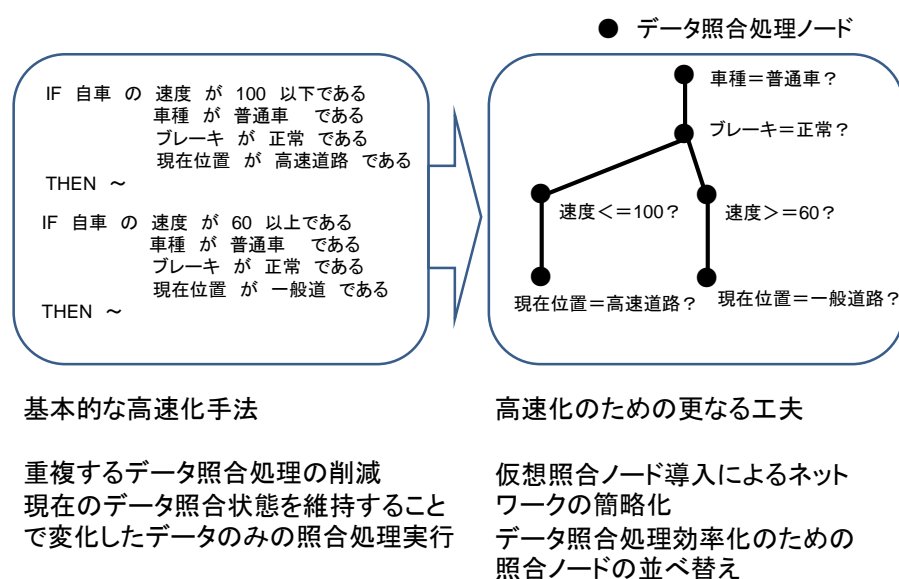


図5. 7 システム制御向け知識処理の高速化

5.3.4 設計段階でのモデル構築 [62]

・オブジェクトの設計

システム制御のためのモデルを構築する上で必要な認識対象はすべてオブジェクト化の候補となる。システム制御においては同種の機械類ひとつひとつに関してクラスを設計し、個別の機器はそのクラスのインスタンスとして設計するのが自然である。オブジェクトは、その対象の諸元を表現する属性データ部分と、その対象の動作を示すメソッドから構成する。個々のインスタンスの属性データにはアクティブバリューを設定し、システムのセンサー番号を付加することにより、システム周期ごとに最新の計測データが格納されるようにする。各オブジェクトはメソッドを通してのみ相互にデータ参照あるいは相互通信などをすることができる。この処理は一般的なオブジェクト指向プログラミングと同様であり、オブジェクトの独立性を高め、それぞれを個別に設計することを可能とする。このことは、新しい設備やセンサーが追加されたり、更新があったりすることが多い大規模システム制御に適した特性である。また個々の機器の関係がオブジェクト間のメッセージ送信の形でビジュアル化できるという効果も生まれ、今どのような意思決定が進められているかをオペレータが視認することが容易になる。

・ルール設計

ルールは対象のプラントを制御する熟練したオペレータのもつ対象を制御するための知識やノウハウを記述するのに使われる。具体的には上記オブジェクト群として表現されたプラント全体を俯瞰し、その俯瞰結果をもとに異常状況を検知し、その対応を図る形を基本形と

て記述する。大規模プラントして取り上げたのは高炉 [66] である。

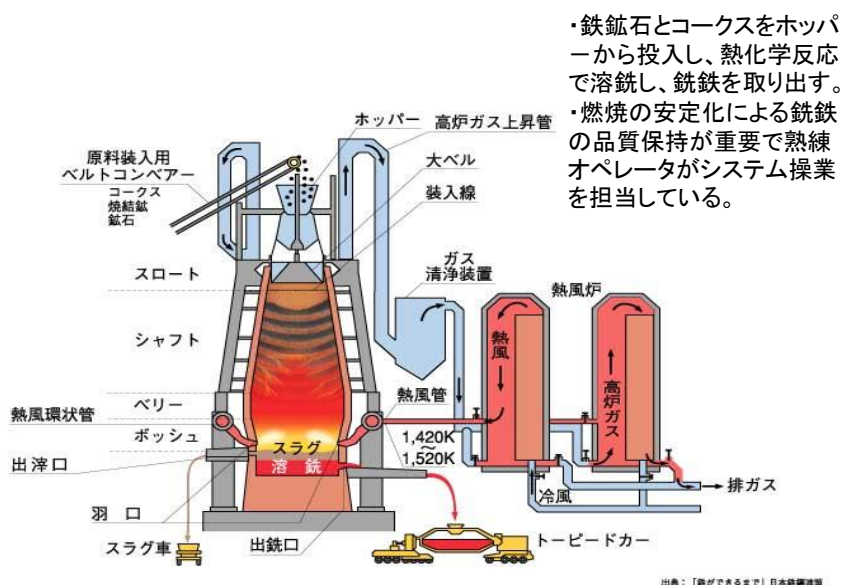


図5. 9 高炉とその付帯設備

高炉は図 5.9 のように、鉄鉱石とコークスを投入して、コークスを燃焼させ、その熱で鉄鉱石を融解して銑鉄を取り出す設備である。基本的な操作は高炉上部からコークスと鉄鉱石を順番に投入するという単純なものであるが、その時々燃焼の状況によって燃焼に偏りがでる。オペレータはこの燃焼の偏りの原因を、高炉の各所に設置されたセンサーからのデータを解釈して推定し、その原因を取り除くオペレーションを行う。このように比較的単純な制御ではあるが、連続系の制御概念からは大きく外れた人間的な制御方法である。

高炉の操作は、その設備的な条件から現場オペレータのノウハウによって行われている。そのため、ノウハウの個人差や熟練オペレータの減少が、安定した高炉操作を維持していくうえでの問題になっていた。この問題を解決する 1 つの方法として、知識処理技術を利用した高炉操作エキスパートシステムの開発が望まれていた。このシステムは、高炉の操作が日々のミーティングによって決定されるなど、操作の方法が日々更新されること、また決定された操作方法に即時対応する必要があることを考慮し、オペレータ自身の手による知識の移植および検証を可能とした知識処理システムとして開発を行った。

5.4.1 高炉操作エキスパートシステムの開発 [67] [68] [69]

高炉は鉱石、コークスを原料として溶鉄を得る大規模なプラントであり、その設備条件から肉眼で炉内の状況を監視することは不可能である。そこで、炉内の状況を知る手段として、多数のセンサーを取り付け、その情報を連続的に収集・分析している。オペレータは、その情報と日ごろの操作経験から得られたノウハウをもとに総合的に炉内の状況を判断し、高炉

の状況を安定に維持することを目指して操業を行っている。しかし、熟練オペレータといっても、数千点にも及ぶセンサーの情報をすべて監視し、緩やかな高炉状況の推移まで察知するのはきわめて困難である。また、オペレータ各自のノウハウは必ずしも同一ではなく、操作量、操作時期に個人差があるため、常に高炉の状況に即した最適の操作が行われているとは限らない。さらに、熟練オペレータの減少とともに、優れたノウハウが失われていくことも大きな問題である。この問題を解決する 1 つの方法として、高炉操業エキスパートシステムの開発を試みた。

エキスパートシステムは、エキスパートが保有する様々なノウハウをコンピュータに移植し、エキスパートと同等の判断を行わせることを目的としている。一般にエキスパートシステムは、知識エンジニアと呼ばれるコンピュータおよび情報技術の専門家の手で構築される。知識エンジニアは、実際に知識を保有しているエキスパート（高炉の場合は熟練した現場オペレータ）からインタビュー形式で知識を抽出し、それを基に知識ベースを構築する。しかし、この方法ではエキスパートの微妙な知識や知識の抽出の深さが、知識エンジニア自身の理解度や技量によって制約を受ける可能性があり、知識の正確な移植という面で不安が残る。また、高炉の操業は常に不変なものではなく、むしろ、日々のミーティングによって見直され更新されていくという性格をもつものである。そのため、システム構築後も容易かつ即時に知識の更新が可能なシステムでなければならない。そこで高炉操業エキスパートシステムの開発においては、これらのことを考慮し、現場オペレータが自分の知識を自分で移植、検証を行い、将来にわたって知識をブラッシュアップできることを可能にすることを目指した。このように将来にわたり、エキスパートがみずからの手で知識をブラッシュアップ可能なシステムにするために要求される様々なニーズとその解決方法の例、および高炉の操業管理に適用した評価について述べる。

5.4.2 システムに対するニーズと特長

このシステムが持つべきとした要件は以下のものである。

(1) 知識の表現がわかりやすい

コンピュータの専門家ではない現場オペレータが直接知識を記述する主体となることを考慮し、知識の表現は日常使用している日本語に近い表現にすること。

(2) 知識の入力操作が容易である

知識の入力操作自体を極力簡単化することで、新たな知識の獲得・削除・改変などを容易に行えるようにすること。知識を入力する端末にはガイダンス機能を備え、コンピュータの操作に不慣れなオペレータでも容易に知識入力が行えるようにすること。

(3) 作成、修正した知識のテストが容易であり、かつ随時行える

新たな知識や改良した知識を入力後、そのテストが容易かつ随時行えるようにし、オペレータが積極的に知識のブラッシュアップを行える環境を提供すること。そのための知識ベースのテスト時、オンライン側へ悪影響を及ぼさないこと。

(4) データが自動的にとりこめる

数千点に及ぶ高炉のデータを、オペレータなどの人手を介することなく、コンピュータ側で常時使用可能とすること。限られたリソースを有効に活用でき、人間のオペレータ並の頻度で診断や操業指示などを提供できること。

(5) コンピュータがマルチタスクを取り扱える

1 台のコンピュータで複数の高炉のオンライン推論、テスト推論を同時に動作可能とすること。限られたリソースを効率よく活用すること（執筆者注：これは 1980 年代後半の開発当時のコンピュータ技術の制約から生じた要求である）。

上述のニーズに基づいて開発された高炉操業エキスパートシステムは、以下に述べるような特長を備えたものになった。

(1) 知識処理ツールとして、日本語処理をサポートしている EUREKA [70] を採用し、オペレータの知識を日常の日本語表現とほぼ同じ表現で記述できるようにした。

(2) 知識処理用端末にパーソナルコンピュータを採用し、ワードプロセッサ機能を装備することで、現場オペレータでも容易に日本語入力ができるようにした。また、入力を促すガイダンス機能をサポートし、入力は番号で指定していけば目的とするルール、オブジェクトなどを容易に検索できるようにした。ルールの作成では、条件部と実行部を指定された枠の中に入力するだけで、“IF”、“THEN”、“(”、“)” のように、文法上は必要であるが人間の思考上不必要な記号は入力する必要がなく、コンピュータ側で自動的に付加するようにした。

(3) 知識ベースのテストを行うためのユーティリティを装備し、テストにあたっては、オンラインデータ、保存データ、磁気テープ保存データ、オペレータによる CRT からの手動入力データでテストを可能にした。またテスト用端末はオンライン用と別に準備し、オンラインの推論を妨げることをないテストを可能とした。このことにより、作成、修正された知識の検証を、より高いレベルで行えるようになった。また知識ベースのテストでは、知識処理ツール EUREKA と会話形式で実行ルールのトレース、実行中断、スロット値の表示・設定などが行えるようにし、きめ細かなテストが可能となった。

(4) 推論は、各高炉から、そのプロセス特性を考慮して 10 分ごとに取り込んだリアルタイムデータをを用いて行うようにし、オペレータ操業よりよりきめの細かい操業が可能となった。

(5) 基本ソフトウェアに、開発当時（1980 年代後半）の最新鋭制御用オペレーティングシステムであった MRTCS (Multi Real Time Control System) を採用し、複数高炉のオンライン推論、テスト推論が同時に動作可能とした。また、これによりオンラインに影響を与えることなく、知識ベースのテストが随時行える環境が提供できた。各種端末はオンライン用とテスト用の 2 セットを準備し、テスト実行時にもオンラインの推論を停止する必要はない。また知識ベースの容量を可変とすることで、膨大な量となる知識ベースを効率よく管理し、リソースを有効に活用している。

5.4.3 システムの構成

このシステムの構成を図 5.10 に示す。高炉ごとのプラントデータを基に知識ベースに蓄えられた高炉操業に関する知識（ルール）を用いて各種推論を行い、その結果を CRT に操業ガイダンスとして出力する。オペレータは、出力されたガイダンスに基づき必要な操作を行い、各高炉の安定操業を目指す。

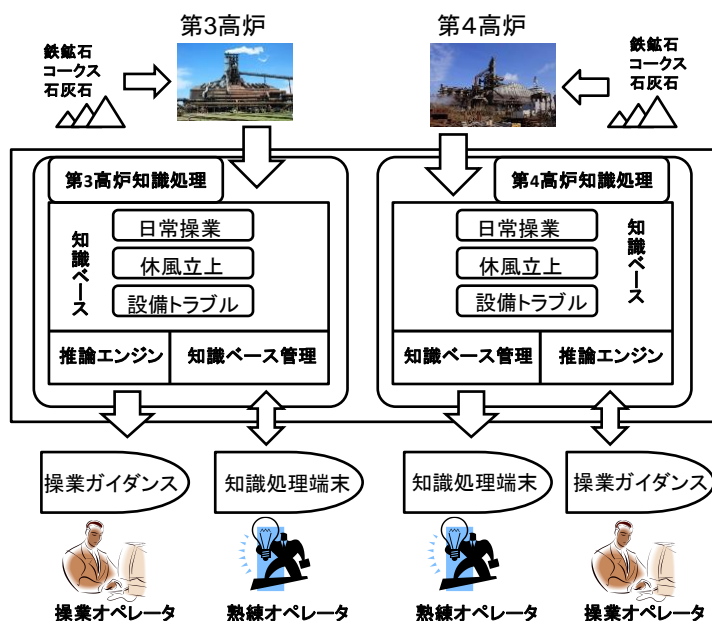
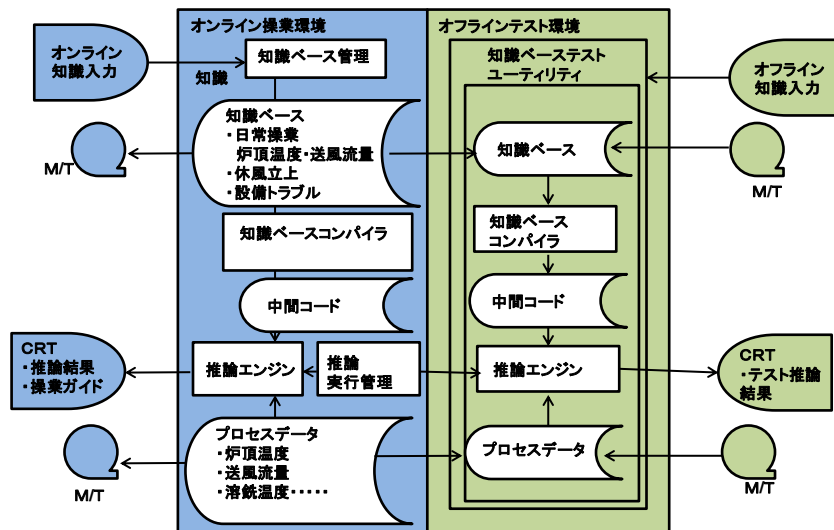


図5. 10 高炉操業エキスパートシステム概念図

出典：高炉操業管理システム
日立評論、Vol.71、No.11

知識処理の機能概要を図 5.11 に示す。オンライン知識処理では、オペレータは自分の持つ専門知識を日本語形式で知識処理端末から入力する。入力された知識は知識ベース管理処理へ渡され、知識ベース管理処理は、EUREKA の知識体系に従い知識ベースを作成する。作成された知識ベースは、知識ベースコンパイラによって中間コードに変換される。この中間コードを推論エンジンが解釈し、推論が行われる。推論の実行は、一定周期(10 分周期)で常時動作している周期推論と、任意のタイミングで CRT からオペレータが推論を要求する任意推論の 2 つの推論方法が可能である。

推論エンジンは、知識を翻訳した中間コードと推論実行時点での最新の実績データを知識用のデータとして取り込み、推論を行う。行った推論の結果は CRT に表示され、操業ガイダンスとして活用される。



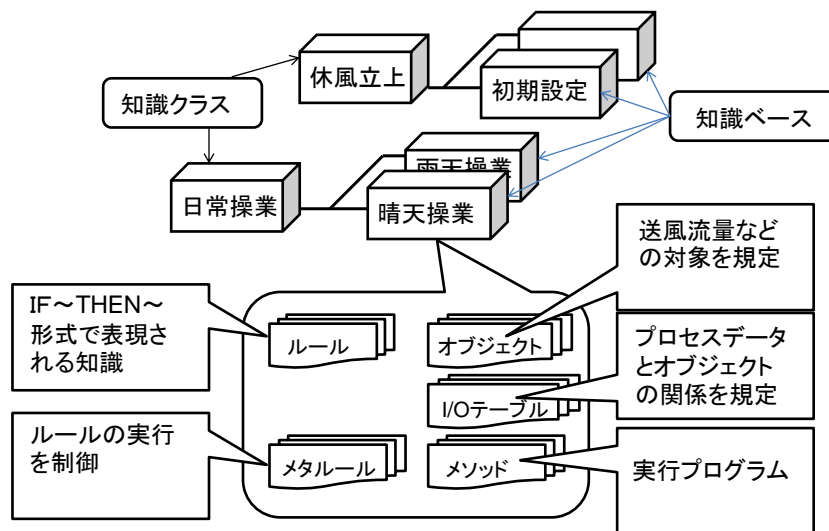
出典：高炉操業管理システム
日立評論、Vol.71、No.11

図5. 11 高炉操業エキスパートシステムのソフトウェア構成図

テスト知識処理では、知識処理端末によって選択された多くの知識中の一知識がテストの知識ベースに転送される。プロセスデータは、過去、現在のデータの中からオペレータによって指定されたデータが、テスト知識処理中に転送されて推論が行われ、結果をテスト専用の CRT に表示する。表示結果を見てオペレータはテスト結果の良否を判断し、テストを続行する。以下、各機能の詳細説明について述べる。

(1) 知識ベース管理処理

オペレータが知識処理端末から入力した知識を、コンピュータへ格納する処理が知識ベース管理処理である。EUREKA での知識体系を図 5.12 に示す。知識の最上位概念として複数の知識クラス(例えば日常操業など)が存在し、その下に複数個の知識ベースが存在する。知識ベースの中にはルール、オブジェクト、イベントルール、メソッドおよび I/O テーブルが存在する。推論実行の単位となる一知識ベースの大きさは、知識作成者であるオペレータにゆだねられている。そのため、知識ベースの構造に小さな箱がつながったチェーン構造を採用し、必要最小限の容量を保ちつつ拡張が容易になるようにしている。



出典：高炉操業管理システム
日立評論、Vol.71、No.11

図5. 12 高炉操業エキスパートシステムの知識体系

(2) 知識処理端末

知識処理端末には、ガイダンス機能と知識入力用エディタを装備し、コンピュータの専門家でないオペレータであっても容易に操作ができるように考慮している。ガイダンス機能はオペレータの入力を補助するものであり、人間協創という観点から最も重要な機能である。実際にルールを修正する場合の手順を説明する。

テスト系(オンライン系)初期メニュー
04-07-1987 10:04
[B001]

データベース名: C4BF

オペレーションを選択してください

- 1<知識ベーステスト>テスト系での推論の実行
- 2<操業系>トランスレート・メソッド登録および削除
- 3<知識エディタ>知識ベース(ルール・オブジェクト等)の変更・新規作成及び削除
- 4 各種ユーティリティ

出典：高炉操業管理システム
日立評論、Vol.71、No.11

図5. 13 知識処理端末のメニュー画面

まず、図 5.13 に示すメニュー画面で"3" (知識エディタ) を選択する。そうすると、図 5.14(a) に示す知識クラス名称一覧表がガイダンスとして自動的に表示されるので、表示された一覧表の中から修正したい知識クラスを選択する。次に、選択した知識クラスに基づく同図(b)に示す知識ベース名称の一覧表が、ガイダンスとして自動的に表示される。

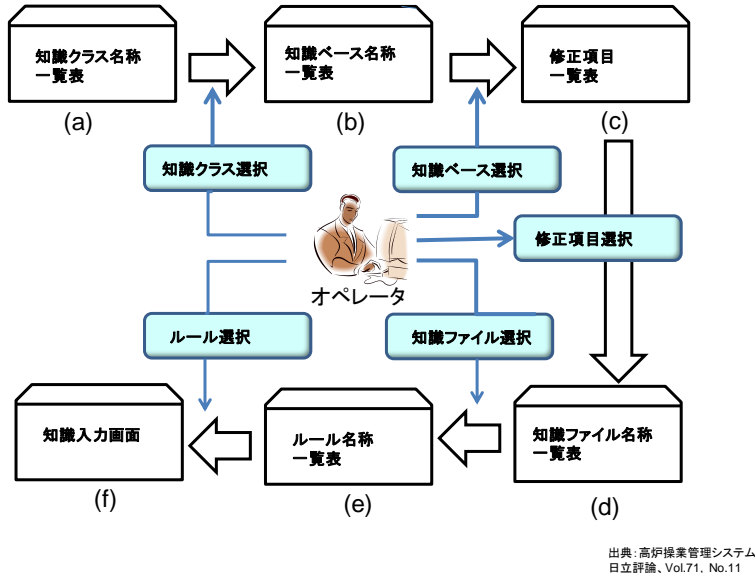


図5. 14 知識入力操作遷移図

以下同様に、表示された一覧表の中から自分が希望する項目を順次選択していくだけで、最終的な知識（ルール）入力画面にたどりつくことができる。

条件部 (IF)		
タスク名	オブジェクト名	条件表現
ダイレクト判定	計算塩基度 スラグ塩基度	の \$ 最新 が 1. 30 より小さい の \$ 基準値 が 1. 25 以上で あり かつ 1. 30 以下である
実行部 (THEN)		
オブジェクト名	メソッド	値表現
システム	表示	アクション、" ¥n¥n 計算 塩基度が下降傾向です ¥n B1

オペレータの言語(日本語)とほぼ同じ表現で知識を入力できる。
入力誘導方式を採用し、文法を意識することなく入力、編集できる。

出典：高炉操業管理システム
日立評論、Vol.71、No.11

図5. 15 自然語風の知識入力画面

図 5.15 に示したルール入力画面では、表示された内容を画面上で直接修正することが可能である。この手順からわかるように、表示されたガイダンスに沿って、自分が希望する項目や名称を数字で選択していくだけで知識の入力が完了し、オペレータ自身が手軽に知識入力することができる。図 5.15 の図示例は、以下の知識をルールとして記述したものである。「もし、計算塩基度の最新が 1.30 より小さく、スラグ塩基度の基準値が 1.25 以上、1.30 以下ならば、計算塩基度が下降傾向であり、BI 調整を行う必要がある」。

この日本語による知識表現とルールの記述を比較すると、日常の日本語と知識の表現の差がほとんどないことがよくわかる。オペレータは、自分の知識を条件部と実行部に整理して、ルール入力画面(図 5.15)から入力していくだけでよい。このルールが実行されると図 5.16 の画面が CRT に表示される。

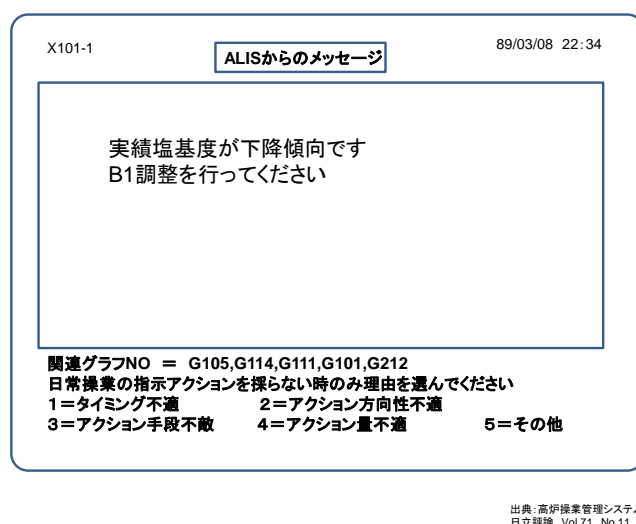


図5. 16 推論結果の出力

(3) 推論実行管理

推論実行管理は、作成された知識ベースを用いて推論するタイミングを管理する処理である。高炉システムでは、高炉の各種データを一定周期で取り込むことが一般的である。推論もデータ更新に即したタイミングで行えるように、一定周期で推論を行う。また、異常時には、CRT から任意のタイミングで推論できる機能も備えている。推論結果は図 5.16 に示したように、オペレータに対する具体的な操作指示という形で行われる。この操作指示によって高炉に対してアクションを行うことで、高炉の状況が異常になることを未然に防ぐことが可能である。

(4) 知識ベーステストユーティリティ

知識処理システムでも、従来のプログラム同様、入力した知識ベースをテストすることで知識の検証を行う必要がある。その確認テストがいかに効率よく行えるかが、知識のブラッシュアップを左右する。このシステムでは、知識ベースをテストするユーティリティを備え、

知識ベースのテストを効率よく行える環境を提供している。

知識ベースのテストを効率よく行える環境とは、

- ① 知識ベースの選択：テストしたい知識ベースが自由に選択できること、
 - ② テスト用データの選択：テストで使用するデータの種類の豊富で、かつ操作が容易であること、
 - ③ テストのタイミング：オンラインに影響を与えることなく随時テストが可能であること、
- の3点に集約できる。知識ベーステストユーティリティでは、上記3点について以下のようにサポートしている。

①知識ベースの選択

テスト可能な知識ベースとして、

- (a) 現在、作成・修正中でコンピュータの補助記憶装置に存在するすべての知識ベース、
- (b) ユーティリティ機能を用いて磁気テープに保存したすべての知識ベース、

の2種類があり、オペレータは希望する知識ベースを知識処理端末から自由に選択してテストが行える。

②テスト用データの選択

テストで使用可能なデータとして、

- (a) オンライン系で現在使用しているデータ、
- (b) オンライン系のデータを補助記憶装置に蓄積した過去データ、
- (c) 上記(b)のデータを、ユーティリティ機能を用いて保存した磁気テープデータ、
- (d) オペレータが必要に応じて CRT からデータを設定する手動入力データ、

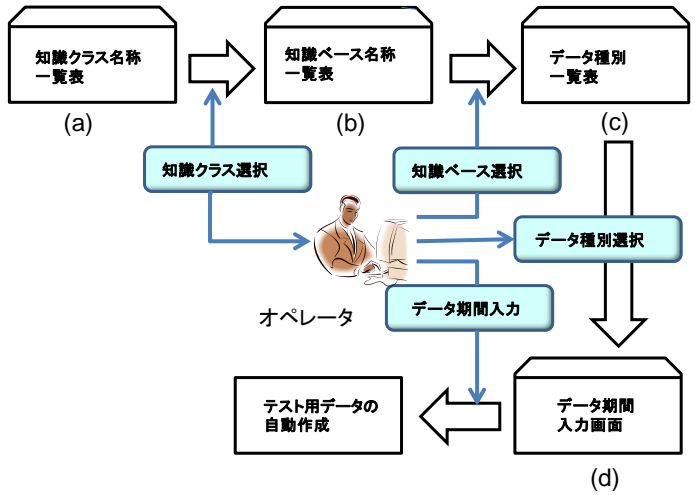
の4種類がある。操作は、オペレータが知識処理端末から希望するデータ種別と期間を指定すればよい。あとはコンピュータが自動的にテスト用のデータを作成する。

③テストのタイミング

基本ソフトウェアに MRTCS を採用することによって、オンラインに影響を与えることなく随時テストを可能としている。これらの機能により、例えば修正中の知識ベースをオンライン系のデータで推論し、その場でオンライン系の推論結果と比較検討することも可能である。また、推論結果が不適當であったときの過去のデータで推論することで、知識の誤りを解析し、適切な知識へのブラッシュアップが可能である。

知識ベーステストの指示も知識処理端末から行う。この場合もガイダンス機能を備えており入力を容易にしている。まず、図 5.13 のメニュー画面で"1"（知識ベーステスト）を選択する。図 5.17 に示すように知識クラス名称の一覧表(a)が、ガイダンスとして自動的に表示される。表示された一覧表の中からテストしたい知識クラスを選択する。次に、選択した知識クラスにつながる知識ベース名称の一覧表(b)が、ガイダンスとして自動的に表示される。ここで、テストしたい知識ベースを選択し、続いてテストで使用するデータを選択する。まず、テストで使用するデータの種別を指定する。画面上にデータ種別の一覧表(c)が表示されるので、この中からテストで使いたいデータの種別を指定する。データ種別として過去データ

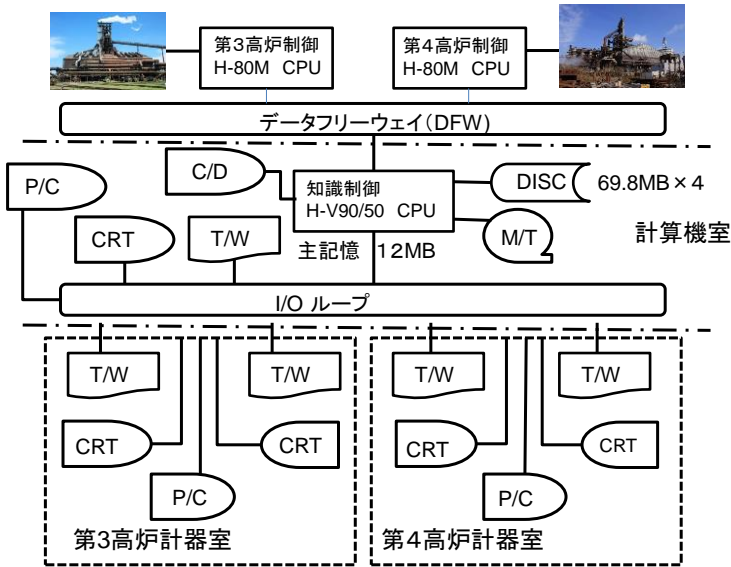
を選択すると、自動的に現在蓄積しているデータの期間(d)が表示される。テストで使いたい期間を指定すると、自動的にテスト用のデータが作成される。



出典: 高炉操業管理システム
日立評論、Vol.71、No.11

図5. 17 知識ベースへのテスト入力操作遷移図

以上の手順により、知識ベースのテストを行うための環境が整う。この手順でわかるように、オペレータは表示されたガイダンスに沿って、テストしたい知識ベースやテストで使用するプロセスデータの種類などを数字で指定していくだけでよい。



出典: 高炉操業管理システム
日立評論、Vol.71、No.11

図5. 18 高炉操業管理用コンピュータ構成図

(1) 高炉操業管理用コンピュータシステム

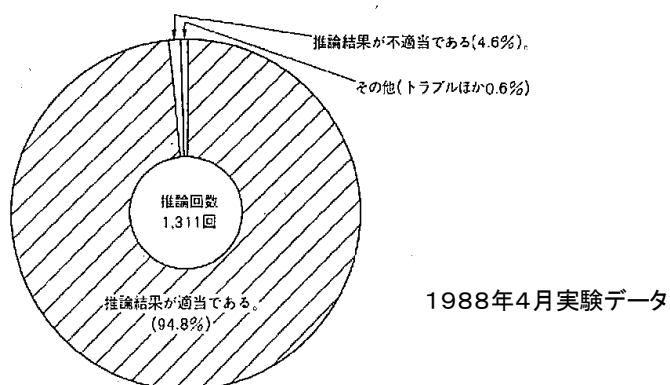
高炉操業管理用コンピュータシステムの構成を図 5.18 に示す。

知識処理用コンピュータとして、HIDIC V90/50 [71]、基本ソフトウェアとして MRTCS を採用して複数高炉のオンライン推論、テスト推論を同時に実現した。さらに、オンラインに影響を与えることなく、任意の知識をテスト可能とした。

5.4.4 高炉実操業での評価

高炉での推論結果の評価を図 5.19 に示す。推論の適中率は、約 95%と高い水準に達している。さらに、知識処理システム稼動前の第 3 高炉のデータを基に推論を行わせたところ、図 5.20 に示すような結果が得られた。

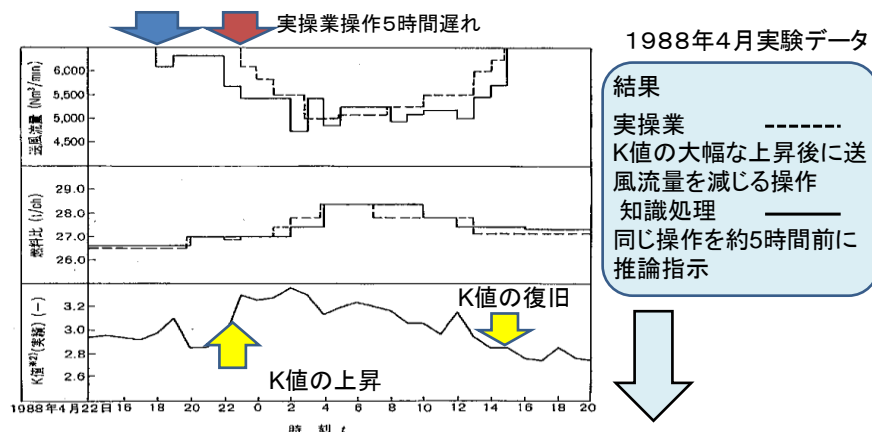
実操業では、K 値（高炉内の状態を示す指標の一つで、この推移によって重大な不具合の発生の予想が可能、見逃すと出鉄の停止などの事故につながる）の大幅な上昇後に初めて送風流量を減じる捜作を行っている。一方、高炉操業エキスパートシステムは、同じ操作が必要であることを、5 時間以上前に推論結果として指示している。高炉は大規模な反応炉であることから、反応の時定数が非常に大きく、一度不安定状態になると安定状態に復帰するまでに多大な時間を要する。したがって、高炉に対する操作が早ければ早いほど、安定状態に復帰するための操作量の低減、不安定状態の早期回避および状態の悪化防止ができ、高炉の状態はいっそう安定する。このことにより、この高炉操業エキスパートシステムの継続的運用によって、コストの低減、溶銑品質の向上を期待することができる。



推論の結果はほぼ満足できる状況(誤り率5%以下)
日々の知識編集によって100%近い満足度まで到達可能
知識をブラウズすることによって熟練者のノウハウの伝承が可能

出典: 高炉操業管理システム
日立評論、Vol.71、No.11

図5.19 推論テスト結果



評価

高炉は操作に対する反応の時定数が非常に大きく、一度不安定状態になると復帰するまでに多大な時間を要する。

⇒操作が早ければ早いほど、安定状態に復帰するための操作量の低減、不安定状態からの早期回避や状態悪化の防止ができ、コストの低減、溶銑品質の向上が図れる。

図5. 20 実操作と推論結果の比較

出典：高炉操業管理システム
日立評論、Vol.71、No.11

5.5 経験を活かす制御のまとめ

開発した高炉操業エキスパートシステムの概要を図 5.21 に示す。

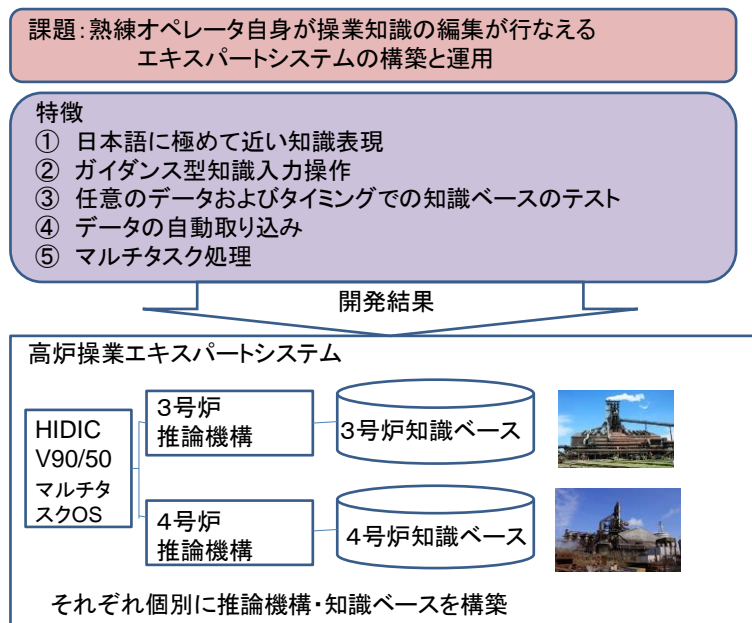


図5. 21 高炉操業エキスパートシステム

この高炉操業エキスパートシステムの開発によって、熟練エキスパートの知識・ノウハウのコンピュータ化が可能となった。これによって、未熟なオペレータであっても、コンピュータの操作指示に従えば、コンピュータとの協調作業で、熟練者並みの操業パフォーマンス

を挙げることでできるようになった。また空き時間のテスト的利用によって高炉操業に関する習熟度を格段に速めることもできた。熟練オペレータにとっては、やはりコンピュータとの知識ベース構築に関する共同作業を通して自らの知識の整理が可能となり、さらに日々の運用における知識の改変・拡充やテスト走行、メンテナンス作業などを通して知識の新発見などが行えるようになった。日常操業や新人教育などに割く時間が減少し、それを新規知識の獲得作業に振り向けることができるようになった。

この高炉操業エキスパートシステムは以下の特長がある。

- (1) 知識のメンテナンスをオペレータ自身が行えるようになった。
- (2) オンラインに影響を与えることなくテストを可能とした。
- (3) 日々の知識メンテナンスが可能となり、実用性が高まった。

高炉操業の安定化、コストの低減、品質の向上に大きく寄与することができた。製鉄所のエキスパートシステムの成功例として広く知られるとともに、実際のオペレーションにおいても実用に供され、熟練したオペレータのノウハウ継承の手段としても効果を発揮している。

この経験を活かす制御モデルの成果を図 5.22 に示す。

課題

熟練したオペレータのもつ制御知識・ノウハウをコンピュータに移植し、未熟者でも熟練者並みのパフォーマンスを上げる操業を、コンピュータとの協調によって可能とする。

成果

- ・熟練オペレータのノウハウを知識ベース化することで、未熟なオペレータでもコンピュータとの協調で熟練者並みのパフォーマンスを挙げ、かつ習熟を速く行えるようになった。
- ・知識ベースが自由に改変できるため、日々の運用に沿って熟練オペレータ自身が最適な操業を模索し、システムを成長させていくことが可能となった。また操業知識の整理、新発見などの効果が得られた。
- ・大手製鉄所の2つの高炉を同時に操業監視するシステムとして運用に供した。

論文等

田野, 増位, 坂口, 船橋: 知識ベースシステム構築用ツールEUREKAにおける高速処理方式, 情報処理学会論文誌, Vol.28, No.12, pp.1255-1268, 1987
増位, 田野, 船橋: 知識制御核ソフトウェアEUREKAの記述体系, 情報処理学会第29回全国大会, pp.1373-1374, 1984
天野, 平, 渡邊, 関, 中井, 滝川, 小林, 増位: 高炉操業管理システム, 日立評論, Vol.72, No.7, pp. 69-76, 1990

図5.22 経験を活かす制御のまとめ

この「経験を活かす制御」において、人間とコンピュータがどのように協調するかを図 5.23 にまとめた。従来は、熟練したオペレータがその経験に基づいて、高炉の状態を診断し、その診断結果をもとに適切な処置を施していくという形がとられていた。医師が健康診断を行い、病気の場合は診察を行うという手順と同様である。問題はこの経験、ノウハウをどのように後世に伝えていくか、経験の外部化をどう実現するかということであった。エキスパートシステムの導入によって、熟練者のノウハウを整理するための手段を得たこと、整理した

結果を活用して、熟練者を代替できるコンピュータシステムを得ることができたこと、そのシステムを介して、新人のオペレータを教育できる手段が得られたこと、熟練したオペレータにとっても、日々の操業で得られたノウハウを記録として格納しておける手段が得られたこと、それによってシステムが日々成長することが可能となったこと、などの成果を得ることができた。特に熟練者の経験の外部化およびその経験の洗練化を、日常言語による熟練者自身が行える手段を提供できたことは、人間とコンピュータの協調という観点から重要なステップとなったといえることができる。




	<p>各種センサーデータからの不具合状況の推測</p> <p>推測結果による操業実施</p>	<p>経験に基づく高炉操業の実施</p> <p>経験外部化困難</p>
	<p>状況に応じた適切な操業指示の獲得</p> <p>熟練者の思考過程の追体験による経験の深化</p>	<p>日々の状況変化に対応する操業手順の追加・変更</p> <p>新人教育のための経験外部化</p>
	<p>熟練者の経験にもとづく操業指示の提示とその推論過程の明示的説明</p>	<p>熟練者の経験の外部化のための手順の整理、明確化による経験知識の体系化とその活用</p>

図5. 23 経験を活かす制御における協調

第6章 結論

6.1 成果のまとめ

交通システム、エネルギーシステム、物流システムなど大規模社会システムは、コンピュータの発展により不可欠なインフラストラクチャとして定着し、社会生活に多くの利便性を提供している。このような大規模社会システムを安定化させるには、そのシステムが抱えている多くの目的をバランスよく勘案しかつ様々な手段で安全かつ効率的な運用を実現する必要がある。このためには、総合的な判断力に優れた人間と高速な計算力で状態把握や将来予測を行うことができるコンピュータをうまく協調させ、総合的に正しい判断および制御立案を行わせることが必須となる。本論文では、この人間とコンピュータの調和のとれた協調を実現するために必要なモデル化技術に関して行った実用化研究について述べた。

人間とコンピュータの協調の形として、本研究では3つの研究課題を取り上げ、それぞれに関して制御のためのモデル化技術を確立し、1980年代に実システムでの実用に供した。人間とコンピュータの協調において特に重要なものは、限られたセンサー情報からでもコンピュータがシステムの全体像や稼働状態の可否などを的確に推定し、人間にその結果をタイムリーに知らせることで、総合的に的確な制御判断を行えるようにすることである。そのため、本研究では、「何が起きているかを知らせる」という観点からプラントの状態を推定する物理モデル、「今後どのように変化するかを知らせる」という観点から、自己回帰型自律分散制御モデル、「熟練者のやりかたを知らせる」という観点から、システム制御向けエキスパートシステムモデル、という人間協調のための実用モデルの開発を行い、それぞれ下水処理システム、多段ダム制御システム、高炉操業システムに組み込み、実用に供した。本論文ではこれらの取り組みを以下のような観点から3つにまとめた。

- ・見る制御：見えないプラントを可視化するためのモデル化技術
- ・推し量る制御：目隠しされたプラントを制御するためのモデル化技術
- ・経験を活かす制御：プラント操業のためのノウハウのモデル化技術

以下それぞれの取り組みの成果を示す。

(1) 見る制御：センサーでは見えないプラントをモデルによってビジュアルにする

人間オペレータにとって、プラントの現状を正確に把握することは、制御の安定化のための必須の要件である。しかし多くのプラントではセンサーの種類や数の制約によってその要件が満たされない。そのため数少ないセンサーデータからプラントの現状を推測できるビジュアルモデルの開発が強く望まれる状況にあった。

分布特性を考慮した下水処理プロセスのモデル化

成果：下水処理場の最終沈澱池からの汚泥のオーバーフローを予測するためのプロセスシミュレータを開発し、その予測結果に基づいて最終沈澱池への流入量を人間との協調で制御する方式を実用化

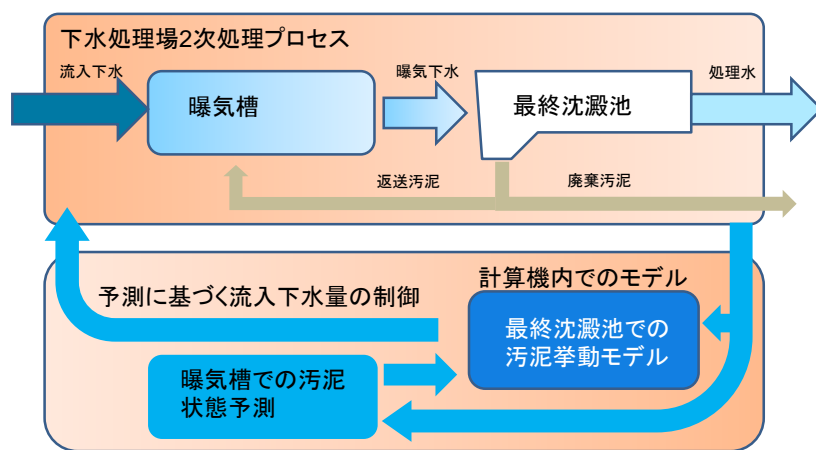


図6.1 見る制御：見えないプラントを可視化するためのモデル化

モデル化において最も有力な手段は、プラントの挙動を数式モデルとして記述することである。しかし自然界との接点を有するプラントを数式によって完全にモデル化することは難しい。その代わりとして、本研究では、人間にとって理解しやすい物理現象に立脚したプラントモデル化を考えた。図 6.1 に示すように、複雑な汚泥の挙動を含む下水処理場を取り上げ、特に最終沈澱池からの汚泥の越流防止制御という観点から、最終沈澱池の現在状況をビジュアルに確認できるモデルを構築した。ここで採用したモデルは従来とは異なる発想に立ったラグランジュタイプのモデルであり、プラントの動特性を単純な個別の物理過程の組み合わせによって模擬するという新しい手法を開発した。これによって複雑な現象を示す最終沈澱池のモデル化が可能となり、その状態のビジュアル化に成功した。これを実際の大規模下水処理場に適用し、処理場の効率向上、処理水質改善、操業の安定化を実現した。

(2) 押し量る制御：孤立したサブプラントの自律的制御により全体の系の安定化を図る

大規模システムは、いくつかのサブシステムの集合体で構成され、それぞれのサブシステム間には緩い結合によって関係づけられるという形が多い。通常はサブシステム間の調整は上位のコンピュータあるいは意思決定者によって行われるが、これらが機能不全になった場合には、個々のサブシステムのオペレータが、限られたデータで単独で運用を行うことを強いられる。このような手探り制御においては、コンピュータのデータ処理サポートによる協調的制御が大いに役立つ。

大規模プラント制御方策の分散化とその多段ダム制御への適用

成果：多段のダム群など、複数個のサブシステムの比較的緩い結合によって成立する大規模プラントを、それぞれのサブシステムごとに設置した分散化制御システムによって相互独立的に人間との協調で制御するアルゴリズムの実用化

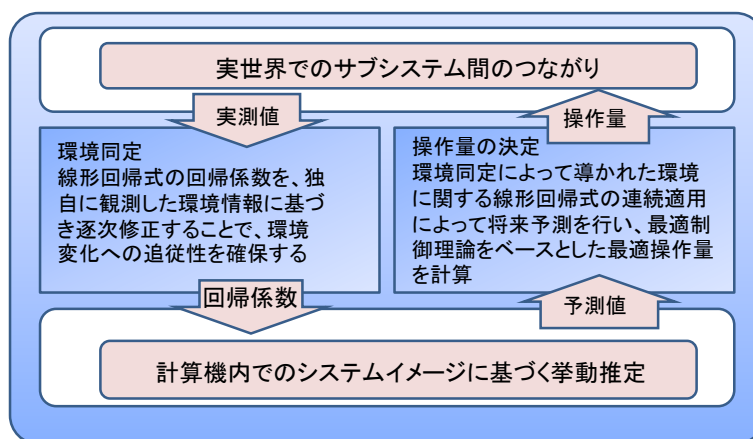


図6.2 押し量る制御：目隠しされたプラントを制御するためのモデル化

ある水系に接続して置かれたダム群の制御では、ダム制御の総合指令所によって個々のダムの最適放流量が計画され、各ダムは指示された放流を実施するという集中型の制御形態がとられている。しかし災害時の通信線の途絶などの事故が発生した場合は、各ダムでは自己測定可能な水位など限られた情報をもとにそれぞれの放流量を決める必要が生じる。このような状況下でも安定した制御を行うために、図6.2に示すように、環境同定のモデルを常にコンピュータ内でアップデートしておき、緊急時にはそのモデルに基づいて制御を行う、という自律分散型挙動推定型制御モデルを案出した。具体例として実水系のダム群にこのモデルを適用し、集中制御とほぼ同等の制御が実現できることを確認した。各ダムのオペレータは、コンピュータが予測した推定流入量を参照しつつ、緊急時に対応した協調的運転制御を行えるようになる。このモデルは緊急時バックアップモデルとして、実水系の多段ダム制御系に組み込んだ。

(3) 経験を活用する制御：数式化が不可能なプラントを人間の経験知識やノウハウによって制御する

コンピュータによる自動制御のためには、操作量に対してどのようにプラントが反応するかを数式によってモデル化する必要がある。しかし制御のための数式モデルが導けず、熟練したオペレータが長年の経験に基づいて操業を安定化させているというプラントが数多くある。熟練者の経験は失われる可能性が高く、そのため熟練オペレータのもつ経験をコンピュータに取り込み、日常の操業の安定化をはかると同時に、若年者への経験の継承を図りたいというニーズが顕在化していた。未熟なオペレータでもコンピュータとの協調で熟練者並みのパフォーマンスを上げることが可能となる。

大手製鉄所における高炉操業エキスパートシステムの開発

成果：システムの数式モデル化が困難な製鉄所高炉を計算機との協調によって操業するため、ベテランのオペレータがもつノウハウを計算機に移植し、それに基づく操業を実現するためのリアルタイム知識処理プラットフォームの提供と実用化

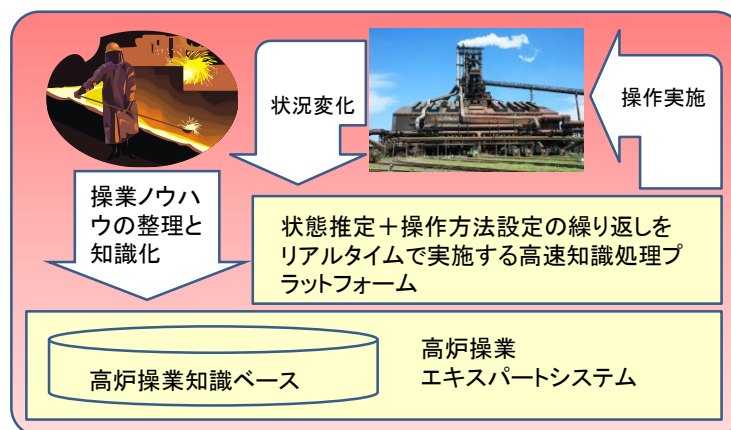


図6.3 経験を活かす制御：プラント操業のためのノウハウのモデル化

高炉では熟練したオペレータによる監視操業が一般的である。数式ベースのモデル化は、高炉そのものの動特性がよくわからないという状況の下では実現の見通しは今もない。内部でどのような物理／化学反応が生じており、どのような制御が最適であるかについても明確にはわかっておらず、コークスと鉄鉱石の投入制御というかなり長い遅れタイムをもつ制御手段しかとれない高炉の操業は、人間のオペレータの永年の経験に依存せざるを得ない状況にあった。

そこで、図 6.3 に示すように人間がもつ高炉運転ノウハウをモデル化してコンピュータに移植するエキスパートシステムのアプローチを高炉に適用し、高炉モデル化の新しいアプローチを開拓した。実際の高炉への適用実験においては、熟練したオペレータに遜色ない精度を上げるに至ったが、このモデルの効用は制御の質ではなく、専門家であるオペレータとコンピュータの協調的知識ベース構築をサポートするため、制御アルゴリズムを日々成長させ

ていけるような手段を提供できたことにある。このモデルは実際の大規模製鉄所で実用化され、2つの高炉の日々のオペレーションに活用されているほか、熟練オペレータのノウハウ継承、若手の熟練化教育にも役立っている。

6.2 今後の課題

本研究においては、人間との協調を実現するためのモデル化技術として、人間の認知機能強化のためのビジュアル化モデル構築（第3章）、大規模システムを構成するサブシステムの自律化を可能とする自律分散型モデル構築（第4章）、人間知識を利用して複雑なプラントの操業の質の向上をオペレータとの協調で実現する知識工学型モデル構築（第5章）の3つの形で研究開発を行い、いずれも実プラントへの適用を実現した。

これらのモデル化手法は、人間の研究者が対象システムを深く分析することでモデル化の着想を得、その是非をセンサーデータによって検証するというスタイルで構築されている。21世紀に入り、コンピュータの性能向上、ストレージ単価の低価格化によって、過去の制御経験などを含む巨大なアーカイブデータを自由にかつ大量に扱える環境が整ってきた。この時代変化に対応して、システム制御のモデル化に大きな変化が生じる可能性が生まれてきた。データをコンピュータに統計的に処理させることによって、データ間の新たな関係を見つけ出し、それに基づいてモデルや制御ルールを創成しようとする試みである。これは人間が思いつかない関係やモデルを導く期待がある一方、方向性のないカオスに埋没する恐れもある。そのため、計算機の高速計算力と人間の総合判断力をうまく組み合わせることで、マンマシン協調で新しいモデル開発を主導していく必要がある。ここでは21世紀のICTトレンドを踏まえ、モデル自身をデータから自動創成することが可能かどうかについて議論する。これが可能となれば、データの蓄積によってモデルを常に最新の状況にフィットしたものに改変することが可能となる。このことは、図6.4に示したように、コンピュータがデータ解析を通して制御モデルを提案し、人間がその是非を吟味・確認するという形の人間とコンピュータの新しい協調を提案することにつながる。

- 課題 (1) 社会システムの大規模化、目的の多様化、関係の複雑化によって運用や制御のためのモデルやルールの発見が難しくなってきた。
- (2) 過去の制御経験などのアーカイブデータのハンドリングが収集、保存活用の各段階で可能となり、人間とコンピュータの協調による新しくかつ有用な関係性の発見への技術的な基盤が整ってきた。

解決方針

- ・統計モデルの活用: データから統計的にモデルを構築する方法論の確立
- ・ラフ集合論の適用: データから条件—結論のペアからなる診断や制御のためのルールを創成



イメージ図: 大規模データからのモデル創生

図6. 4 今後の課題

(1) データからのモデル創成の視点

コンピュータ技術やセンサー技術の進展によって、過去の制御経験を含む大量のデータをハンドリングできるようになった反面、意味のあるモデルをデータから導出することが、データが多種多様であるという事実から難しくなっている。コンピュータによるマイニングでモデルの創成を試みることによって、人間だけでは見つけることができない複雑な関係性を人間とコンピュータが協調して発見することが期待できる。過去の制御経験などアーカイブデータ処理の重要なモデル化技法の1つは、過去のデータを分析して、そこに埋もれている規則性やルールをみつけだし、それを意思決定や操作オペレーション決定に用いることである。ここでいう規則性とは、ある仮説が成立するための条件であったり、分類のための判別値／方法であったり、将来の予測モデルなどを意味する。従来は、これらは人間の専門家や学者、熟練したオペレータなどがその発見を担ってきたものであるが、圧倒的な数のデータ量を背景に、統計技術を駆使することで、自動的に規則性を見出すことが可能となると考えられる。図6.5に示したように、制御操作あるいはプラント状態データと制御結果のペアデータを統計的に処理することによって、効率的なシステム制御を実現するモデルを協調して創成する統計的システムモデリング手法 [72] および、同じペアデータを決定表という形に展開しラフ集合論 [73] の下近似を用いて自動的に制御ルールを創成する方法の2つに着目し、その方法論を考察する。

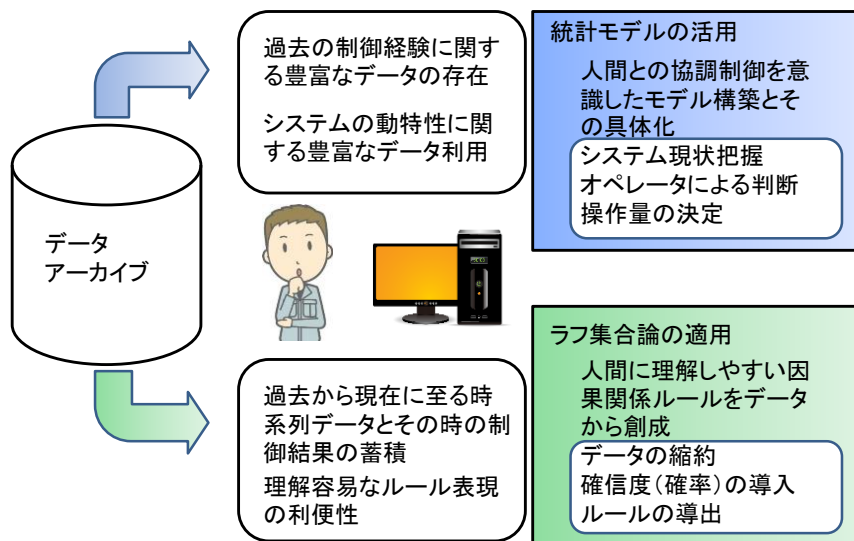


図6. 5 データに基づくモデル自動創成の視点

(2) システム制御における統計的アプローチ

多くのセンサー情報や制御動作の代替案を有する大規模な社会インフラを安全かつ効率的に運用するには、監視制御の対象システムに設置された多数のセンサーやその他の環境情報に基づいて、対象システムがどのような状況にあるかを推定し、その結果から対象システムを安定的に運用できる制御動作を選定し、最も適切な操作を決定して制御を行う必要がある。このことから、大規模システム制御では、システム状態の推定、人間による推定結果の評価、決定された状態に対するシステム安定化の3ステップ構成が採用されることが多い。

システム状態推定とは、センシングされたデータ群を分析して現在のシステム状態を推定する過程である。このため、例えばセンサーAが30以下、センサーBが100を超え、異音がするなら、80%の確率でタービンの欠損が原因と考えられる、というような診断ルールを多数用意し、それを用いてシステムの状態の診断を行うことが考えられる。しかし全てのデータの組み合わせをルール化することは非現実的であるため、データの組み合わせとそれから推定できるシステム状態のペアを、過去の制御経験データから多数用意し、自動的に学習させるという統計モデルの採用が解となる。

システム安定化制御は、推定されたシステム状態に対して、行うべき制御動作とその操作量を算出する過程である。大規模システムにおいては、制御のための複数の制御動作代替案がある。この場合、どのような制御手段を採るべきかを決めるモデルの獲得は、過去の制御経験が豊富に蓄積されているという環境下では比較的容易である。例えば操作マニュアルやオペレータからの聞き取りを通して、システム状態とそれに対する制御動作を一覧表化あるいはルール化することなどが有力な代替案となる。操作量決定に関しては、ある観測値が得

られたときにその際の最適操作量がどのようなであったかに関する過去の制御経験の蓄積から統計的な決定関数を導くことによってモデル化することができる。そこで、大規模システムを安定的に制御するための統計的システム状態推定モデル、および操作量決定のための統計モデルについて考察する。

システム状態推定を、あるシステムに関してセンシングされたデータ群 D を、そのシステムの現在の状態 S に変換する過程であるとする。そのとき、データ群 D を、システム状態 S が雑音を有する変換器によって変化を受けた結果生じたものと考え、状態推定はデータ群 D から状態 S への復号になると定義することができる。すなわち、状態 S を雑音が混入する可能性があるセンサーによって観察した結果、データ群 D が得られたと考え、このデータから雑音の影響が最も小さくなるシステム状態 S を推定することを考えようというものである。この定式化によれば、復号誤りを最も小さくするシステム状態 S^* は

$$S^* = \operatorname{argmax}_S P(S|D) \quad (1)$$

これを Bayes の定理を用いて変形すると

$$\begin{aligned} \operatorname{argmax}_S P(S|D) &= \operatorname{argmax}_S (P(S)P(D|S))/(P(D)) \\ &= \operatorname{argmax}_S P(D|S)P(S) \end{aligned} \quad (2)$$

$$S^* = \operatorname{argmax}_S P(D|S)P(S) \quad (3)$$

が得られる。これは、もっともありうるシステム状態 S^* を統計的に導出するには、そのシステム状態からデータ群 D が生成される確率 ($P(D|S)$) とそれぞれのシステム状態が生じる確率 ($P(S)$) の積を最大にするシステム状態 S を導けばよいことを示している。

この確率 $P(D|S)$ と $P(S)$ は、システム状態 S とそこから生じるデータ群 D のペアからなる観測データを用いて統計的に計算することができる。システム状態 S は、プラント運転時の不具合原因を想定すると、 $P(S)$ は個々の不具合が生じる確率であり、それは過去のデータから容易に算出できる。一方 $P(D|S)$ は、それぞれの不具合が生じた場合にデータ群 D が得られる確率である。データ群 D をどのように定義するか、どのデータを制御に用いるかが次の問題になる。最も簡単な定義は、利用可能なデータ d_1, d_2, \dots, d_N を全て並べることである。その場合、

$$P(D|S) = P(d_1, d_2, \dots, d_N | S) \quad (4)$$

となるが、 d_1, d_2, \dots, d_N が独立であると仮定すると

$$P(d_1, d_2, \dots, d_N | S) = \prod_{n=1}^N P(d_n | S) \quad (5)$$

とすることができ、システム状態 S においてそれぞれのデータが出現する確率の積に帰着できる。

操作量決定のための統計的学習モデルも同様に (3) 式の Bayes のモデル化方式が採用でき、上記の統計的システム状態推定モデルで得られたシステム状態 S と、その時の操作量データ U のペアデータから導出できる。

モデルは、最も適切な操作量 (U) = 「あるシステム状態 S において、その操作量 U が実施される確率 (P(U|S))」×「システム状態 S が生じる確率 (P(S))」の積を最大化する U となり、これらの確率は上記のペアデータを用いて求めることができる。以上の考察をまとめると図 6.6 のようになる。

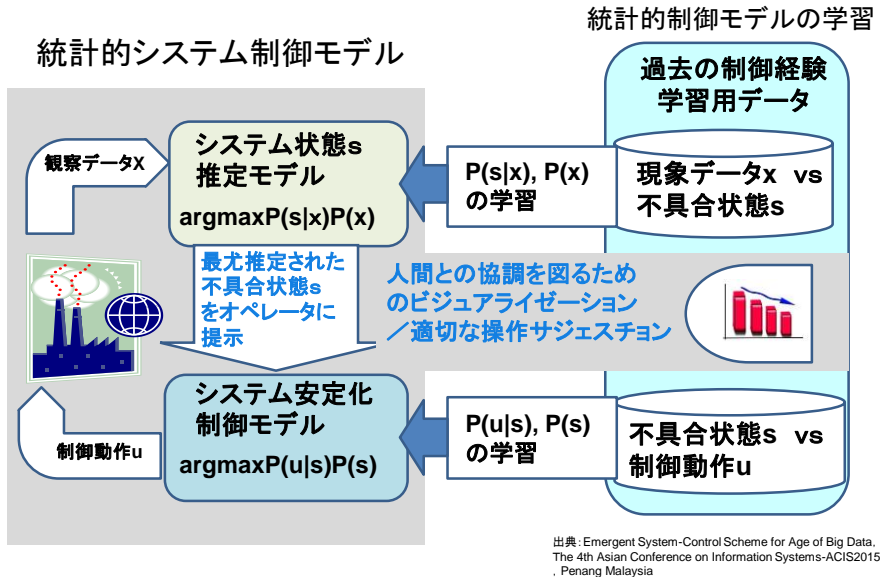


図6. 6 人間との協調を考えた統計的システム制御の構成

(3) ラフ集合論によるルール導出

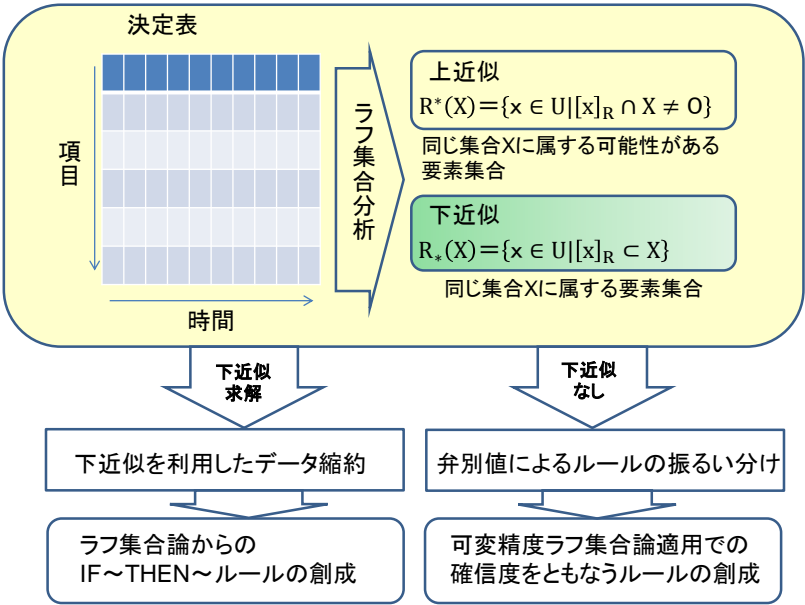


図6. 7 ラフ集合論によるルール創成

システムに関する過去からのデータ群 D およびそのデータに対応するシステム状態 S のペア $\langle D, S \rangle$ が大量に蓄積されている状況を考え、これを表 6.7 のような決定表の形に整理する。この表において、横軸（データ群 D ）は各種センサーの値など全てのデータ項目を条件属性としてリストアップしたものである。また縦軸（状態 S ）はシステムが取りうる状態を場合分けしたもの、例えば時間軸に沿ったシステム状態の変化を表すものである。表のエントリは、それぞれのシステム状態において各属性がとるデータ値であり、基本的には数値あるいは離散的データとなる。

ラフ集合 [74] は、ポーランドのポーラック (Zdzislaw Pawlak) 教授によって 1982 年に提唱されたあいまいなデータから知識を導出するための集合概念である。ラフ集合分析は、決定表で与えられるデータを解析するための手段である。決定表とは、条件属性と決定属性を並べ、それぞれに値を挿入したものである。ラフ集合論では与えられた決定表から、縮約という操作によって識別に必要な集合が引き出せる。縮約とは、与えられた全ての属性の集合と同等に対象を識別できる属性集合のことである。

以上の議論を数学的に定式化する。議論の対象となる全体集合を U 、その上の同値関係を R とする。 U の R による同値類 $[x]_R$ は、同値関係 R のもとで互いに 区別できない対象を表わす。部分集合 $X \subseteq U$ に対し、 R による X の下近似 $R_*(X)$ および上近似 $R^*(X)$ は以下のように定義される。

$$R_*(X) = \{ x \in U \mid [x]_R \subset X \} \quad (6)$$

$$R^*(X) = \{ x \in U \mid [x]_R \cap X \neq \emptyset \} \quad (7)$$

下近似と上近似の対 $(R_*(X), R^*(X))$ を X のラフ集合と呼ぶ。 $R_*(X)$ は X への帰属が確実な対象の集合、 $R^*(X)$ は X に帰属する可能性のある対象の集合、と解釈できる。ラフ集合分析では、すべての条件属性の値が等しい対象は同値類としてグループ化し、決定属性値が等しい対象は決定クラスとしてまとめる。ある決定クラスの下近似に帰属する対象は、与えられた条件属性により正しく分類できる対象である。このことから、下近似を用いれば、重要な条件属性を、縮約として見出し、決定規則を IF~THEN~ルールとして導出することができる [75]。なお与えられた決定表に誤差が含まれる場合には、下近似が極めて小さくなり、分析不能になる。これに対処するため、ある程度の誤差を許容する可変精度ラフ集合 (variable precision rough set) [77] などが提案されている。また複数の決定表からルールを導出する方法 [76] についても考察が進められており、応用範囲は拡大している。この下近似による条件属性の縮約は、データからのルールの創成に用いることができる。

ラフ集合での決定表は、制御経験の集合であり、各行からなる各集合要素は、条件属性の値を条件部、決定属性の値を結論部とする IF~THEN~ルールと考えることもできる。しかしながらこのままでは制御経験をただ並べただけであり、システム状態に対する被覆率が少なく活用が期待できない。そこでこれらのルールを識別不能性の観点で要約し、被覆率の高いルールに整理しなおす。まず決定属性に無関係な条件属性を発見して決定表から除去し表を簡潔にする。決定表の相対縮約とは、識別可能なすべての対象を その決定クラスに正しく

分類するために必要となる最小限の条件属性の集合である。形式的には、決定表の相対縮約をすべての決定クラス D_i ($i = 1, \dots, m$) に対して以下の 2 条件を満たす条件属性の部分集合 $A \subseteq C$ として定義する。

1. $A(D_i) = C(D_i)$
2. $B(D_i) = C(D_i) \quad \forall B \subset A$

ここで、 $B \subset A$ は集合 B が集合 A の真部分集合であることを意味する。決定表に対する相対縮約は複数個存在する。相対縮約を用いることで、条件属性の値に対する決定属性の値を表す決定ルールを、より簡略化して表すことができる。このように下近似の利用によって、最もコンパクトで被覆率の高い IF~THEN~ルールを導出することができる。

以上述べたラフ集合論には、誤データの混入や制御経験上の矛盾などがあった場合、誤った分類を導く可能性がある。データに相互矛盾がある場合は、識別のためのルールの導出が不可能となる。可変精度ラフ集合モデル (variable precision rough set model) [77] は、ラフ集合における近似の定義を緩め、矛盾を含む情報をラフ集合の枠組みで扱う基礎的な手法を与えてくれる。この方式では決定ルール (属性集合 \Rightarrow 決定属性) の正確さを示す確信度 $S(d|c)$ を次式で計算する。

$$S(d|c) = |d \wedge c| / |c| \quad (8)$$

ここで、 c は条件、 d は結論、 $|c|$ は論理式 c を満たす状態の数を表す。ルールの誤りやすさを示す誤判別度 ($1 - \text{確信度}$) に対して弁別値 β ($0 \leq \beta \leq 1$) を設定し、弁別値以下のルールのみを採用することで矛盾を含む決定表からもルールの導出が可能となる。弁別値を高く設定すれば、矛盾を含む多くのルールを導出することもできる。

(3) 今後の課題のまとめ

ここでは過去の制御経験などのデータを、人間とコンピュータの協調の下で、大規模システム制御においてどのように活用するかについて議論を行った。本論文で考察したモデル[78]は、システム制御の機能をシステム状態推定とシステム安定化制御に分離し、それぞれに対して過去の制御経験データに基づき、統計モデルを導出し、観測されたデータあるいは推定された状態から最も適切と思われる操作量を導こうとするものである。この統計モデルは推し量る制御で考察した自己回帰モデルを代替する進化モデルとして用いることができる。またデータからのルールの創成に関してラフ集合論の下近似を応用するという議論を行った。導出したルールは直接的に、経験を活かす制御で用いる熟練者の知識ルールを代替あるいは補完するルールとして用いることができる。この統計モデルおよびルール創成の利点はデータに基づいたものであることにあり、これによって環境の変化に対するシステム制御の追従性を拡大することが可能となる。その特徴を最大限に生かすためには、統計に用いるデータに時間的な軽重をつけるなどデータ取り扱いの上での工夫を学習機能に取りこむことなどが重要である。いずれの場合も、コンピュータだけで行うことは不可で、人間の直観力や判断力による方向づけが有用な知見を生み出すキーとなる。

発表論文・書籍リスト

1. 論文等

田野, 増位, 舩橋: ELITE アルゴリズム: 確率コストモデルに基づくジョインネットの最適化方式, 情報処理学会論文誌, Vol.35, No.5, pp.725-738, 1994.

田野, 増位, 大森: 高速双方向推論のための ST-NET 生成アルゴリズム, 情報処理学会論文誌, Vol.30, No.9, pp.1092-1102, 1989.

田野, 増位: ST-NET アルゴリズム: 双方向推論の高速処理方式, 情報処理学会論文誌, Vol.29, No.10, pp.944-953, 1988.

田野, 増位, 坂口, 舩橋: 知識ベースシステム構築用ツール EUREKA における高速処理方式, 情報処理学会論文誌, Vol.28, No.12, pp.1255-1268, 1987.

増位, 舩橋, 大成: 大規模プラント制御方策の分散化とその多段ダム制御への適用, 電気学会論文誌 C, Vol.106, No.3, pp.33-40, 1986.

瀬古沢, 舩橋, 増位, 宮岡: 重複分散制御方式による配水管網の圧力定値化, 計測自動制御学会論文誌, Vol.21, No.1, pp.20-27, 1985.

増位, 塩谷: 分布特性を考慮した下水処理プロセスのモデル化, 電気学会論文誌 C, Vol.104, No.12, pp.295-302, 1984.

和歌森, 増位, 舩橋, 森田, 杉山: ネットワーク最適化手法による連接水系日運用計算法, 電気学会論文誌 B, Vol.104, No.3, pp.141-148, 1984.

F. Wakamori, S. Masui, K. Morita, T. Sugiyama: Layered Network Model Approach Optimal Daily Hydro Scheduling, IEEE Trans. of Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-101, No.9, pp.3310-3314, 1982.

和歌森, 舩橋, 増位: 洪水時の多段ダム最適放流計画法, 電気学会論文誌 C, Vol.102, No.2, pp.37-44, 1982.

2. 著書等

森, 増位: ビジネスマンのための AI 入門, オーム社, 1988 共著 (第3章執筆).

3. その他の業績

[国際会議等]

S. Masui, S. Tano: Emergent System-Control Scheme for Age of Big Data, the 4th Asian

Conference on Information Systems-ACIS2015, Penang Malaysia, 2015.10.16.

S. Tano, S. Masui, T. Nakano, K. Mori : EUREKA-II: A Programming Tool for Knowledge-Based Real Time Control System, Proc. of Int. Workshop on AI for Industrial Applications - AIIA '88, pp.370-375, 1988.

M. Funabashi, S. Masui, F. Wakamori : A Reliable Scheme for Controlling Large Scale Plants and its Application to Multiple Reservoir Operation, Proc. of IFAC 8th World Congress, 1981.

F. Wakamori, S. Masui, M. Funabashi, et al. : Optimal Operation of a Multi-reservoir during Flood Periods, ibid, pp.XXIII42-XXIII47, 1981.

S. Masui, M. Shioya, T. Ohto, S. Nogita : Organic Load Control of the Activated Sludge Process based on Predicted Daily Variation of Influent Load, Water Science Technology, Vol.13, IAWPR, pp.387-392, 1981.

M. Shioya, S. Masui, S. Shimauchi, H. Ogasawara, T. Ohto : Role of Sensors in Trunk Sewers in the Control of Flow and Wastewater Quality, Water Science Technology, Vol.13 IAWPR, pp.55-60, 1981.

S. Masui, M. Shioya, T. Sakanishi, Y. Toyama, T. Imagawa, M. Fujita : Evaluation of a Diffusion Model Applicable to Environmental Assessment for Air Pollution Abatement, Proc. of IFAC Symposium, pp.771-779, 1977.

M. Funabashi, S. Masui, M. Shioya : A Minicomputer Based Photo Chemical Smog Prediction System to Reduce Acute Residential Effect, Proc. of IFAC Symposium, pp. 301-308, 1977.

[国内会議等]

増位, 田野 : システム制御のためのビッグデータモデル化技術, 電気学会電気学会第 65 回情報システム研究会資料, IS-15-058, 2015.

増位, 増石 : エキスパートシステム構築ツールによるプロトタイピング技法, The 33rd Conference of The ISCIE, pp.333-334, 1989.

坂口, 田野, 増位 : パターン制約集合に基づいた必要最小制約抽出アルゴリズム, 情報処理学会第 39 回全国大会, pp.265-266, 1989.

田野, 増位, 坂口 : 高速双方向推論のためのルール関連図 (ST-NET) の生成方式, 情報処理学会第 38 回全国大会, pp.531-532, 1989.

坂口, 田野, 増位 : ST-NET (ルール関連図) 生成のためのパターン間関係解析アルゴリズム情報処理学会第 38 回全国大会, pp.553-554, 1989.

田野, 増位, 大森 : ST-NET を用いた高速双方向推論アルゴリズム, 情報処理学会第 37 回全国大会, pp.1427-1428, 1988.

増位, 船橋: 知識ベース技術の実システムへの応用: 情報処理学会, AI 技術の適用による新情報通信サービスの展望と課題シンポジウム論文集, pp.51-60, 1987.

田野, 増位: 確信度を用いたあいまい知識の表現と推論方式, 情報処理学会第 35 回全国大会, pp.1831-1832, 1987.

増位, 芳賀, 吉浦, 古賀, 増石: エキスパートシステム構築ツール ES/X90(2): 知識表現, 情報処理学会第 35 回全国大会, pp.1735-1736, 1987.

古賀, 丸岡, 武内, 増位: エキスパートシステム構築ツール ES/X90(3): 推論機能, 情報処理学会第 35 回全国大会, pp.1737-1738, 1987.

田野, 増位: 事実知識, 仮説知識の表現と推論の方式, 情報処理学会第 34 回全国大会, pp.1669-1670, 1987.

増位, 中所, 原田, 片岡: ビジネス分野でのエキスパートシステム構築ツールの具備要件に関する一考察, 情報処理学会第 34 回全国大会, pp.1369-1370, 1987.

田野, 増位: 知識処理モデルに基づく推論及び推論制御方式, 人工知能学会第 1 回全国大会, pp.139-142, 1987.

増位, 田野, 船橋: 知識処理ソフトウェア EUREKA によるエキスパートシステムの構築技法, 情報処理学会第 33 回全国大会, pp.1139-1140, 1986.

田野, 増位, 船橋: 推論高速化のための弁別ネットワークの動的変形法, 情報処理学会第 33 回全国大会, pp.1417-1418, 1986.

増位, 田野, 船橋, 音喜多: 知識処理ソフトウェア EUREKA による推論機構の記述, 情報処理学会第 32 回全国大会, pp.1515-1516, 1986.

田野, 増位, 坂口, 船橋: 知識処理ソフトウェア EUREKA におけるルールネットワークの効率化方式, 情報処理学会第 32 回全国大会, pp.1517-1518, 1986.

増位, 田野, 船橋: システム制御用ソフトウェア EUREKA の開発, 計測自動制御学会第 2 回知識工学会資料, pp.37-44, 1986.

増位, 田野, 坂口, 船橋: 知識制御核ソフトウェア EUREKA のタスク管理方式, 情報処理学会第 31 回全国大会, pp.995-996, 1985.

田野, 増位, 船橋: 知識処理型ソフトウェア EUREKA における推論機構の高速化, 情報処理学会第 31 回全国大会, pp.993-994, 1985.

増位, 田野, 坂口, 船橋: 知識制御核ソフトウェア EUREKA によるプラント管理制御のラピッドプロトタイピング, 情報処理学会第 30 回全国大会, pp.1541-1542, 1985.

増位, 田野, 船橋: 知識制御核ソフトウェア EUREKA の記述体系, 情報処理学会第 29 回全国大会, pp.1373-1374, 1984.

増位, 船橋, 井原: 実時間制御に適したプロダクションルール実行管理方式の提案, 昭和 58 年電気学会全国大会, pp.1702-1703, 1983.

増位, 船橋: プロダクションシステムによるエネルギー管理計画方式, 情報処理学会第 27 回全国大会, pp.1181-1182, 1983.

増位, 舩橋, 和歌森: 目標値生成型ダム制御方式の提案, 昭和 56 年電気学会全国大会, pp.1803-1804, 1981.

増位, 舩橋, 大成: 自律分散制御方式の提案と多段ダム制御への適用, 昭和 55 年電気学会全国大会, pp.1672-1673, 1980.

和歌森, 舩橋, 増位, 大成, 平野: 多段ダムにおける最適放流計画, 昭和 55 年電気学会全国大会, pp.1670-1671, 1980.

増位, 舩橋, 前澤, 大成, 中尾: 概念形成支援システム CONSENSUS の試作開発, 昭和 54 年電気学会全国大会, pp.1729-1730, 1978.

増位, 舩橋, 中尾, 前澤, 大成: 合意形成支援装置 CONSENSUS の試作, 信学技法, Vol.78, No.186, 1978.

増位, 舩橋: 光化学スモッグシミュレーションモデルの開発, 昭和 51 年電気学会全国大会, pp.1660-1661, 1976.

増位, 大成: 大気汚染の制御と管理, 昭和 51 年電気四学会連合大会, pp.7.3-7.6, 1976.

[解説等]

増位, 葉木, 梶山, 今城: ソフトウェア生産技術の展望—ソフトウェアエンジニアリングの現状と将来—, 日立評論, Vol.75, No.11, pp.4-8, 1993.

S. Masui, A. Maeda, T. Masuishi: Current Hitachi Knowledge Engineering Systems: An Overview, Hitachi Review, Vol.41, No.1, pp.1-6, 1992.

増位, 小六, 山中, 小塚: ES/KERNEL2 をベースにした知識ベースシステムの次世代への展開, 日経インテリジェントシステム別冊 1992 秋号, pp.78-87, 日経 BP 社, 1992.

増位, 田野: プロダクションシステムの高速化, 人工知能学会誌, Vol.6, No.1, pp.38-46, 1991.

増位, 広瀬, 渡辺, 磯辺: エキスパートシステム技術の動向, 日立評論, Vol.72, No.11, pp.9-14, 1990.

天野, 平, 渡邊, 関, 中井, 滝川, 小林, 増位: 高炉操業管理システム, 日立評論, Vol.72, No.7, pp.69-76, 1990.

森, 中野, 増位, 田野, 本多: 知識処理システム構築ツール EUREKA-II, 日立評論, Vol.71, No.8, pp.9-16, 1989.

増位, 磯辺, 山中, 片山, 西野: エキスパートシステム構築ツールの新しいトレンド, 日立評論, Vol.70, No.11, pp.8-13, 1988.

舩橋, 増位, 森, 中井, 鈴木: 知識処理システムとその構築支援ツール, 日立評論, Vol.70, No.5, pp.103-110, 1988.

金森, 大小田, 田野, 増位, 中川: ES/KERNEL での知識表現と高速推論方式, 日立評論, Vol.69, No.3, pp.17-22, 1987.

増位，田野：エキスパートシステム構築ツール ES/KERNEL，EUREKA-IIにおける知識表現と推論方式，Archive，1987年11月，Vol.7，pp.114-134，CQ出版，1987.

中所，増位：知的プログラミング，計測と制御，Vol.25，No.4，pp.72-77，1986.

増位，田代，山田，元田，船橋：知識処理のための推論ソフトウェア，日立評論，VOL.67，No.12，pp.13-18，1985.

謝辞

本論文は、執筆者が株式会社日立製作所システム開発研究所において行った研究をベースとして、電気通信大学で最近の計算機科学の動向を踏まえてまとめ直しおよび追記を行ったものです。

本研究全般にわたり、主任指導教員として、研究のまとめ方の方向性から論文構成の細部まできめ細かいご指導をいただいた電気通信大学大学院情報システム学研究科 田野俊一教授に深く感謝申し上げます。また種々にわたってご指導いただいた副指導教員である、電気通信大学大学院情報システム学研究科 橋山智訓准教授、阪口豊教授に感謝申し上げます。

本論文をまとめるにあたり、論文審査において非常に有益なコメントをいただいた電気通信大学大学院情報システム学研究科 末廣尚士教授、広田光一教授、植田真臣教授、南泰浩教授に、深く感謝いたします。

本研究の推進にあたり、研究のご指導およびご助言をいただいた船橋誠壽博士、渡辺俊典博士（電気通信大学大学院情報システム学研究科名誉教授）、研究室での研究会で互いに研鑽を深めた中野利彦博士、兒玉隆一郎博士、石川貞裕博士、藤林昭氏、天野光司氏に感謝いたします。

上記以外にも、執筆者の研究活動を支えていただいた全ての方々に感謝いたします。ありがとうございました。

参考文献

[第1章]

- 1) L.Wheeler : Josiah Willard Gibbs - the History of a Great Mind, Woodbridge, CT
Ox Bow Press, 1951.
- 2) カール・J. オーストレム, ビョーン・ヴィッテンマルク : 計算機制御システム - 理論と
設計, 工学社, 1997.
- 3) 杉江, 藤田 : フィードバック制御入門, コロナ社, 1999.
- 4) 井越, 大澤 : 知の協創支援—脳と計算機でアイディアを紡ぎ出す, オーム社, 2010.
- 5) 松田 : 2045 年問題 コンピュータが人類を超える日, 廣済堂出版, 2012.
- 6) 日向, ほか : 制御システム設計—コントローラの低次元化, システム制御情報学会 (編),
朝倉書店, 1999.
- 7) シドニー・デッカー : ヒューマンエラーは裁けるか—安全で公正な文化を築くには, 東京
大学出版会, 2009.
- 8) 増位, 塩谷 : 分布特性を考慮した下水処理プロセスのモデル化, 電気学会論文誌 C,
Vol.104, No.12, pp.295-302, 1984.
- 9) 増位, 船橋, 大成 : 大規模プラント制御方策の分散化とその多段ダム制御への適用, 電気
学会論文誌 C, Vol.106, No.3, pp.33-40, 1986.
- 10) 天野, 平, 渡邊, 関, 中井, 滝川, 小林, 増位 : 高炉操業管理システム, 日立評論, Vol.72,
No.7, pp.69-76, 1990.
- 11) 増位, 田野 : システム制御のためのビッグデータモデル化技術, 電気学会第 65 回情報シ
ステム研究会資料, IS-15-058, 2015.
- 12) S.Masui, S.Tano : Emergent System-Control Scheme for Age of Big Data, the 4th Asian
Conference on Information Systems-ACIS2015, Penang Malaysia, 2015.10.16.

[第2章]

- 13) 庄司, 高橋 : 最新モデル化とシミュレーション, 実教出版, 2006.
- 14) 鉄道総合技術研究所運転システム研究室 : 鉄道のスケジューリングアルゴリズム, エヌ・
ティー・エス(出版社), 2005.
- 15) 加藤 : 最適制御入門—レギュレータとカルマンフィルター, 東京大学出版会, 1987.
- 16) 鈴木 : アダプティブコントロール, コロナ社, 2001.
- 17) ヤン・マチェヨフスキー : モデル予測制御—制約のもとでの最適制御, 東京電機大学出
版局, 2005.
- 18) H.Kuwahara : Experience Teach Us the Future of Autonomous Decentralized Systems,
Proc. of the International Symposium on Autonomous Decentralized Systems,
Keynote Address, pp.169-175, 1997.
- 19) 有澤, ほか : 東京圏輸送管理システム「ATOS」—サービス向上のシームレスソリュー

ションー, 日立評論, Vol.90, No.8, pp.40-43, 2010.

- 20) 飯島, ほか: 社会インフラを支えるシステム技術, 日立評論, Vol.93, No.12, pp. 52-57, 2012.
- 21) E.A.Feigenbaum : Some challenges and grand challenges for computational intelligence, Journal of the ACM, Vol. 50, No.1, pp.32-40, 2003.
- 22) 森, 増位: ビジネスマンのためのA I 入門, オーム社, 1988.
- 23) Hitachi, Ltd. : HITACHI EXPERT SYSTEMS AT WORK, 1991.
- 24) 東京大学アンビエント社会基盤研究会実世界ログ WG 編: 実世界ログー総記録技術が社会を変える, PHP Publishing, 2012.
- 25) DIAMOND ハーバード・ビジネス・レビュー編集部(編) : IoT の衝撃, DIAMOND ハーバード・ビジネス・レビュー, 2015 年 4/01 号, 2015.

[第 3 章]

- 26) B.J.McCobe, et al. (edit.) : Biological treatment of sewage and industrial wastes Vol. II, Reinhold(出版社), 1958.
- 27) W.W.Eckenfelder Jr., et al. : Biological Waste Treatment, Pergamon Press, 1961.
- 28) 前田, ほか: 汚泥総量管理下での新 MLSS 制御法, 第一回研究発表会論文集, pp.133-136, 環境システム計測制御学会, 1980.10.
- 29) 中辻, ほか: 活性汚泥プロセスのシミュレーション解析, 第 12 回下水道研究発表会講演集, pp.213-217, 1976.
- 30) P.J.Roache : Computational Fluid Dynamics, Hermora Publishers, 1976.
- 31) 清家, ほか: 排水処理プラント計算機制御システムの開発, 住友重機技報, pp.53-60, Vol.24, No.71, 1976.
- 32) J.Monod : Annual Review Micro Biology, Vol.3, p.371, 1949.
- 33) J.B.Busby, et al. : Dynamic Modeling and Control Strategies for Activated Process, Journal of Water Pollution Control Federation, Vol.47, No.5, pp.1055-1080, 1975.
- 34) J.T.Fan, et al. : Dynamic Analysis and Optimal Control Synthesis Applied to Biological Waste Treatment, Water Research, Pergamon Press, p.1609, 1973.
- 35) 前田, ほか: 活性汚泥プロセスにおける汚泥の総量と配分制御, 第 21 回自動制御連合講演会論文集, p.335, 1978.
- 36) 丹保: 沈殿 2, 水処理技術, Vol.10, p.41, 1969.
- 37) 柴崎, ほか: 下水処理プロセスにおける最終沈澱池のモデル化, 第 16 回下水道研究発表会講演集, pp.6-10, 1979.
- 38) 富士元, ほか: 余剰汚泥制御における最終沈澱池滞留汚泥量演算, 第 18 回下水道研究発表会講演集, pp.10-16, 1981.
- 39) 石原: 水工水理学, 丸善, 1972.
- 40) 赤池, ほか: ダイナミックシステムの統計的解析と制御, サイエンス社, 1972.

- 41) 加藤, ほか: 下水処理プロセスの総合水質制御システム, 日立評論, Vol .59, No.8, pp.31-36, 1977.

[第 4 章]

- 42) D.D.Siljak: Large Scale Dynamic Systems: Stability and Structure, North-Holland, 1976.
- 43) 志水: システム最適化理論, コロナ社, p188, 1976.
- 44) N.R.Sandell, Jr., P.Varaiya, M.Athans, N.G.Safonov: Survey of Decentralized Control Methods for Large Scale Systems, IEEE Trans. Automatic Control, Vol. AC-23, No. 2, pp. 108-128, 1978.
- 45) L.Isaksen, et al.: Suboptimal control of linear systems by augmentation with application to freeway traffic regulation, IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.AC-18, No.3, pp.210-219, 1973.
- 46) 檜山: 発電量の増加率に対する制約を考慮した分散形負荷周波数制御, 電気学会論文誌 B, Vol.102, No.7, pp. 477-482, 1982.
- 47) 増位, ほか: 自律分散制御方式の提案と多段ダム制御への適用, 昭 55 年電気学会全国大会, pp.1672-1673, 1980.
- 48) M.G.Singh: Decentralised Control, North-Holland, 1981.
- 49) 有本: カルマンフィルタ, 産業図書, 1976.
- 50) 上滝, ほか: 自動制御理論, 電気学会, p.148, 1979.
- 51) M.Athans, et al.: Optical Control, McGraw-Hill, p.147, 1966.
- 52) F.Delebecque, et al.: Contribution of Stochastic Control Singular Perturbation Avaraging and Team Theories to an Example of Large-Scale Systems Management of Hydropower Production, IEEE trans. on Automatic Control, Vol. AC-23, No.2, pp.209-222, 1978.
- 53) 和歌森, ほか: 貯留量推定によるダム制御方式, 電気学会論文集 C, Vol.100, No.9, pp.291-297, 1980.
- 54) Y.C.Ho, et al.: Directions in Lerge Scale Systems, Prenum Press, 1975.
- 55) 増位, ほか: 自律分散制御方式の提案と多段ダム制御への適用, 昭和 55 年電気学会全国大会, pp.1672-1673, 1980.

[第 5 章]

- 56) 増位, 田野, 舩橋: 知識制御核ソフトウェア EUREKA の記述体系, 情報処理学会第 29 回全国大会, pp.1373-1374, 1984.
- 57) 増位, 田野, 坂口, 舩橋: 知識制御核ソフトウェア EUREKA によるプラント管理制御のラピッドプロトタイピング, 情報処理学会第 30 回全国大会, pp.1541-1542, 1985.
- 58) 増位, 舩橋, 井原: 実時間制御に適したプロダクションルール実行管理方式の提案, 昭和 58 年電気学会全国大会, pp.1702-1703, 1983.

- 59) バートランド・メイヤー：オブジェクト指向入門 第2版 原則・コンセプト，翔泳社，2007.
- 60) 松本、大槻：ソフトウェア設計—オブジェクト指向からエージェント指向へ，朝倉書店，1995.
- 61) 増位，田野，坂口，船橋：知識制御核ソフトウェア EUREKA のタスク管理方式，情報処理学会第31回全国大会，pp.995-996，1985.
- 62) 増位，田野，船橋：知識処理ソフトウェア EUREKA によるエキスパートシステムの構築技法，情報処理学会第33回全国大会，pp.1139-1140，1986.
- 63) 田野，増位，坂口，船橋：知識ベースシステム構築用ツール EUREKA における高速処理方式，情報処理学会論文誌，Vol.28，No.12，pp.1255-1268，1987.
- 64) 田野，増位：ST-NET アルゴリズム：双方向推論の高速処理方式，情報処理学会論文誌，Vol.29，No.10，pp.944-953，1988.
- 65) 田野，増位，船橋：知識処理型ソフトウェア EUREKA における推論機構の高速化，情報処理学会第31回全国大会，pp.993-994，1985.
- 66) 日本鉄鋼連盟（編）：鉄ができるまで，日本鉄鋼連盟，2011.
- 67) 財部，ほか：君津3，4高炉における知識工学の高炉管理システムへの適用，日本鉄鋼協会，第117回講演大会講演集「材料とプロセス」，Vol.2，No.1，pp.18-21，1989.
- 68) 湯井，ほか：高炉プロセスの操業監視支援における知識システムの適用，計測と制御，Vol.26，No.8，pp.712-719，1987.
- 69) 湯井，ほか：鉄鋼業におけるエキスパートシステムの応用，電気学会論文，Vol. 107，No. 2，pp.115-120，1987.
- 70) 増位、ほか：システム制御用知識処理ソフトウェア EUREKA の開発，SICE 第2回知識工学会資料，pp.37-44，1986.
- 71) 中西、ほか：制御用計算機 HIDIC V90/5 シリーズ，日立評論，Vol.70，No.5，pp.83-90，1988.

[第6章]

- 72) 樋口：予測にいかす統計モデリングの基本—ベイズ統計入門から応用まで，講談社，2011.
- 73) Z.Pawlak：Rough sets, International Journal of Information Computational Science, Vol.11, No.5, pp.341-356, 1982.
- 74) Z.Pawlak：Rough Sets, Kluwer Academic Publishers, 1991.
- 75) 水野，加藤，佐伯：統計的検定法を用いた決定表からのルール導出法，システム制御情報学会論文誌，Vol.26，No.8，pp.297-305，2013.
- 76) 宮島，乾口，鶴見，谷野：複数の決定表のラフ集合解析に関する基礎的考察，数理解析研究所講究録，Vol.1409，pp.234-247，2005.
- 77) W.Ziarko：Variable Precision Rough Set Model, Journal of Computer and System Science, Vol.46, pp.39-59, 1993.

- 78) S.Masui, S.Tano : Emergent System-Control Scheme for Age of Big Data, the 4th Asian Conference on Information Systems-ACIS2015, Penang Malaysia, 2015.10.16

著者略歴

増位 庄一（ますい しょういち）

1968 年 4 月 京都大学 工学部電子工学科入学
1972 年 3 月 京都大学 工学部電子工学科卒業
1974 年 3 月 京都大学 大学院工学研究科電気工学第二専攻修了
1974 年 4 月 株式会社日立製作所入社
1981 年 8 月 米国カーネギーメロン大学客員研究員（1 年間）
2010 年 4 月 東京大学産学連携本部入職
2013 年 4 月 情報通信研究機構入職
2014 年 4 月 電気通信大学 大学院情報システム学研究科 博士後期課程入学
2016 年 3 月 電気通信大学 大学院情報システム学研究科 博士後期課程修了