



# インテリジェントシステムのプラント制御への応用に関する研究

宮本, 裕一

---

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

1996-09-18

(Date of Publication)

2015-02-09

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

乙2076

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.11501/3129839>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D2002076>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



神戸大学博士論文

インテリジェントシステムの  
プラント制御への応用に関する研究

1996年8月

宮本裕一

# 序 文

コンピュータ技術の進展とともに、プラント制御の分野において人間の持つ問題解決能力をコンピュータ上に実現しようという試みが多くみられるようになった。従来、プラント制御分野ではシーケンス制御とフィードバック制御が両輪となって種々の製品群の自動化や高機能化に貢献してきた。人間は論理と感情でもって問題解決にあたると考えられるが、シーケンス制御は人間の持つ論理部分すなわちルール処理を担当し、フィードバック制御は感情部分すなわち状態のダイナミクス処理を担当してきた。しかし、対象が大規模かつ複雑化する傾向の前に現場の技術者は、シーケンス制御とフィードバック制御の統合を迫られ、技術体系の支援なしに処理することを余儀なくされているのが現状である。

ファジィ、AI、ニューロ、GA、すなわちFANG技術は、人間の持つ知識をコンピュータ上に表現し、問題解決を図るインテリジェントシステム構築技術であり、こうした現状の課題に 대응する可能性を秘めていると考えられる。

本論文は、インテリジェントシステムのプラント制御への応用を目的として、筆者が川崎重工業株式会社システム技術開発部門で行った研究をまとめたものである。

第1章では、本研究の背景としてインテリジェントシステムのシステム制御分野における位置づけとその発展経緯について記し、本研究で行ったインテリジェントシステムのプラント制御への応用の概要について述べる。

第2章では、プラント制御分野におけるインテリジェントシステムの必要性について述べ、有効なインテリジェントシステムの特長と課題について言及する。

第3章から第6章では、各章毎にファジィ、AI、ニューロ、GAそれぞれのインテリジェントシステムの構築方法論を述べ、それぞれのプラント制御への応用についての具体例を示し、関連研究との比較を行ってその有用性を述べる。

第7章では、本研究を総括し、研究結果の意義、今後の展開について述べ、本研究の結びとする。

# 目次

	ページ
第1章 緒論	1
第2章 インテリジェントシステムのプラント制御への応用における課題	4
2.1 緒言	4
2.2 プラント制御におけるインテリジェントシステムの必要性	4
2.3 インテリジェントシステムの特長と課題	6
2.4 結言	8
第3章 ファジィシステムの熱プラントへの応用	9
3.1 緒言	9
3.2 熱プラントにおける悪構造問題の特徴と課題	9
3.3 流動床ごみ焼却炉におけるファジィ燃焼制御	11
3.4 石炭部分燃焼ガス生成炉におけるファジィ非干渉制御	18
3.5 関連研究との比較	24
3.6 結言	26
第4章 エキスパートシステムの熱および物流プラントへの応用	29
4.1 緒言	29
4.2 知識ベースの自動生成に関する研究と課題	30
4.3 機械装置の故障診断システムの実現	41
4.4 プラントの運転支援システムの実現	47
4.5 物流搬送の最適スケジューリングシステムの実現	53
4.6 関連研究との比較	66
4.7 結言	67
第5章 ニューラルネットワークによる画像・プロセス信号融合と その熱プラントへの応用	71
5.1 緒言	71
5.2 ニューラルネットワークによるパラメータ推定	71
5.3 パターン認識によるごみ焼却炉適応燃焼制御の実現	78
5.4 記憶・識別処理によるスラグ流下状態評価手法の実現	84
5.5 関連研究との比較	95
5.6 結言	96

第6章 遺伝的アルゴリズムによる組合せ最適化とその熱プラントへの応用	98
6.1 緒言	98
6.2 動特性シミュレーションにおけるパラメータ調整	99
6.3 GAの構成	100
6.4 GAによるパラメータ調整方法	103
6.5 関連研究との比較	105
6.6 結言	106
第7章 結論	108
謝辞	112
付録 推論処理システムKISの特長と機能	113

# 第1章 緒論

プラント制御システムへの要求の多様化とプラント制御システムの大規模化、複雑化に伴い、システム制御技術分野にも環境や制御目的の変化に応じた問題解決能力が求められている。インテリジェントシステムはこのような要求に応えるものである。

従来、プラント制御分野では、シーケンス制御とフィードバック制御が両輪となって種々の製品群の自動化や高機能化に貢献してきた。人間は論理と感情でもって問題解決にあたりと考えられるが、シーケンス制御は人間の持つ論理部分すなわちルール処理を担当し、フィードバック制御は感情部分すなわち状態のダイナミクス処理を担当してきた。(新94) しかし、対象が大規模かつ複雑化する傾向の前に現場の技術者は、シーケンス制御とフィードバック制御の統合を迫られ、それを技術体系の支援なしに処理することを余儀なくされているのが現状である。

ファジィ、AI、ニューロ、GAすなわちFANG技術は、人間の持つ知識をコンピュータ上に表現し、問題解決を図るインテリジェントシステム構築技術であり、こうした現状の課題に応えうると考えられる。さらに、従来のシーケンス制御とフィードバック制御が与えられた目標を達成する技術であったのに対して、インテリジェントシステムは目標自体を自ら創り出し、それを達成する制御手段を選択し、さらに制御結果を予測して、状況の変化に応じてより柔軟で高度な制御を実現する可能性を秘めていると考えられる。

FANG技術という言葉の由来は福田によるものだとされている(木村95)が、従来のシーケンス制御やフィードバック制御との大きな相違点は、問題を記述する方法論が異なる点にある。すなわち、従来技術がペトリネットやラダー表現と微分方程式によるダイナミクス表現が基本であったのに対して、FANG技術では、ファジィ述語論理、クリस्प述語論理、ニューラルネットワーク、遺伝的アルゴリズムなどの記述言語で表現し、操作、計算過程を包

含する。これにより、システム制御技術の適用対象領域が拡大し、応用範囲が広がってプラント制御システムにとり有用となる。しかし、FANG技術の歴史は未だ浅く、その有用性を拡大して行こうとすると、実際に現場への適用を図り、そこから得られた課題を克服して行くアプローチが有効である。

本研究では、ごみ焼却炉や石炭ガス生成炉などの熱プラント、製鉄所コイル搬送台車などの基礎産業製品群を対象としてFANG技術を適用し、各々の技術の有用性と問題点を明確としてインテリジェントシステムのプラント制御への応用方法論を確立することを目標とする。

FANG技術の根幹はAI技術の研究の流れに見ることができる。AI技術は1960年代に探索や定理証明を中心に汎用の問題解決システムを実現することを目標に始まった。1970年代に入ると、知識表現に関する研究が活発になり、さまざまな知識表現言語やツールの開発が試みられた。1970年代後半になると、エキスパートシステムの研究開発が盛んになり、1980年代前半のAIブームのきっかけとなった。その後、エキスパートシステムの限界は広い意味での知識獲得に問題があるとの反省から、1980年代後半よりさまざまなアプローチが試みられ機械学習の研究やデータベースから知識発見に関する研究が盛んになった。また、ファジィ、ニューロ技術を家電製品を対象として適用する研究が盛んとなり、システム制御理論を多様化する原動力となった。1990年代になると経済のバブル崩壊とともにFANG技術に対する冷静な評価と体系化を求める姿勢が明確となり、一方でAIに対するアプローチとして、生物の機構を見習う方法論の研究が注目を集めることとなった。その一つが生物の遺伝、進化のメカニズムを模擬したGenetic Algorithm 遺伝的アルゴリズムである。

このように、FANG技術を中心としたインテリジェントシステム構築技術はコンピュータ技術の進展とともに、この20年で目覚ましい発展を遂げたが、その体系化とプラント制御への応用方法論の確立はこれからの課題と

なっている。

第2章では、プラント制御分野におけるFANG技術を中心としたインテリジェントシステムの必要性について述べ、有効なインテリジェントシステムの特長と課題について言及する。

第3章から第6章では、各章毎にファジィ、AI、ニューロ、GAそれぞれのインテリジェントシステム構築方法論を述べ、それぞれのプラント制御への応用についての具体例を示し、関連研究との比較を行ってその有用性を述べる。

第7章では、本研究を総括し、研究結果の意義、今後の展開について述べ、本研究の結びとする。

#### 参考文献

(木村95) ファジィ・AI・ニューロとシステム理論、システム/制御/情報  
Vol.39, No.1, pp.2~13, 1995

(新94) 制御におけるAI、ファジィ、ニューロ技術とその将来、システム/制御/情報 Vol.38, No.2, pp.95~102, 1994



# 第2章 インテリジェントシステムの プラント制御への応用における課題

## 2. 1 緒言

1990年代に入って、FANG（ファジィ、AI、ニューロ、GA）技術を中心としたインテリジェントシステムが生産の種々の場面で実用化されてきており、それに伴ってそれぞれの技術の持つ適用上の課題も明らかになりつつある。[倉富 94]

インテリジェントシステムは、現場の技術者や運転員の持つノウハウをいかにコンピュータ上に表現し活用するかを技術の原点としている。しかし、現場の技術者や運転員から知識を獲得するのに対話に頼って行う方法では得られる知識の質、量に安定した結果を得ることは期待できない。本研究では、現場の技術者の持つノウハウや設計資料を知識として活用することを目指す。すなわち、従来のシステム制御技術が基本とした数式モデルによるダイナミクス表現を可能な限り取り入れ、FANG技術が拡張した対象の表現能力との融合を図る。

そのため、本章ではプラント制御への応用におけるインテリジェントシステムの必要性について分析を行い、それに応えるインテリジェントシステムの特長と課題を掲げ、まとめとしてFANG技術を中心としたインテリジェントシステムを概観する。

## 2. 2 プラント制御におけるインテリジェントシステムの必要性

FANG技術に代表されるインテリジェントシステムは、いずれも人間的な点を特徴としている。人間は物忘れをしたり、間違いを犯すことはあるが、数式モデルとは異なる表現でダイナミクスモデルを学習により構築し、そのモデルによる予測能力に特長を発揮する。FANG技術がどれ程人間に近づいているかは議論があるが、従来の数式モデルによるダイナミクス表現を基本としたシステム制御技術よりはるかに人間の特長を取り入れようとしている姿勢については論をまたない。

こうした人間が特長とする学習によるモデル構築と予測機能は産業界にお

いて有用であることは、プラント現場などが熟練技術者の臨機応変な能力で支えられていることから明らかである。産業界においては、シーケンス制御とフィードバック制御を両輪として、体系なしに特定の製品について両者の統合を図り解決しているのが現状である。しかし、対象の大規模化、複雑化の前にこうしたアプローチに限界がある。

一方、少し複雑な制御対象となると、PIDを始めとする各種制御方式が対応できても人間では対応できない事例を見つけることは容易である。これは、従来のシステム制御技術が基本とする数式モデルが制御対象の動特性に関する情報をコンパクトに縮約しており、制御対象の挙動を予測でき、適切な操作入力を演算することができることによる。(池田 90)

したがって、コンピュータハードウェア技術の進展を背景として、FANG技術を中心としたインテリジェントシステムを活用し、人間の長所を取り入れたシステム制御技術を展開することへの期待は大きく、さらに展開においてソフトウェアの生産性や保守性を向上することは必須である。

インテリジェントシステムが必要とされる適用先は大きく次のように分類できる。

- 1) 解析：工場スタッフ部門の品質保証、操業管理メンバー、または研究開発のメンバーが携わっており、これらの業務の効率化、高度化がインテリジェントシステムの支援により達成される。
- 2) 診断：支援という言葉が最も馴染む分野であり、種々のイベントに対して意志決定を行う際、有効な場合が多い。
- 3) 計画：一般に様々なケースが存在し、最も標準化が難しい分野である。しかし、組合せの多様化に伴い、熟練者の能力が最も発揮される場合もある。通常、簡単であると想定される場合でも、多岐にわたる制約条件が存在しており、また、状況の変化に伴って多様に目的が変化することからも重要な課題である。
- 4) 制御：常にリアルタイム性が要求され、また、時々刻々と移り変わるプロセスを取り扱うためには、高速性を要求され、最も困難な課題である。こうした分野での問題解決やシステム制御の対象が、今後とも大きく変化していく状況で、インテリジェントシステムはプラント制御分野を支えていく原動力としての役割を果たしていかねばならない。

## 2. 3 インテリジェントシステムの特長と課題

インテリジェントシステム構築技術を構成するファジィ、AI、ニューロ、GAのFANG技術の特長と課題を表2-1に示す。

表2-1より、FANG技術の主な特長のみを抽出して示すと以下となる。

- (1) ファジィ：言葉のあいまい性や漠然性をあつかえる方法論
- (2) AI：記号表現による処理にてモデル化方式による問題解決を可能とする
- (3) ニューラル：学習の一般化能力と並列処理
- (4) GA：生物の進化メカニズムの模擬による発展性

これらの特長を前節で述べた産業応用分野へ展開すると、図2-1のようにインテリジェント階層に応じた適用性として整理される。

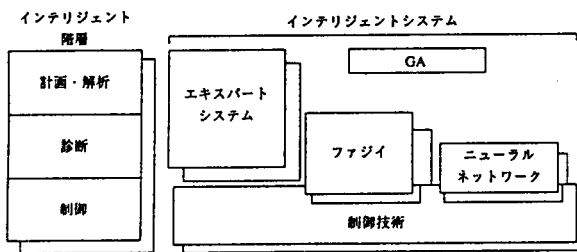


図2-1 インテリジェントシステムの適用

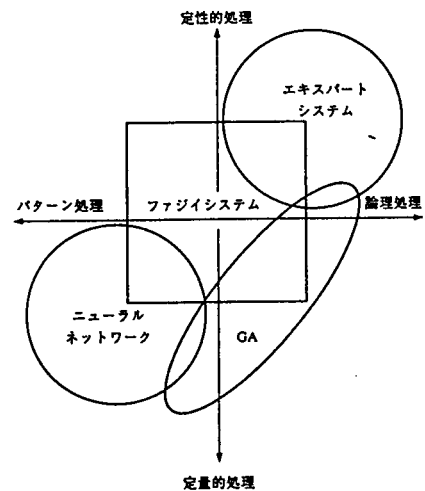


図2-2 インテリジェントシステムの関係

また、表2-1よりFANG技術の主な課題を列挙すると以下となる。

- (1) ファジィ：普遍的な設計方法論の確立が十分でない
- (2) AI：定量的処理、パターン処理を他の手法に依存せざるを得ない
- (3) ニューラル：比較的小規模な問題に限定されがちである
- (4) GA：実験的段階である

したがって、FANG技術のプラント制御への応用を展開する上でこうした特長と課題を考慮して、適用対象に応じたインテリジェントシステム構築技術を単独もしくは融合して用いる必要がある。図2-2に横軸を論理処理、パターン処理、縦軸を定性的処理、定量的処理にとってFANG技術の位置づけを示した。

表 2-1 インテンテリジェントシステム構築技術の特長と課題

	ファジイシステム	A I	ニューラルネットワーク	遺伝的アルゴリズム
特長	<p>1. 言語による特性記述に基づいて、制御や推論を行なうことができる。</p> <p>2. 現象の蓋然性を確率的にあつかってきた従来科学の科学に対して、言葉のあいまい性や感情の漠然性をあつかえる方法論である。</p> <p>3. TRADE OFF 問題に対して有効に推論される。</p> <p>4. 矛盾した知識を許容できる。</p>	<p>1. 数理的表現のみならず記号表現による論理的処理を可能にし、これによって問題及び科学的的方法論の過程そのものを表現することができる。その結果として、モデル化方式による自律的問題解決システムの実現を可能にする。</p> <p>2. 従来型の情報処理と親和性が高い。</p> <p>3. 知識の汎用性がある。</p> <p>4. AIの原理は、認知科学、つまり心のモデルに基づいている。</p> <p>5. 機械翻訳、設計支援、スケジューリング、プラント診断など、AIが対象としている問題は、複雑であり、期待される効果や有効性は大きい。</p>	<p>1. 多数の処理ユニットが並列に情報を処理する並列分散処理性。</p> <p>2. 学習によって処理機能を獲得する自己組織化能力。</p> <p>3. 学習していないパターンにも、過去の学習に基づいて対応できる学習の一般化能力。</p> <p>4. 記憶は、ユニット間の局所的な結合として表現される情報の分散表現性。</p>	<p>1. 生物の進化メカニズムを模擬。</p> <p>2. 対象の特性が不明であっても、最適化問題での組合せ探索を防ぐことができる。</p>
問題点	<p>1. 普遍的な設計の方法論が確立していない。(一般的にニューラルネットワークの助けを借りて、メンバシップ関数を同定している。)</p> <p>2. 適応対象があいまい性を持っているため、システムの最適化が難しい。(評価関数の設定が困難)</p> <p>3. 知識の表現が限定されている。</p> <p>4. メタ学習のルールによって附加的に学習を行うことができるが、構造的に学習機能を有しているわけではない。</p> <p>5. 汎用的な推論適用が可能なのか不明である。</p>	<p>1. 知識対象の記号記述が煩雑である。</p> <p>2. 現行のコンピュータシステムでは、処理に時間がかかる。</p> <p>3. 知識獲得がポトルネック。KEの負担が大きい。</p> <p>4. モデルの表現能力などの制限で問題解決の方法論が明確に確立されていない。</p> <p>5. 問題毎にモデルを生成したり、相互の関係が複雑になると大規模問題への対応が難しい。</p> <p>6. 問題解決過程の制御が長時間で実行できず、演算時間の予測が難しいなど長時間問題への対応が難しい。</p>	<p>1. フォン・ノイマン型コンピュータの基では、処理の効率が悪い。</p> <p>2. 局所解に収束する可能性を否定できない。(最適解の保証性)</p> <p>3. 比較的小規模な問題に、限定された条件の下で適用した場合は、一応の結果をえられるが、実用規模の問題に於ては不確定な要素が多いため、可能性や限界に対する理論的考慮が十分にできていない。</p> <p>4. 最適化の並列解法(トラベリングセールスマン問題など)において、解法の原理が数字的に証明されていない。よって、汎用的なケースでうまく行くか不明。</p>	<p>1. 評価関数が確定していることが必要。</p> <p>2. 局所解に収束する可能性を否定できない。</p>
今までの適用実績	<p>1. 制御特性に特異的な特性を付加するために利用された。(家電製品の例)</p> <p>2. オペレーションリサーチ問題の拡張問題や意志決定支援などに利用されている。(判断のあいまい性や人間の言葉の多義性を扱う方法論として利用している。)</p> <p>3. 人間と機械のインタフェースにおいて、言葉の解釈や言語の理解等についての実験的な検討がある。</p>	<p>1. 計算された結果に基づいて分析をやり直して、解を見つけてゆく、非決定型の問題解決に利用されている。機械設計、VLSI、意志決定、言語図形理解等の大規模コミュニケーションへのコンピュータ上での適用例は多数。</p> <p>2. 従来からのフィードバックは、自然言語処理、パターン情報処理及びエキスパートシステム。</p>	<p>1. まだ実験的な段階で、ニューラルネットワーク単体での効果的な実績は少ない。</p> <p>2. ファジイ推論のメンバシップ関数の同定に良く利用されている。</p>	<p>1. 実験的な段階。</p>
将来の展望	<p>1. 理論的な完全性と完結性を重視する立場で、ファジイ理論を見直す必要がある。</p> <p>2. ハードウェア上の問題として、ファジイソフトウエア、ファジイメモリ、ファジイコンピュータのアーキテクチャなどが明確にならないならならなければならない。</p>	<p>1. 従来から進められてきた要素技術の研究では、汎用性が乏しい。そこで、現在、システム化の流れがさかんである。</p> <p>2. 対象やモデルの効率的表現能力の向上。</p> <p>3. デーモン関数の改善などの情報相互の関係の明確化と効率的な大規模な知識ベースの実現。</p> <p>4. 推論のマネージメントや実行時間制御。</p> <p>5. リアルタイム知識ベース生成、検索技術。</p>	<p>1. ニューラルネットワークのダイナミクスについての安定論、確率を導入したポトルマンマシンの動作探究、連想記憶モデルの数々の様相、階層型ネットワークにおける学習法、神経場の自己組織と情報表現に関する研究。</p> <p>2. ニューロチップや光子素子を用いて並列素子を実現するハードウェアがニューラルネットワークのキーとなる。</p> <p>3. ニューロダイナミクスは、超多自由度高次の非線形システムであり、学習機能なども検討してゆくには、数学や物理の分野でより深い研究がなされなければならない。ニューロは発展しない。</p> <p>4. AIの記号処理モデルと神経回路網モデルの協調的利用が有効かも知れない。</p>	<p>1. 問題に応じた個体表現の導出体系の確立。</p> <p>2. 大規模問題での実行・評価が必要。</p>

## 2. 4 結言

第2章ではFANG技術に代表されるインテリジェントシステムがプラント制御への応用として有用であることを述べ、一方でプラント制御への応用を図る上でのインテリジェントシステムの特長と課題を分析し、適用対象に応じてFANG技術を融合化して用いる必要があることを述べた。

本研究では、こうしたニーズに対応して、現場の技術者の持つノウハウや設計資料を知識として活用してインテリジェントシステムを構築することを目指す。すなわち、従来のシステム制御技術が基本とした数式モデルによるダイナミクス表現を可能な限り取り入れ、FANG技術が拡張した対象の表現能力との融合を図る。

これは、FANG技術が未だ普遍的な体系化が十分といえない状況であり、その有用性を明らかとする適用事例の蓄積もまた十分ではない。そのため、プラント制御分野で実用化され設計作業として体系化されている技術を基本としてインテリジェントシステム構築技術の実用化を図ろうとするものである。

## 参考文献

- [倉富 94] AI/ファジィ/ニューロ実運用上の課題とさらなる展開、計装、Vol.37, No.1 (1994)
- [池田 90] ファジィ制御への過大な期待に対する疑問、計測と制御、Vol.29, No.8 (1990)

# 第3章 ファジィシステムの 熱プラントへの応用

## 3. 1 緒言

基礎産業分野では、発電プラント用のボイラ、船用タービン・ボイラプラント、回収ボイラ、製鉄プラントの高炉炉頂圧エネルギーを回収してタービン・発電機をまわす炉頂圧タービン、ガスタービンコージェネレーションシステム、ごみ焼却プラントなどの多くの熱プラント製品群を開発・製造している。それら熱プラントの自動化、高性能化に果たすシステム制御技術の役割は大きくコンピュータ利用技術・シミュレーション技術を駆使して各々の熱プラントに適した制御システムの研究開発が推進されている。例えば、原動機として故障した場合の影響が非常に大きいガスタービンプラントなどの故障診断エキスパートシステムや、熟練運転員の経験や操作方法をコンピュータに吸収して運転操作の支援を行う、ごみ焼却プラント運転支援エキスパートシステム、大規模なシステムの運転訓練に有効な電力プラント訓練シミュレータなどで成果が報告されている。

本章では、こうした熱プラントにおける悪構造問題の特徴と課題を分析し、悪構造問題を解決するのに有効なファジィシステム構築技術について述べる。すなわち、熱プラントの代表的な産業応用例である流動床ごみ焼却炉と石炭部分燃焼ガス生成炉を対象として各プラントの燃焼制御系統にファジィシステムを具体的に適用し、各プラントにおけるシステム制御上の問題解決が図られ、ファジィシステムが悪構造問題に有用なことを示す。

## 3. 2 熱プラントにおける悪構造問題の特徴と課題

悪構造問題とは良構造問題と対比して用いられ(小林 85)、プラント制御分野での問題解決要求の大部分が属する。良構造、悪構造両問題のそれぞれの特徴、各問題への接近方法、取扱い手法を表3-2-1にまとめて示す。

熱プラントでは、燃料性状に応じて異なる燃焼方式が用いられる。例えば微粉炭ボイラではバーナ燃焼、多炭種対応が要求される石炭焚きボイラでは

表 3-2-1 良構造問題と悪構造問題の比較

問題	良構造問題	悪構造問題
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 数値的</li> <li>・ 位相的</li> <li>・ 繰り返しの</li> <li>・ 情報的に閉</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 記号的</li> <li>・ 組合せ的</li> <li>・ 一過的</li> <li>・ 情報的に開</li> </ul>
接近方法	システム科学	インテリジェントシステム
取扱手法	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 理論的</li> <li>・ 制御駆動的</li> <li>・ モデルベース</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 経験的</li> <li>・ 事象駆動的</li> <li>・ 知識ベース</li> </ul>

流動床燃焼、ごみや製紙プラントの黒液などの発熱量が不安定な燃料の場合には固定床燃焼が用いられる。これらの燃焼方式では、燃料と空気の接触頻度を考慮して、燃料の完全燃焼に最低必要な空気量よりも過剰空気を供給して燃焼を行う。そのため、空気比は1以上となる。この空気比を用いて図3-2-1のように整理することが可能であり、空気比が1に近い程燃焼における確定性が増し、ごみ燃焼のように空気比が2程度での燃焼では確定性が小で、対象プラントのモデル化を行うのも非常に難しくなる。したがって、燃焼挙動のあいまいさが大きいために空気比が1よりもかなり大の領域で運転される熱プラントでは、確定性が低い特性に対する制御方策が必要であり、例えばセメントプラントにてファジィ制御が実用化された背景が表れている。

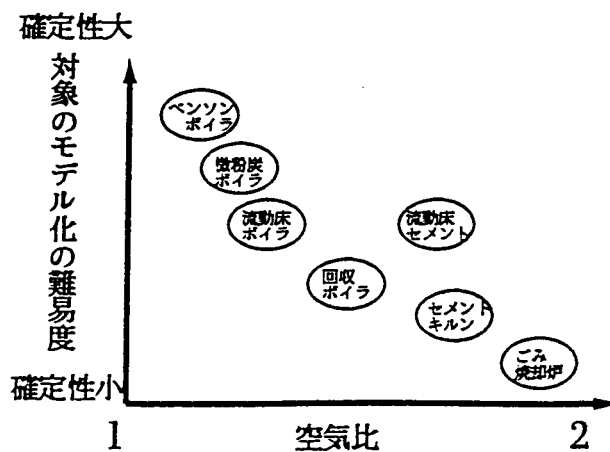


図 3-2-1 熱プラントの空気比による分類

### 3. 3 流動床ごみ焼却炉におけるファジィ燃焼制御 (宮本 96)

#### 3. 3. 1 燃焼制御の目的と動特性解析モデル

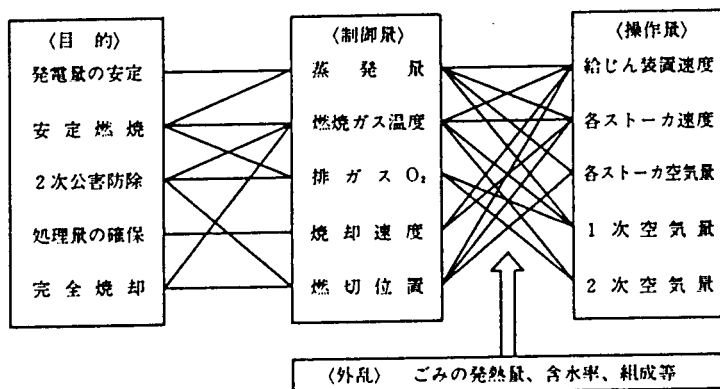
ごみ燃焼の特徴として、燃料としてのごみの物理的、化学的性状が不均一であることがあげられる。このため、以下の燃焼変動がみられる。

- 1) 炉内に供給されたごみの低位発熱量が変動するため、燃焼時の発生熱量が変動する。
- 2) 炉内に供給されたごみは、ごみ中の水分量の変動などにより、炉内投入後の蒸発、分解燃焼の完結時間が変動する。
- 3) 給じん装置速度が一定であっても、ごみの形状、比容積などが不均一であるため、炉内に供給されるごみの重量流量が変動する。

これらの変動がごみの安定燃焼を阻害する外乱要因となる。また、燃焼のための操作量と注目すべき状態量間には表3-3-1のような相互干渉がみられる。

表3-3-1ごみ焼却炉における状態量操作量間の関係

従って、燃焼制御の目的としては、ごみ性状の変動を吸収することが第一義であり、そのためプロセス状態の計測を行なって、空気・燃料操作を行なうこととなる。



流動床ごみ焼却炉の燃焼過程は蒸発燃焼、分解燃焼、表面燃焼の各過程が同時に進行するものと考えられる。すなわち、図3-3-1のようにプラスチック類などの融点の低い成分が燃焼に先だって熔融し、蒸発して燃焼する。木材・紙など多くの固体燃料は、加熱によって熱分解を起こし、揮発しやすい成分が表面から離れたところで分解燃焼する。揮発分を含まないチャーは、層内で酸素が固体表面に拡散して反応する表面燃焼となる。(水谷92) また、不燃物は層内を沈降し、焼却残さとして砂粒とともに抜き出される。

これらの流動床ごみ焼却炉の特徴を考慮し、著者らが石炭焚き流動床ボイラの開発時に作成した数式モデル(黒崎83)(Tsutsumi 89)を基本として、以下の仮定のもとで動特性解析モデルを作成した。



- 1) 流動層燃焼部、フリーボード燃焼部、ガス冷却部の3部に分け、エネルギーバランス、マスバランスを数式で記述する。
- 2) ごみが層上部より供給されるためフリーボード燃焼も考える。
- 3) 供給されたごみは揮発分と固定分に分かれ、固定分は層内での滞留を考慮する。

この仮定に基づいたエネルギーバランスを図3-3-2に示し、エネルギー、マスバランスを式(3-3-1)～(3-3-16)とする。

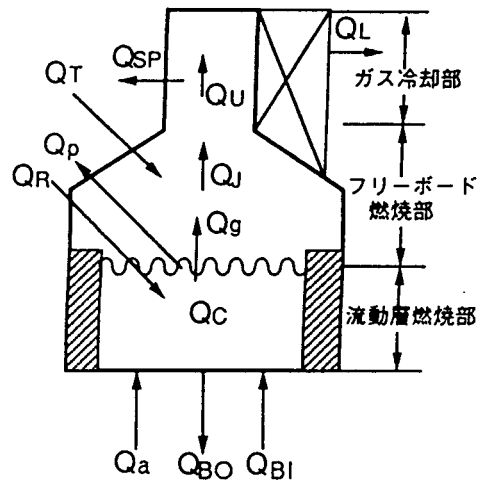
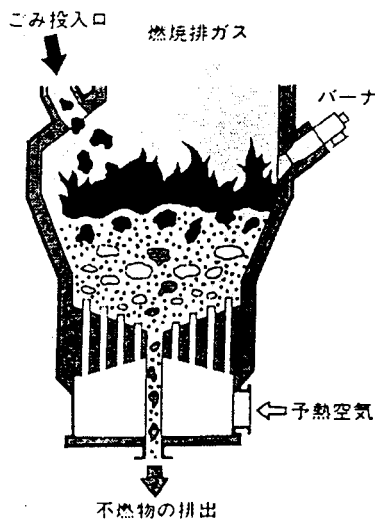


図3-3-1 流動床ごみ焼却炉の概念

図3-3-2 エネルギーバランス

$$d(C_B W_B + C_R W_R) T_g / dt = Q_R + Q_a + Q_c - Q_g + Q_{BI} - Q_{BO} - Q_P \quad (3-3-1)$$

$$Q_g + Q_j + Q_T = Q_u \quad (3-3-2)$$

$$Q_u = Q_{sp} + Q_L \quad (3-3-3)$$

$$dW_R / dt = K G_R - \eta W_R \quad (3-3-4)$$

$$Q_c = H_{uc} \eta W_R \quad (3-3-5)$$

$$Q_a = C_{pa} T_a G_{a1} \quad (3-3-6)$$

$$Q_T = C_{pa} T_a G_{a2} \quad (3-3-7)$$

$$Q_{sp} = 600 G_{sp} \quad (3-3-8)$$

$$Q_J = (1 - K) H_{uj} G_R \quad (3-3-9)$$

$$Q_L = C_{pg} G_g T_L \quad (3-3-10)$$

$$Q_g = C_{pg} G_g T_g \quad (3-3-11)$$

$$Q_{BO} = C_B G_{BO} T_g \quad (3-3-12)$$

$$Q_{BI} = C_B G_{BI} T_{BI} \quad (3-3-13)$$

$$Q_P = 600 G_P \quad (3-3-14)$$

$$Q_R = C_R G_R T_R \quad (3-3-15)$$

$$Q_U = C_{pg} G_g T_f \quad (3-3-16)$$

$Q_c$  : 層内燃焼発熱量 (kcal/h)

$Q_a$  : 層内供給空気顕熱 (kcal/h)

$Q_T$  : 層上供給空気顕熱 (kcal/h)

$Q_{SP}$  : ガス冷却水蒸発潜熱 (kcal/h)

$Q_J$  : フリーボード部以降燃焼発熱量 (kcal/h)

$Q_L$  : ガス冷却部以降排ガス顕熱 (kcal/h)

$Q_g$  : 排ガス顕熱 (kcal/h)  $T_g$  : 層温度 (°C)

$Q_{BO}$  : 層物質抜き出し顕熱 (kcal/h)

$Q_{BI}$  : 層物質持込み顕熱 (kcal/h)

$Q_P$  : プラント水蒸発潜熱 (kcal/h)

$Q_R$  : ごみ供給持込み顕熱 (kcal/h)

$Q_U$  : 排ガス顕熱 (kcal/h)  $K$  : 層内燃焼率

$C_B$  : 層物質比熱 (kcal/kg°C)  $C_R$  : ごみ比熱 (kcal/kg°C)  $W_B$  : 層物質重量 (kg)

$W_R$  : 層内ごみ滞留量 (kg)

$G_R$  : ごみ供給量 (kg/h)  $\eta$  : 層内燃焼速度 (1/h)

$H_{uc}$  : ごみ低位発熱量 (蒸発分解燃焼分) (Kcal/kg)

$H_{uj}$  : ごみ低位発熱量 (表面燃焼分) (Kcal/Kg)

$C_{pa}$  : 空気比熱 (Kcal/Nm<sup>3</sup>°C)  $C_{pg}$  : ガス比熱 (Kcal/Nm<sup>3</sup>°C)

$T_a$  : 一次空気温度 (°C)  $T_L$  : 炉出口ガス温度 (°C)

$G_{a1}$  : 一次空気流量 (Nm<sup>3</sup>/H)  $G_{a2}$  : 二次空気流量 (Nm<sup>3</sup>/H)

$G_{sp}$  : ガス冷却水流量 (Kg/H)  $G_g$  : ガス流量 (Nm<sup>3</sup>/H)

$G_{BO}$  : 層物質抜き出し量 (kg/h)  $G_{BI}$  : 層物質投入量 (kg/h)

$T_{BI}$  : 層物質温度 (°C)  $T_R$  : ごみ供給温度 (°C)

$G_P$  : プラント水供給量 (kg/h)

動特性解析モデルをコンピュータ上にプログラムし、数値シミュレーションを行なうことにより種々の検討が可能であり、燃焼制御の目的を達成するために必要な状態量と操作量間の因果関係を定量的に把握することができる。

### 3. 3. 2 低CO・低NO<sub>x</sub>運転の静的条件

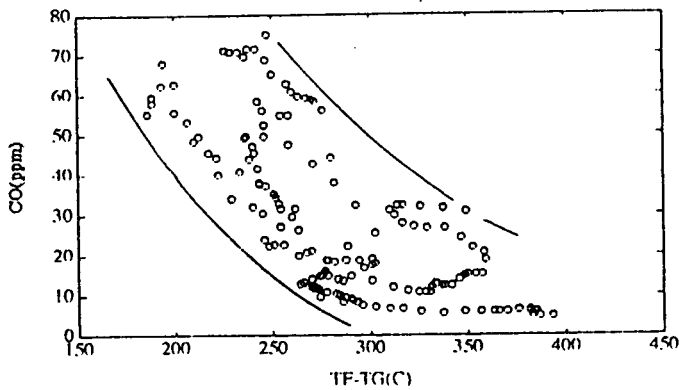


図 3-3-3 CO 濃度と温度差との相関

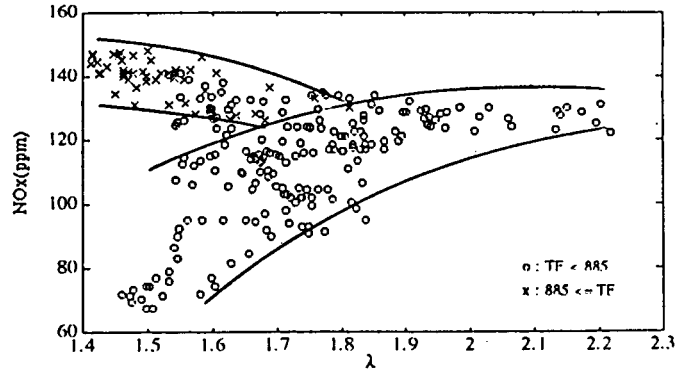


図 3-3-4 NO<sub>x</sub> 濃度と空気比との相関

図 3-3-3、図 3-3-4 は実炉運転データを炉出口ガス温度、排ガス CO 濃度、NO<sub>x</sub> 濃度に注目して種々の運転データとの相関関係を整理した結果である。図 3-3-3 は排ガス CO 濃度 (O<sub>2</sub> 12% 換算) を、炉出口ガス温度 T<sub>f</sub> と層温度 T<sub>g</sub> との差 T<sub>f</sub> - T<sub>g</sub> との間の相関を整理したものである。図 3-3-3 より、T<sub>f</sub> - T<sub>g</sub> を大とするほど CO が減少することがわかる。今、解析モデル上で低 CO 運転を考察すると、層内燃焼率 K を大としてフリーボード部燃焼を抑制し、かつフリーボード部温度を高温に保つことが必要である。すなわち、ごみ供給量と発熱量のばらつきによるフリーボード部での蒸発、分解燃焼への影響 (1 - K) G<sub>R</sub> を K を大とすることにより抑え、過負荷による過小 O<sub>2</sub> 状態を回避することが効果があるものと考えられる。そのためには、層温度を低としてごみ投入口付近での燃焼を抑制して K を大とする必要がある。また、炉出口ガス温度を高として、一旦発生した CO を二次燃焼により CO<sub>2</sub> とすることも低 CO 運転に効果がある。これらにより、T<sub>f</sub> - T<sub>g</sub> を大とするほど CO 低となることが理解できる。一方、NO<sub>x</sub> (炉出口ガス; O<sub>2</sub> 12% 換算) は図 3-3-4 に示すように空気比 λ (≒ 21 / (21 -

O2)) (石谷 6 2) との間に相関関係がある。図 3-3-4 の中で炉出口ガス温度  $T_f < 885^\circ\text{C}$  の範囲では低  $\text{NO}_x$  運転が実現できており、これは供給ごみから生成した還元性ガスが  $\text{NO}_x$  を含むガスと混合反応し、 $\text{NO}_x$  を安定な  $\text{N}_2$  分子に変換する還元二段燃焼 (明石 8 0) の効果であると考えられる。

以上の考察により低  $\text{CO}$ ・低  $\text{NO}_x$  運転を行うための炉出口ガス温度、層温度、空気比の条件が、目標とする  $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_x$  値より決定できる。(横山 9 2)

また、層内燃焼率  $K$  については、本動特性解析モデルをベースに実炉データを入力することにより、オンラインにて演算することが可能であり、静定条件の調整に用いることが可能である。(宮本 9 3)

### 3. 3. 3 ファジィ推論によるごみ量推定

前節で決定した低  $\text{CO}$ ・低  $\text{NO}_x$  条件にて運転を行ってもごみ供給量や発熱量変動の吸収には限界がある。ごみ焼却炉の燃焼制御においては、このごみ供給量・発熱量の把握を如何にするかが常に課題となる。特に、流動床ごみ焼却炉の場合短時間での蒸発、分解燃焼割合が大きいため燃焼後の出力信号を捉えて行う制御は有効でない。そのため、焼却炉投入前の信号に注目してごみ供給特性の予測を行うことを試みた。実炉試験の結果、給じん装置電流が上昇して 3~4 分後に  $\text{CO}$  濃度が上昇するという相関関係が明らかになった。すなわち、図 3-3-5 は給じん装置電流 (3 分遅らせた値) と  $\text{CO}$  濃度の関係であるが、高い相関を示しており、これはごみ供給特性の突発的变化により燃焼用空気が不足したためと考えられ、給じん電流の変化に注目することにより、ごみ供給特性を推論することが可能であることがわかる。

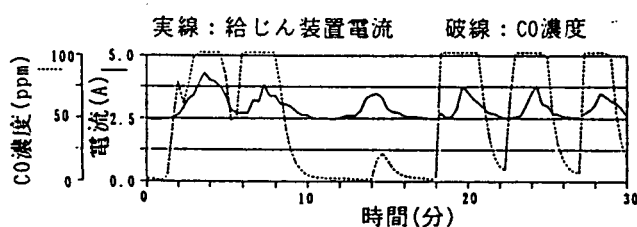


図 3-3-5 給じん装置電流と  $\text{CO}$  濃度との関係

給じん装置の負荷特性は (3-3-17) 式により表される。

$$G_R = \phi \cdot \gamma \cdot \pi (D_s'^2 - D_s''^2) L \cdot I \cdot E \cdot N \cdot e^{-T} \quad (3-3-17)$$

ここで  $\phi$  : 充填率  $\gamma$  : ごみ比重量 (Kg/m<sup>3</sup>)

L : スクリュー長 (m)  $D_s''$  : スクリューケーシング直径 (m)

$D_s'$  : スクリュー軸直径 (m) E : 給じん装置電圧 (v) T : むだ時間 (h)

しかし、 $\phi$ 、 $\gamma$ 、Tなどはごみの性状、流動性が非定常であるため、前件部を給じん装置電流 I (A) と回転数 N (r p h)、後件部をごみ供給量  $G_R$  (Kg/h) としたファジィ推論により推定

する。ここで、ごみ発熱量の変動もごみ供給量と総括して推論する。表 3-3-2 にファジィルール図 3-3-6 にメンバーシップ関数を示す。ファジィ推論は頭切り重心法を用いた。(宮本 91)

表 3-3-2 ファジィルール

N \ I	NS	Z	PS	PB
NS	NS	NS	PS	PB
Z	NS	Z	PS	PS
PS	PS	PS	PB	PB

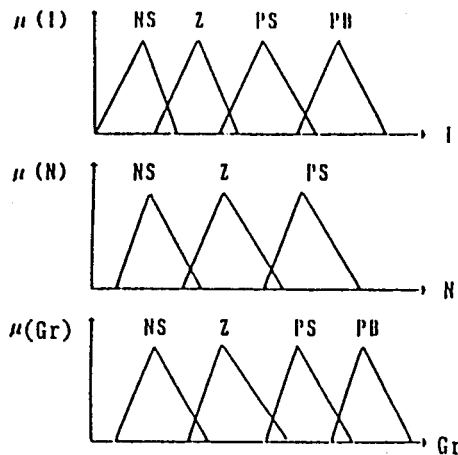


図 3-3-6 メンバーシップ関数

### 3.3.4 動特性解析によるメンバーシップ関数調整

ここに示したファジィルール、メンバーシップ関数の妥当性については、解析モデルでファジィ推論により得られたごみ供給量入力としてシミュレーションを行いシミュレーション結果と実炉試験データとの比較により検討した。図 3-3-7 はその一例であり、シミュレーション結果(破線)と実炉試験データ(実線)とはよく一致しており、解析モデルとごみ供給量のファジィ推論が妥当であることが確認できた。

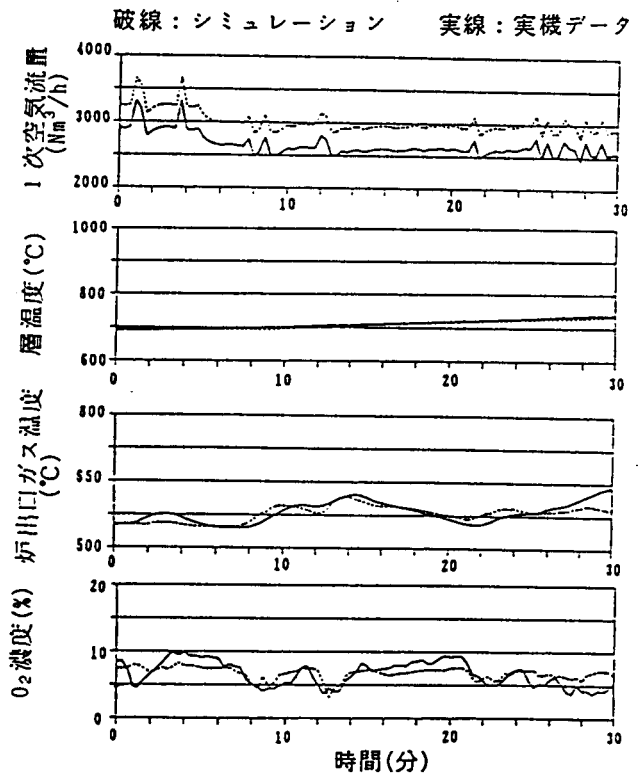


図 3-3-7 シミュレーション結果との比較

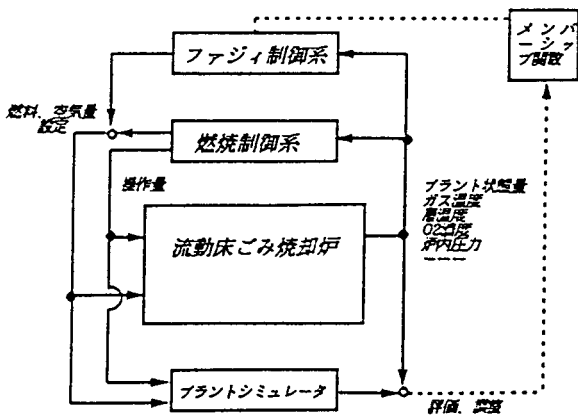


図 3-3-8 ファジィ燃焼制御システム

### 3. 3. 5 実炉での適用結果

ファジィ推論により、投入ごみ供給量を約3分前に予測可能なことから、図3-3-8のように予測結果に妥当な燃料・空気量補償を従来の燃焼制御系に付加し、低CO・低NO<sub>x</sub>運転を可能とするファジィ燃焼制御系を構成した。

ファジィシステムの良さは、熟練運転員の経験やカンなどの知識を最新のコンピュータ制御に吸収、活用できることにあるとされてきた。しかし、コンピュータに入力した知識（メンバーシップ関数やルール）が正しいか否かは実際の運転に適用してみて、その評価を待つことが多く調整にも長時間を要していた。

図3-3-8の構成を用いると、図3-3-9実炉での運転データ解析モデルをプラントシミュレータとして活用できることから、メンバーシップ関数やルール調整のための試行錯誤をシミュレータで吸収し、調整効率を高めることが可能である。(宮本92)

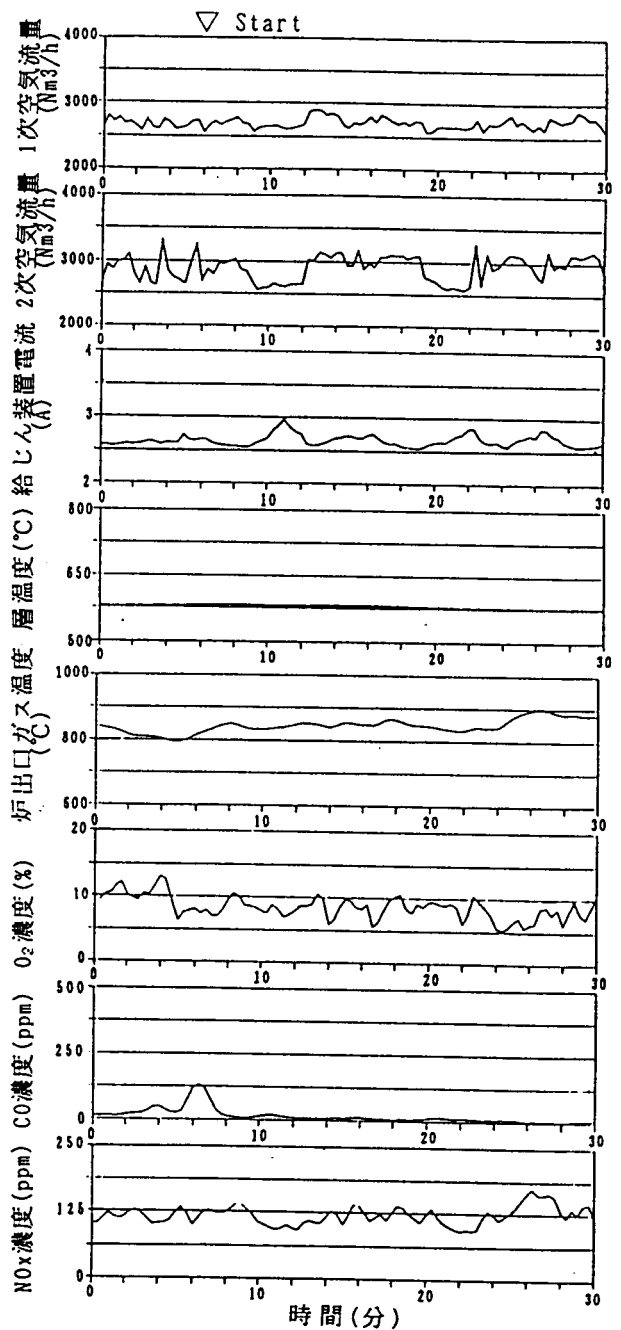


図 3-3-9 実炉での運転データ

図3-3-9はファジィシステムを適用した実炉での運転データの一例である。ファジィシステム投入後、給じん装置電流の変化に見られるように、ごみ供給量の変動を吸収すべく、燃料、空気量を操作して低CO低NOX運転を実現している。

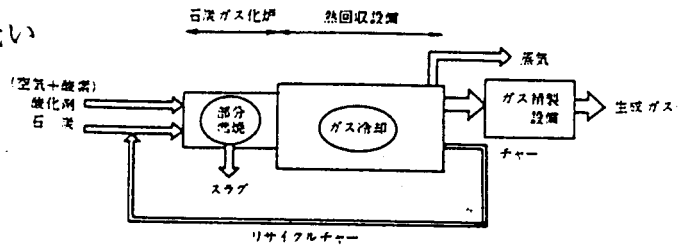
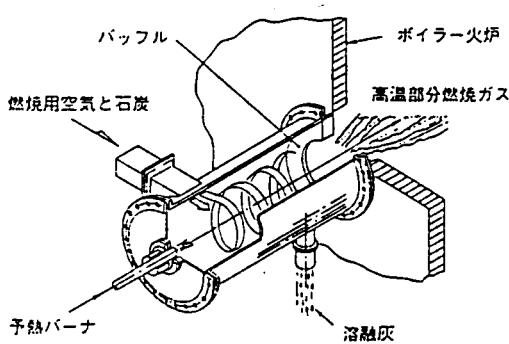
### 3. 4 石炭部分燃焼ガス生成炉におけるファジィ非干渉制御

#### 3. 4. 1 石炭部分燃焼炉の概要 (野添91)

石炭部分燃焼炉は、図3-4-1のように石炭と空気や酸素を円筒炉の接線方向に高速で供給し、燃焼炉内部で高速旋回流を起こさせながら、還元雰囲気下で高温高負荷運転し、石炭中の灰分を溶融除去するものである。

石炭部分燃焼炉をガス生成プラントに適用した場合には、図3-4-2の構成となり、従来のガス化炉に比較すると、

- 1) ガス化(炭素転換)効率が高い
  - 2) 広い炭種に適合できる
  - 3) 運転がしやすい
  - 4) 設備費、運転費などのコストが低い
- などの特長を有している。



型式	予燃焼器付L型石炭部分燃焼炉
炉壁構造	水冷セルフコーティング方式
石炭吹込方式	軸流旋回流込(予燃焼器頂部より)
空気吹込方式	軸流及び予燃焼器炉筒全周からのスリット状噴流吹込
燃焼方式	石炭専焼
燃焼量	1.0 T/H
起動予熱法	ガス+重油

図3-4-1 石炭部分燃焼炉の概要      図3-4-2 ガス生成炉の構成

しかし一方で、

- 1) 溶融灰(スラグ)の安定抜き出し
- 2) 部分燃焼による発生チャーのリサイクルのため酸素比(ここでは、酸素吹き込みを意識して空気比という表現を変える。)が1以下の領域で運転さ

れるにもかかわらず、悪構造問題での対象のモデル化における確定性は低い

3) 制御量と操作量間の相互干渉

4) 起動停止段階で理論最高温度域を迅速に通過する自動運転が必須

などの新規開発プラントとしての課題があり、表3-4-1のように段階を追って開発を進めた。

表3-4-1 石炭部分燃焼炉の開発スケジュール

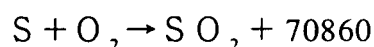
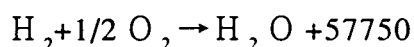
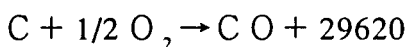
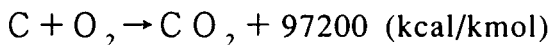
開発項目	S59	S60	S61	S62	S63	H1	H2
1. 技術調査							
2. 基礎研究							
(1)ベンチスケール燃焼試験 (300kg/H)	計画	製作	試験				
(2)要素技術研究			試験				
3.パイロットプラント試験							
(1)ボイラシミュレータ試験 (1.0 T/H)		計画	製作	移付	試験	移設	連続試験
(2)スケールアップ試験 (2.5 T/H)					計画	製作	試験

このように新規開発プラントでは、開発開始から製品化が完成するまでに数年を要し、各段階で得られた設計、運用に関するノウハウを如何に継承していくかが課題である。

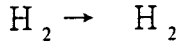
### 3. 4. 2 石炭部分燃焼炉の基本特性 (黒崎, 宮本 90)

石炭部分燃焼炉は、空気量不足の状態での燃焼過程を制御する必要がある、従来のボイラ燃焼制御とは異なる。以下では、不完全燃焼における諸量の挙動を解析し、必要な制御量の抽出、制御量間の干渉関係の検討を行い、石炭部分燃焼炉のマスター制御系統の考え方を確立する。

1kgの石炭が燃焼した時、以下の基本式により燃焼計算が可能である。(谷下67)







1kg 石炭中燃料組成を、以下とする。

$$\text{C} : c \text{ kg} \quad \text{H}_2 : h \text{ kg} \quad \text{S} : s \text{ kg} \quad \text{O}_2 : o \text{ kg} \quad \text{N}_2 : n \text{ kg}$$

1kg スラグ中の灰分を除いた燃料組成は上記と同じとする。

石炭燃焼のため燃焼効率に関与するが、以下の検討のようにリサイクルを行うと、理論上は完全燃焼となる。但し、燃焼ガス、スラグ中の未燃分については簡単のため無視する。この時、生成される燃焼ガス組成は以下となる。

$$V_{\text{CO}_2} = (22.4/12) cX \quad (\text{Nm}^3/\text{kg})$$

$$V_{\text{CO}} = (22.4/12) c (1-X)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = (22.4/2) hY$$

$$V_{\text{H}_2} = (22.4/2) h (1-Y)$$

$$V_{\text{SO}_2} = (22.4/32) s$$

$$V_{\text{N}_2} = (1/O_{2\%} - 1) \lambda O_{\text{min}} + (22.4/28) n$$

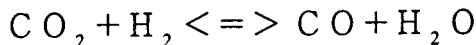
但し、 $\lambda$  : 空気比

$O_{\text{min}}$  : 完全燃焼に必要な酸素量 (Nm<sup>3</sup>/kg)

$$O_{\text{min}} = 22.4 (c/12 + h/4 + s/32 - o/32)$$

$O_{2\%}$  : 酸素比

上記のX,Yを決定するのに、以下の水性ガス反応の平衡を考える必要がある。



但し、平衡状態において、各ガスの容積比の間に以下の関係があり、 $K_{\text{pw}}$  は温度T (K) のみの関数として与えられる。

$$\begin{aligned} K_{\text{pw}} &= (P_{\text{CO}} \cdot P_{\text{H}_2\text{O}}) / (P_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{H}_2}) \\ &= (\gamma_{\text{CO}} \cdot \gamma_{\text{H}_2\text{O}}) / (\gamma_{\text{CO}_2} \cdot \gamma_{\text{H}_2}) \\ &= (1-X) Y / X (1-Y) \\ &= ((1/X) - 1) / ((1/Y) - 1) \end{aligned}$$

$P_{\text{CO}}, P_{\text{H}_2\text{O}}, P_{\text{CO}_2}, P_{\text{H}_2}$  : ガス分圧比

$\gamma_{\text{CO}}, \gamma_{\text{H}_2\text{O}}, \gamma_{\text{CO}_2}, \gamma_{\text{H}_2}$  : ガス容積比

一方、CのcX (kg) が燃焼してCO<sub>2</sub>となるには、cX/12 (kmol) のO<sub>2</sub>が必要である。同様に、CO, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>について考えると、燃焼に必要な酸素量Oは以下となる。

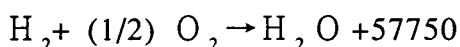
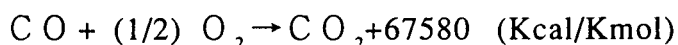
$$O = (22.4/12) \{cX + c (1-X) / 2 + 3hY + (3/8) s - (3/8) o\}$$

酸素比は、Oと $O_{\text{min}}$ の比となるから次式にて求まる。

$$\lambda = \{c(1+X)/2 + 3hY - (3/8)(o-s)\} / \{c + 3h - (3/8)(o-s)\}$$

上式にて、 $\lambda$ 、燃料の成分が決まれば、 $X, Y$ の一次式となるため、 $T$ から決まる  $K_{pw}$ の平衡式との交点から  $X, Y$ が求まり、燃焼ガスの組成が決定できる。

生成ガス発熱量  $H_{ug}$  (Kcal/Nm<sup>3</sup>) を、生成された燃焼ガスに空気を吹き込み、完全燃焼した場合に発生する熱量と考えると、以下の化学反応式によって得られる熱量が該当する。



$$\therefore H_{ug} = \{5632c(1-X) + 28875h(1-Y)\} / V_g$$

また、生成ガス量  $V_g$  (Nm<sup>3</sup>/kg) は、燃焼ガス組成の各項の総和となるから下式で与えられ、 $X, Y$ の影響を受けない。

$$\therefore V_g = (1/O_{2\%} - 1) \lambda O_{min} + (22.4/12)(c + 6h + 3s/8 + 3n/7)$$

石炭部分燃焼炉では、燃焼炉1スルー時の燃焼効率を  $\eta_{coal}$  とし、リサイクルチャーの燃焼効率を  $\eta_{char}$  として、リサイクルを際限なく繰り返せば、1kgの石炭についてリサイクルにての燃焼分 $\Xi$ は、初項  $\eta_{char}(1 - \eta_{coal})$ 、公比  $(1 - \eta_{char})$  の無限等比級数の和となる。

$$\begin{aligned} \Xi &= \eta_{char}(1 - \eta_{coal}) / \{1 - (1 - \eta_{char})\} \\ &= 1 - \eta_{coal} \end{aligned}$$

従って、静的な計算上は、リサイクルを考慮することなく完全燃焼としての取扱いが可能である。但し、燃焼ガス、スラグ中に含まれる未燃分については、上記計算では無視している。

また、全量リサイクルが前提となるため、1kgの石炭についてのリサイクル量  $\Sigma$  (kg) については、初項が  $1 - \eta_{coal}$  で公比  $1 - \eta_{char}$  の無限等比級数の和をリサイクルする必要があるから、以下となる。

$$\begin{aligned} \Sigma &= (1 - \eta_{coal}) / \{1 - (1 - \eta_{char})\} \\ &= (1 - \eta_{coal}) / \eta_{char} \end{aligned}$$

### 3. 4. 3 マスター制御系統の構成

前節までの検討結果は、図3-4-3の操作量、制御量間の関係にまとめることができる。この図より以下のようにマスター制御系統を構成すればよいことがわかる。

- 1) 生成ガス量  $G_g$  を決定するのに石炭供給量  $G_{coal}$  を操作するのが妥当である。
- 2) 生成ガス発熱量  $H_{ug}$  を決定するのに  $O_2$  濃度  $O_{2\%}$  を操作するのが妥当である。酸素比  $\lambda$  ではチャー量  $G_c$  への影響がでる。但し、 $G_g$  に干渉が発生するため、非干渉化の考慮が必要。
- 3) チャーリサイクル量が必要リサイクル比からずれることが外乱要因として最も影響が大きい。その場合、 $G_g$  に  $G_{coal}$  の減少と等価な形で影響する。また、 $\lambda$  がずれることにより、 $H_{ug}$ 、 $G_c$  にも影響がでる。対策はずれをもどすことが第一義だが、二義的には  $G_{coal}$  を補正して補償することも考えられる。
- 4) 石炭成分のバラツキによる、 $H_{ug}$ 、 $G_g$  への同時影響も無視できない。この場合の対策は、 $O_{2\%}$ 、 $\lambda$  の調整により、 $H_{ug}$ 、 $G_g$  を同時ににらみながら、かつ  $G_c$  にも注意して行う必要がある。
- 5) 起動停止時には、 $O_{2\%}$ 、 $\lambda$ 、 $G_{coal}$  のスケジュール操作が必要であり、制御システムにモード切り替えが発生する。

こうした検討結果を制御システムに吸収しやすく、かつ、プラント開発の初段階での制御則の変更が容易なように図3-4-4に示すようにマスター制御システムにファジィ制御を採用することとした。

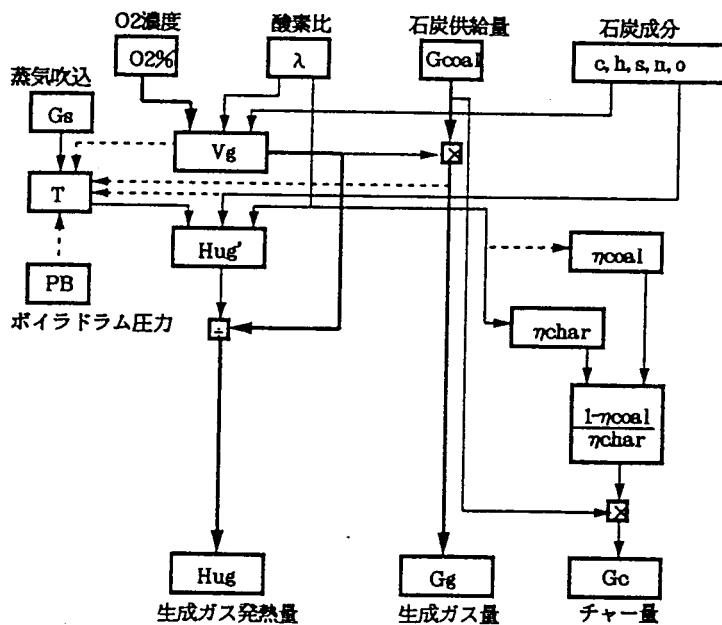


図3-4-3 ガス生成炉主要変数間の関係

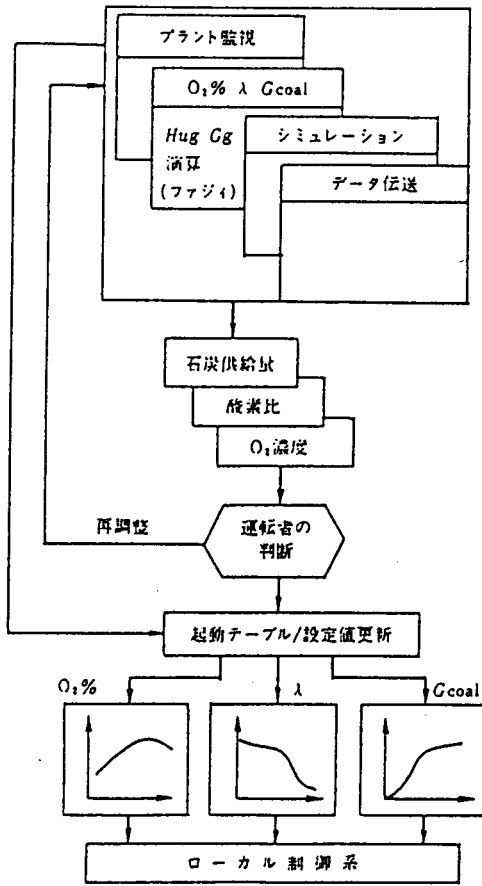


図 3-4-4 マスター制御システムの構成

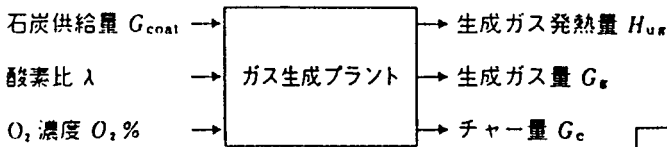
### 3. 4. 4 ファジィ制御ルールの導出

ファジィ制御ルールの導出にあたって 3. 4. 2 の検討を基本として動特性シミュレーションを実施した。図 3-4-5 はその概要であり、制御量、操作量間での相互干渉が強いことがわかる。

こうしたシミュレーション結果をベースに 3. 4. 3 での検討結果を、表 3-4-2 のようにファジィ制御ルールに反映させた。例えば、R4 では、操作量間の相互干渉を除去するを目的に、操作量の  $G_{coal}$  と  $O_{2\%}$  を操作した場合の特性を合成すると、 $H_{ug}$  のみ変化し、それ以外は相殺するので、「 $H_{ug}$  が増加方向ならば  $G_{coal}$  と  $O_{2\%}$  を減少させる。」として導出した。

導出したファジィ制御ルールの検証やメンバーシップ関数の調整には、前出の動特性シミュレーションを用いた。

表 3-4-2 ファジィ制御ルール



	$\Delta H_{ug}$	$\Delta G_g$	$\Delta G_c$
$\Delta G_{coal}$			
$\Delta \lambda$			
$\Delta O_2\%$			

	IF			THEN		
	$\Delta H_{ug}$	$\Delta G_g$	$\Delta G_c$	$\Delta G_{coal}$	$\Delta \lambda$	$\Delta O_2\%$
R1	-	低(高)	低(高)	増(減)	-	-
R2	高(低)	低(高)	高(低)	-	増(減)	-
R3	低(高)	高(低)	高(低)	-	-	増(減)
R4	高(低)	-	-	減(増)	-	減(増)
R5	-	高(低)	-	減(増)	減(増)	減(増)
R6	-	-	高(低)	-	増(減)	増(減)

図 3-4-5 ガス生成炉の動特性

### 3. 4. 5 運用結果

図 3-4-6 はファジィ制御を適用した、ガス発熱量設定値変化の運用結果である。この図から、発生ガス量を設定値に保ちながら、 $O_2$ 濃度、酸素比、

石炭供給量を無理なく操作しながら、発生ガス発熱量を設定値に制御している。これにより、熟練運転員が慎重に手動によって行っていた操作の自動化が可能となった。

また、ファジィ制御を実用化する場合、制御システム内部での演算過程がユーザに分かりやすい形で提供することが重要である。図3-4-7は、そのユーザインタフェース画面の一例であり、図上部は各ファジィ制御ルールの詳細情報、左下部は全ルールの情報を、右下部は操作出力決定に関する詳細情報を出力表示している。

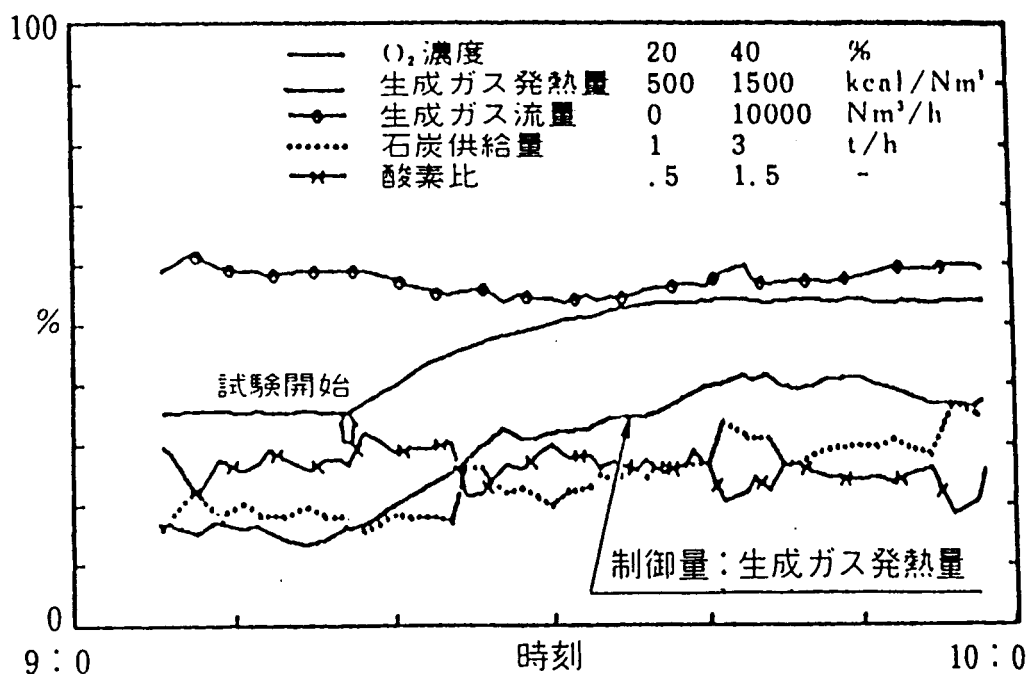


図3-4-6 ファジィ制御の運用結果（生成ガス発熱量設定値変化）

### 3.5 関連研究との比較

ファジィシステムの産業界における応用としては、家電製品を中心として1980年代後半に数多く実用化が報告されてきた。(張 90) これは、センサのマルチ化に対応したものである。1970年代のマイコンの急成長を背景としてマイコンに適したセンサが多数開発され、こうしたセンサ群を複数融合する方法論としてファジィシステムが多用された。

熱プラントを対象としたファジィシステムによるインテリジェント化は、家電製品に比較して適用例の報告は非常に少ない。プラントでは製品寿命の長さや設計計画段階での期間の長さから実用化報告が時をおいて行われるの

と、対象を解析した上で適用を図る慎重さが原因となっていると考えられる。

第3章の後半で述べた石炭部分燃焼炉は21世紀のエネルギー問題を解決することを期待されているプラントであり、こうした新規開発プラントでのシステム制御分野におけるインテリジェントシステム開発の報告はない。

ごみ焼却プラントには、大別してストーカ炉と流動床炉がある。ストーカ炉とは、炉内に設けられた移動床上を床下部から供給される燃焼空気と炉内での輻射により吸熱し、水分蒸発（乾燥）、熱分解によるガス化過程を経て、着火温度に到達後、急激に燃焼を開始し、その後難燃分についてはおき燃焼が行なわれる。（矢木63）こうしたごみの燃焼過程に基づき、数式モデル化を試みた研究（五郎丸89）やストーカ上のごみ層厚さをファジィ推論する試み（大西91）がある。

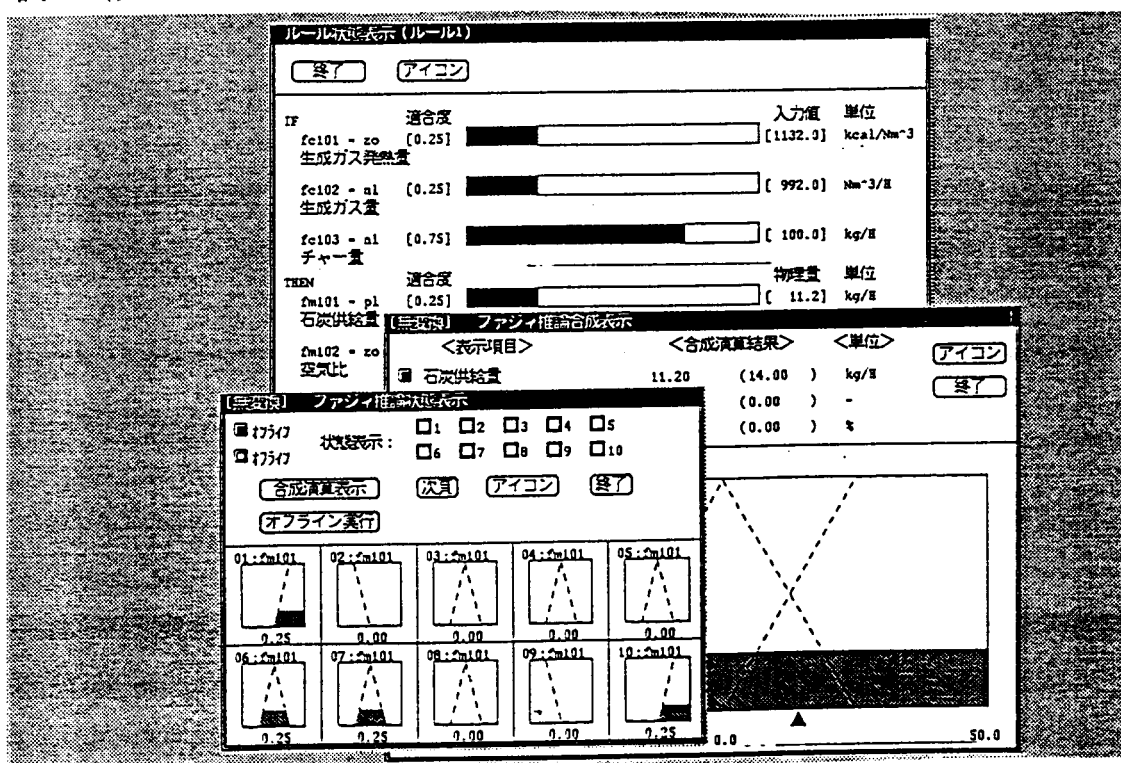


図3-4-7 ユーザインタフェースの例

流動床炉は、予熱空気によって激しく混合・攪拌している加熱砂粒層に投入されたごみが、層内に巻き込まれ、その熱によって短時間に燃焼し、さらにフリーボード部で燃焼を完結するものである。（国井62）流動床炉の優れた特性として、均一燃焼かつ炉内での滞留時間が短いことがあげられ、難燃物処理や起動停止が短時間で可能などの特長を有する。そのため、都市ごみをはじめとして、各種産業廃棄物、汚泥、プラスチック燃焼などの各方面での

採用が進んでいる。一方、層温度を基本とした比較的低い温度で燃焼が進行するため、高温反応を伴う燃焼制御が難しく、ごみ特性の変化に対応した公害抑制技術の開発が課題となっていた。

流動床ごみ焼却炉は移動床を伴わないため、動特性解析や燃焼制御の開発にあたって、ストーカ炉での研究とは異なったアプローチが必要である。本研究では、流動床ごみ焼却炉の数式モデル化による動特性解析を行い、公害抑制のための低CO<sub>2</sub>、低NO<sub>x</sub>運転実現条件の考察を行い、ファジィシステムを用いた燃焼制御によりごみ特性の変化を吸収することを提案し、実炉で実証した。

### 3. 6 結言

第3章では、ごみ焼却炉やガス生成炉などの基礎産業分野における中核をなす熱プラントを対象に悪構造問題の特徴と課題を分析し、悪構造問題を解決するのに有用なファジィシステム構築技術について述べた。

流動床ごみ焼却炉において課題となっている低CO<sub>2</sub>・低NO<sub>x</sub>運転をファジィシステムを用いた予測燃焼制御により実現した。ファジィシステムの制御への適用については、産業界の様々な分野でその成果が報告されているが、制御対象の解析を進めた上で従来のシステム制御技術との融合を図るのが効果大きい。特に、流動床ごみ焼却炉の場合、多入力多出力系を構成しており、燃焼制御を精度良く行おうとすると対象の動特性解析による変数間の関係把握が有効である。本論文では、解析過程で得られたシミュレーションモデルをパラメータ推定やファジィ推論におけるメンバーシップ関数の調整にも用いてその有効性を示した。

石炭部分燃焼炉などの新規開発プラントでは、対象プラントの運転知識が研究開発者、製品開発者、運転技術者、ユーザへと継承され、さらに追加更新されていくことになるが、継承段階におけるシステム制御の役割は重要である。すなわち、研究開発の各段階で蓄積された知識群を制御システムに吸収しやすい知識の構造を準備し、また、その知識を制御システムに入力、更新しやすいユーザインタフェースを整備することが必要である。(黒崎, 宮本 89) その観点から、本研究での熱プラントへのファジィ制御の応用例は、最終ユーザを含めて理解しやすい制御知識表現とユーザインタフェース機能を備えており、かつガス生成プラントに不可欠な自動化、高性能化に効果が大きくであり成果を上げることができた。

## 参考文献

- (明石 80)、野津、南部、黒崎、宮本：ごみ焼却炉の自動燃焼制御とNO<sub>x</sub>抑制運転について、川崎重工技報73号(1980)
- (石谷 62)、赤川：蒸気工学、コロナ社(1962)
- (大西 91) 都市ごみ焼却プラントのファジィ制御、計測自動制御学会論文集Vol. 27、No. 3、326/332、(1991)
- (国井 62) 流動化法、日刊工業新聞社(1962)
- 抑制運転について、川崎重工技報73号(1980)
- (五郎丸 89)、花房、米澤、岩河：揺動火格子式ごみ焼却炉のごみ燃焼過程モデル、計測自動制御学会論文集Vol. 25、No. 1、62/68(1989)
- (谷下 67)、`工業熱力学 基礎編、応用編`、裳華房、(1967)
- (野添 91)、伊藤、平尾、宮本、白羽、藤井、原田、岡崎、`石炭部分燃焼炉(スラッキングコンバスタ)の開発`、川崎重工技報、109号(1991)
- (黒崎 83)、大久保、八木、宮本、ほか：流動床ボイラの動特性と制御、火力原子力発電、34-1(1983)
- (黒崎、宮本 89)、河野、西野、林、原田、庵原、`運転支援エキスパートシステムの開発`、川崎重工技報、104号(1989)
- (黒崎、宮本 90)、鳥居、西野、`ファジィ制御による熱プラントの非干渉制御`、システム制御情報学会研究発表講演会、(1990)
- (小林 85) 知識工学の基礎と応用、計測と制御, Vol.24, No.2 (1985)
- (張 90)、荒木：ファジィ制御の数理的解析と産業応用の可能性について、計測自動制御学会論文集、Vol.26, No.11 (1990)
- (Tsutsumi 89), Y.Kurosaki, Y.Miyamoto, and Y.Kohno : Dynamic Characteristic of a Fluidized Bed Combustion Boiler -- Combustion Rate and Fluctuation in Bed Temperature --, The Tenth International Conference on FLUIDIZED BED COMBUSTION "FBC TECHNOLOGY OF TODAY" (1989)
- (水谷 92) 燃焼工学、森北出版(1992)
- (宮本 91)、西野、林、原田：熱プラントへのファジィ制御の適用、ファジィ学会誌 Vol. 3 No. 2 (1991)



(宮本 92)、林、宮崎、藤山、竹本：流動床ごみ焼却炉の動特性解析とファジィ燃焼制御、第35回自動制御連合講演会(1992)

(Miyamoto 93), M. Hayashi, K. Yokoyama and E. Nanbu: Fuzzy Control and Dynamic Analysis of a Fluidized Bed Incinerator, 6th IAWQ WORKSHOP INSTRUMENTATION, CONTROL AND AUTOMATION OF WATER & WASTEWATER TREATMENT AND TRANSPORTATION SYSTEMS (1993)

(宮本 93)、林、宮崎、藤山、南部、豊嶋：流動床ごみ焼却炉の動特性解析とパラメータ推定、第32回計測自動制御学会学術講演会(1993)

(宮本 96)、黒崎、藤山、南部：流動床ごみ焼却炉の動的解析モデルと燃焼制御、計測自動制御学会論文集 Vol.32, No.2, 215/223 (1996)

(矢木 63)、国井：工業窯炉、共立出版(1963)

(横山 92)、藤山、高田、宮本、下川：流動床炉のCO抑制燃焼技術、機械学会環境工学総合シンポジウム

# 第4章 エキスパートシステムの 熱および物流プラントへの応用

## 4.1 緒言

人工知能AI技術の中で活発に研究開発が進められているエキスパートシステムは、運転支援、診断、計画、スケジューリングなどの分野で実用的システムが数多く報告されており、産業界においても着実に浸透しつつあるといえる。(ICOT 88)

筆者は、上記分野で産業界での製品を対象として各種エキスパートシステムを開発し、実用に供してきている。しかしながら、エキスパートシステムを開発し、長期にわたり運用、保守を行うためには、システムの中核をなすエキスパートシステム構築ツールと知識ベースの開発・維持がもっとも重要な課題である。特に、知識獲得に関しては盛んに研究開発がなされているが、専門家の有する深い知識はもちろん、経験や勘に代表される浅い知識でさえ、自動的に獲得する技術はまだ十分実用化されたとはいえない。このため、知識ベースの開発、更新、維持には、専門家および適用対象をよく理解したシステム技術者の関与が不可欠になっている。

本章では、まずエキスパートシステム実用化における技術上の重要課題である知識ベースの統合化について概観する。さらに、知識獲得における課題を解決するものとして、設計段階で実施する信頼性解析をベースとするデータから「IF～THEN～」形式のルールを生成する手法、および異常状況を蓄積した不具合データベースから「IF～THEN～」形式のルールを生成する手法とその航空機分野での実用化例について述べる。

さらに、故障診断、運転支援、スケジューリングの各分野において熱プラント、物流プラントを対象としたエキスパートシステム例、およびその開発を通じての知識獲得のアプローチについて述べる。

エキスパートシステムの実用化にあたっては、ツールとしてプラント制御に必要な実時間性を備えた汎用エキスパートシステム構築ツールKawasaki Inference System(KIS)を用いた。(付録参照) (阪上 87) (黒崎 87) (黒崎 89)

#### 4. 2 知識ベースの自動生成に関する研究と課題

エキスパートシステムの実用化を押し進めるためには、図4-2-1に示すような課題を克服し、AIシステムとして確立する必要がある。その課題の第一は、知識獲得・維持の自動化である。従来は、対象をよく理解したシステム技術者が知識ベースを作成するか、熟練者が原因結果関係を表形式などで整理していたが、システム規模の拡大、運用期間の長期化により、知識獲得の平易化、自動化および知識の検証方法の確立が不可欠となっている。

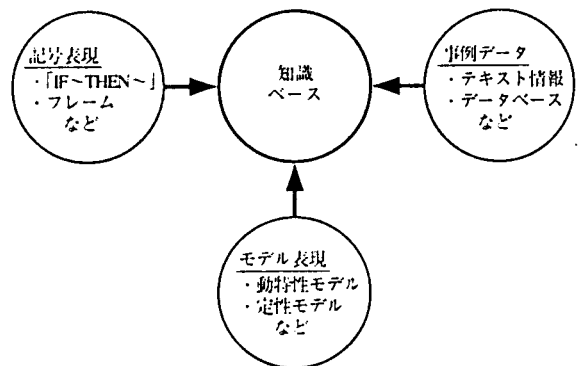
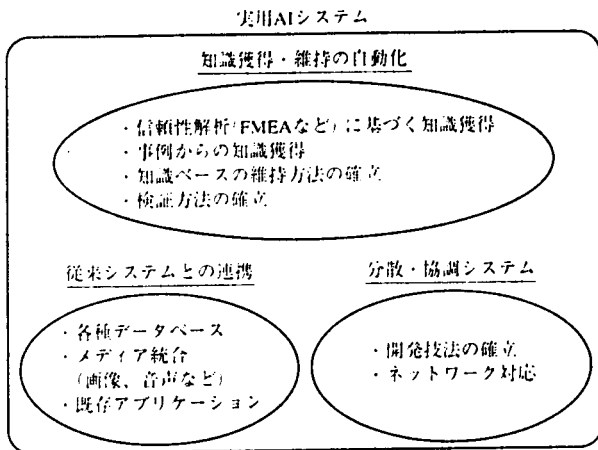


図4-2-1 AIシステム実用化の技術課題

図4-2-2 知識ベースの統合化

第二は従来システムとの連携であり、各部門で保有する各種の大規模データベースとの結合、リアルタイムに入力されるデータ、画像、音声などのメディア統合、さらに既存アプリケーションとの連携が重要である。第三は、分散・協調システムへの対応である。計算機を取り巻くハードウェア、ソフトウェアは、ダウンサイジング、分散化、オープン化が確実に進展しており、AIシステムとしてもこれらへの対応が不可欠である。

これらAIシステムの課題の中で、特に注力すべき研究開発と考えるのは、第一の課題としての知識獲得・維持の自動化である。知識ベースを構成する知識源としては、図4-2-2に示すように記号表現された「IF~THEN~」形式のプロダクションルールやフレーム表現、データベース化された事例や任意フォーマットの記録文書、さらに定量的または定性的に記述されたモデル表現などがある。これらの知識源を知識ベースとして統合化し、知識獲得および知識の検証を可能とすることがAIシステムの実用化に不可欠である。

##### 4. 2. 1 知識獲得のアプローチ

エキスパートシステム開発における知識獲得に関して、図4-2-3に知識ベースの開発フェーズおよびアプローチを示し、表4-2-1に知識獲得手法の比較を示す。

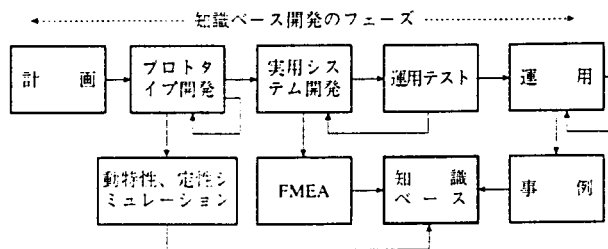


図4-2-3 知識ベース開発のアプローチ

表4-2-1 知識獲得手法の比較

項目	手法	拡張FMEA (FTA自動生成)	事例活用	FTA (手動入力)	原因結果因果 マトリックス	インタビュー	シミュレーション
設計ノウハウの活用		◎	△	○	○	○	◎
現場ノウハウの活用		○ (一度FMEAレベル で作成する必要あり)	◎ (データベース化 されている必要あり)	○	◎	◎	△
ドキュメントの活用		○	○	○	○	△	△
知識ベース の維持 (数10年単位)	小規模システム	◎	◎	◎	◎	◎	○
	大規模システム	◎	◎	△	△	△	△
評価		◎ (設計段階での知識獲得に有効)	◎ (運用段階での知識獲得に有効)	○	○ (小規模なシステムに有効)	○ (小規模なシステムに有効)	○ (重複故障、知識の検証に有効)

【凡例】 ◎：非常に有効、○：有効、△：やや有効

これまでの数多くのエキスパートシステム開発において、実用的な知識獲得のアプローチに関する考えは次の通りである。まず、プロトタイプ開発時には専門家が持っている断片的な知識を表形式などで原因結果の因果関係を整理することにより、または動特性モデル、定性モデルに基づくシミュレーション技術を活用して知識の獲得、洗練、検証を行う。次に、実用システム開発段階では、FMEA(Failure Mode & Effect Analysis)やFTA(Fault Tree Analysis)などの手法（塩見 86）による設計段階での対象システムの信頼性解析結果を活用して知識獲得を行う。さらに、運用段階での異常状態に対しては、上記FMEAを活用した知識の維持および蓄積された事例からの知識獲得を行う。この事例を活用する知識獲得は、見落としや重複原因による異常などに対応するためにも重要である。

これらの知識獲得手法を融合、すなわち設計段階で実施する信頼性解析結果から知識ベースを開発し、運用過程で得られる信頼性解析結果および事例データから知識ベースを追加、更新していくことが重要であり、もっとも実用的である。

なお、以下では「知識獲得」という用語は、信頼性解析や事例データベース

などを入力として、「IF～THEN～」形式のプロダクションルールを出力する、という意味に用いる。

#### 4. 2. 2 拡張FMEAに基づくルールの自動生成

ここでは、設計段階における知識獲得として、設計技術者やシステム技術者の間で一般的に行われているFMEAを出発点とする「IF～THEN～」形式のプロダクションルールを自動生成する手法について述べる。この手法を用いることにより、FMEAを作成できる者であれば一定品質の知識ベースの開発が可能であり、また長期間にわたる知識ベースの維持も可能になる。以下に、そのアルゴリズムの説明および航空機を対象とした適用例を示す。

##### 1) 拡張FMEAとその構造

航空機のような複雑なシステムの設計においては、機器あるいはシステムで考え得る故障モードが発生した場合に、全体のシステムあるいは使用者に与える影響を解析して、設計上必要な対策をとることが要請される。また、航空機は一つの機種が20～30年という長期にわたって運用されるため、その機種が運用される期間全般にわたり、かつシステム全体で一定品質の知識ベースの維持・更新が必要である。

本手法は、信頼性解析に用いるFMEAを基本として図4-2-4に示すような流れでルールを生成しようとするものである。基本となるFMEAの構造を表4-2-2に示し、その要素の意味を次に示す。

- ・ WCODE           ：解析対象のシステム/サブシステム/部品/  
                          子部品の固有の識別コード
- ・ 名 称            ：解析対象の名称
- ・ 不具合モード   ：解析対象品目について考えられる故障状態
- ・ 内部故障原因   ：前述の不具合モードを引き起こす原因が解析対象品目にある場合、その内容と不具合発見方法
- ・ 上位品目への影響：不具合モードが発生したと仮定し、上位および他品目に与える影響

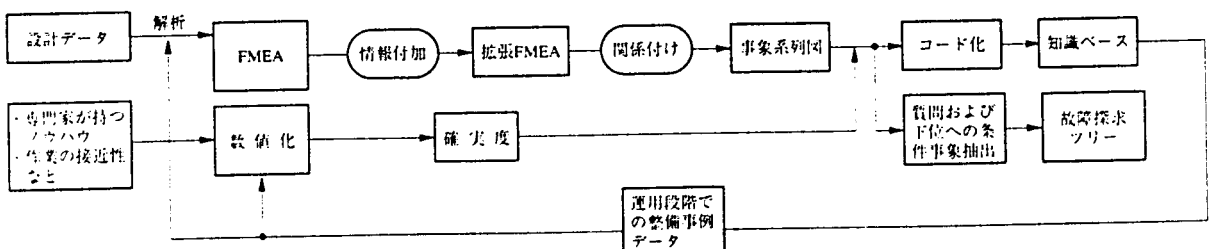


図4-2-4 ルール生成の流れ

表 4 - 2 - 2 FMEAの例

WCODE : 4XAAA 名称 : 酸素供給装置コンセントレータ

内部故障原因				不具合モード			上位品目への影響			
コード	内容	不具合分離作業	レベル	番号	内容	適用条件	WCODE	品目名称	内容	適用条件
01a	機能不良	酸素供給装置コンセントレータ機能点検	2	01	?酸素生成能力が規定値以下	20,000ft以上	4XAA0	コンセントレイトイングシステム	前席酸素レギュレータへ濃縮酸素を供給しない	—
01a	機能不良	酸素供給装置コンセントレータ機能点検	2	02	?モータが回転しない	—	4XAAA	酸素供給装置コンセントレータ	?酸素生成能力が規定値以下	—

本手法におけるFMEAは、システムを構成するサブシステム、サブシステムを構成する部品、部品を構成する子部品といったシステムの機能を階層化した時の各階層間を対象にしたFMEAである。さらに、下位の階層の機能故障(THEN)が上位階層の機能にどのような影響(IF)があるかが示されたもので、これに管理コードおよび運用段階で実際に起こった不具合件数を付加し、FMEAに基づいたデータベースを作成する。ここでは、このデータを拡張FMEAと呼び、拡張FMEAデータベースの構造を表4-2-3に示す。この特徴は、FMEAが設計技術者やシステム技術者が故障モードを解析しその影響を推測するのに対して、拡張FMEAでは、このデータベースに基づいて「IF～THEN～」形式のルールを自動生成するために、原因を逆方向に探索することである。故障を探究するためのルールはIF(現象)、THEN(原因)を記述しているが、このルールを原因から現象を考察するFMEAに基づいて作成することにより、運用段階に入り机上では考えられなかった新たな故障原因が発見されても、FMEAを見直すことによりルールを更新することが可能となる。なお、本手法で用いるFMEAは、故障事象間の関係を階層的に関連付けることを基本としているので、信頼性解析で用いるFMEAと視点が異なっている。

表 4 - 2 - 3 拡張FMEAの例

WCODE : 4XAAA 名称 : 酸素供給装置コンセントレータ

コード	不具合モード	不具合原因						不具合モード条件
		不具合原因コード	原因品目名称	下位不具合モード	整備員不具合分離作業内容	レベル	件数	
4XAAA01	?酸素生成能力が規定値以下	4XAAA01a	酸素供給装置 コンセントレータ	機能不良	コンセントレータ 機能点検	2	3	20,000ft 以上
		4XAAA02	酸素供給装置 コンセントレータ	?モータが回転しない	...	...	...	
4XAAA02	?モータが 回転しない	4YGAB01	前席左サーキット ブレーカパネル	?酸素供給装置に AC.POWRを供給しない (POP. OUTしている)	...	...	...	
		4XAA921	機体配線— 酸素供給装置 コンセントレータ	コンセントレータに AC.PWRを 供給しない	...	...	...	
		4XAAA01a	酸素供給装置 コンセントレータ	機能不良	コンセントレータ 機能点検	2	3	

## 2) ルール生成アルゴリズムと適用例

ここでは、航空機の酸素供給装置を例にとり、FMEAからルールを生成するアルゴリズムについて述べる。

まずはじめに、事象系列データを作成するために、表4-2-2および表4-2-3にそれぞれ示すFMEAおよび拡張FMEAデータから、各事象の最上位に位置する事象とその下位事象で構成されるデータ（以下、データAと呼ぶ）と上下関係を示す一对の事象で構成される結合データを抽出する。次にデータベースのリレーショナル処理における共通項による結合を利用して、データAと結合データよりデータAにつながる下位事象を抽出し、新しいデータ（以下、データBと呼ぶ）を作成する。さらに、このデータBと結合データよりその下位の事象を抽出する処理を、最下位まで反復することにより図4-2-5に示す事象系列図を作成する。ここで、「第4次原因」欄の「4XAAA01\$」と「第3次原因」欄の「4XAAA02\$」、または「4XAAA02\$」と「第2次原因」欄の「4YGAB01\$」といった隣り合わせた1つの組が表4-2-3に示すような1つの拡張FMEAになっており、それらが系統的に結合されて事象系列図が構成されている。この事象系列データのつながりを整理してツリー状にすることにより、図4-2-6に示すFTAが得られる。

第1次原因	第2次原因	第3次原因	第4次原因	第5次原因	第6次原因	第7次原因	結果
4YGAB01a	4YGAB01\$	4XAAA02\$	4XAAA01\$	4XAA001	4XABA01\$	4XA0001	4X0001
4XAA921a	4XAA921	4XAAA02\$	4XAAA01\$	4XAA001	4XABA01\$	4XA0001	4X0001
4XAAA01a	4XAAA02\$	4XAAA01\$	4XAA001	4XABA01\$	4XA0001		4X0001
4XAAA01a	4XAAA01\$	4XAA001	4XABA01\$	4XA0001			4X0001
4XAA911a	4XAA911	4XAA001	4XABA01\$	4XA0001			4X0001
4XABA01a	4XABA01\$	4XA0001					4X0001
4XABA03a	4XABA03	4XA0001					4X0001

図4-2-5 事象系列の例

このFTAの構成単位に基づいて、それぞれの関係を「IF~THEN~」形式に置き換えることでルールが作成される。FTA上の分岐点にあたる事象、すなわちある事象に対し複数の下位事象が存在するものは、その事象の状態によりそれ以降の事象のつながりを左右する重要なポイントである。従って、ルールではこの事象を中間事象とし、またこの事象の状態を問う形式で論理事象を作成する。FTA上の最下位である末端の事象は、最上位の事象から関係する事象をたどりその結果行き着く事象であるので、これを帰結事象とする。

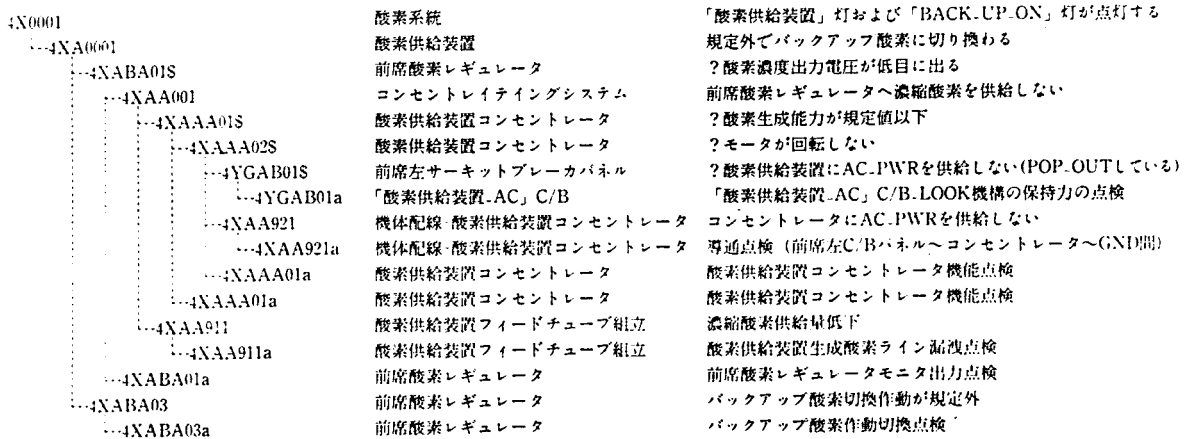


図 4-2-6 FTAの例

各事象の例を表 4-2-4 に示す。ここで、(1)~(3)に示すものがそれぞれ論理事象、中間事象および帰結事象である。表 4-2-3 のような拡張FMEAの各構成要素で、不具合の症状は論理事象に、不具合の伝播に関連する部品は中間事象に、最終的な結論は帰結事象に分類する。

「IF~THEN~」形式のプロダクションルールは、FTAの分岐点にあたる事象に対しその質問にあたる事象を一对としてコード化したものと、それぞれの事象のつながりを示すもの、つまり、先の事象系列データ作成時に用いた上下関係をあらわす結合データを一对としてコード化したものを組み合わせて作成する。また、FTA上の階層間での矛盾を生じないようこのルールに事象の否定を含めることにより対応する。

このような手順で表 4-2-5 に示すルールが作成されるが、最後にこのルールを図 4-2-7 に示す故障探究ツリーとの比較により点検を行う。

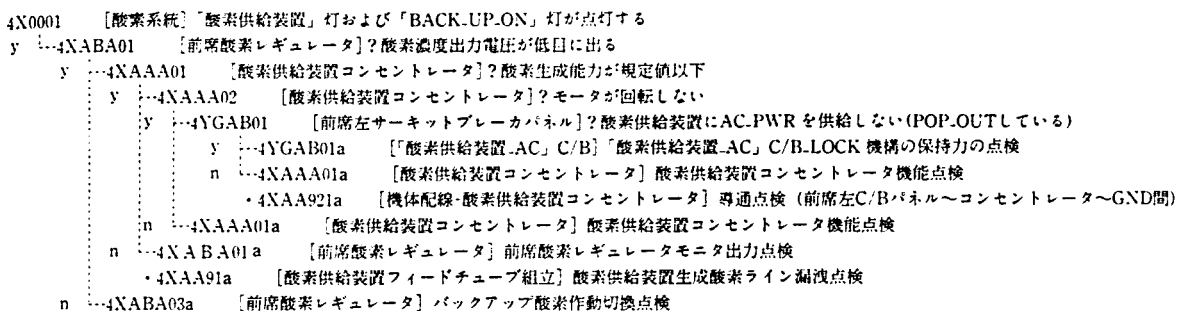


図 4-2-7 故障探求ツリー



表 4-2-4 論理事象、中間事象  
および帰結事象の例

表 4-2-5 知識ベースの例

記号	名称	(1)論理事象	番号	条件部1	条件部2	条件部3	条件部4	結論部	確実度
A001	「酸素供給装置」灯および「BACK UP ON」灯が点灯する								
A101	規定外でバックアップ酸素に切り換わる		001	A101	A001	/	/	M101	1
A102	?酸素濃度出力電圧が低目に出る		002	A102	M101	/	/	M102	1
A103	バックアップ酸素切替作動が規定外		003	A103	M101	/	/	M103	1
A104	前席酸素レギュレータへ濃縮酸素を供給しない		004	A104	M102	/	/	M104	1
A105	?酸素生成能力が規定値以下		005	A105	M104	/	/	M105	1
A106	濃縮酸素供給量低下		006	A106	M104	/	/	M106	1
A107	?モータが回転しない		007	A107	M105	/	/	M107	1
A108	?酸素供給装置にAC PWRを供給しない (POP.OUTしている)		008	A108	M107	/	/	M108	1
A109	コンセントレータにAC PWRを供給しない		009	A109	M107	/	/	M109	1
			010	M102	NA104	/	/	E015	0.950
			011	M103	/	/	/	E016	0.735
			012	M105	NA107	/	/	E014	0.592
			013	M106	/	/	/	E012	0.378
			014	M107	NA108	NA109	/	E014	0.592
			015	M108	/	/	/	E011	0.521
			016	M109	/	/	/	E013	0.450
			017	A001	/	/	/	E001	1
記号	名称	(2)中間事象							
M101	酸素供給装置								
M102	前席酸素レギュレータ								
M103	前席酸素レギュレータ								
M104	コンセントレーティングシステム								
M105	酸素供給装置コンセントレータ								
M106	酸素供給フィードチューブ組立								
M107	酸素供給装置コンセントレータ								
M108	前席左サーキットブレーカパネル								
M109	機体配線 酸素供給装置コンセントレータ								
記号	名称	(3)帰結事象							
E001	「酸素供給装置」灯および「BACK UP ON」灯が点灯する								
E011	「酸素供給装置」AC」C/B LOCK機構の保持力の点検								
E012	酸素供給装置生成酸素ライン漏洩点検								
E013	導通点検 (前席左C/Bパネル～コンセントレータ～GND間)								
E014	酸素供給装置コンセントレータ機能点検								
E015	前席酸素レギュレータモニタ出力点検								
E016	バックアップ酸素作動切替点検								

この故障探究ツリーはFTA上の分岐点にあたる事象の中でその事象が質問として有効なもの、または下位の事象に対する条件となるものを抽出し、それらの事象とその事象の下位の帰結事象によりFTAのようにツリー化したものである。なお、この故障探究ツリーの帰結事象もルールの帰結事象と同様に優先度および重要度に基づいて、それぞれの順位を設定している。

### 3) 有効性と課題

航空機の酸素供給装置を対象としたFMEAデータから「IF～THEN～」形式のプロダクションルール生成について検討を行った。この有効性と課題を以下に示す。

#### (i) 有効性

(a) 長期間にわたる運用と高水準の安全性が要求される航空機は、起こり得る不具合すべてについて技術的サポートが必要であり、整備熟練者の経験データのみに基づく知識獲得では不完全になる場合がある。このため、経験データを生かすとともに論理的に不具合を解析するFMEAによる知識ベースの開発・維持は信頼性があり、FMEAを作成できる技術者であれば知識ベースを

維持できる。

(b) FMEA方式であることは、解析すべき対象は部品/子部品単位からであり、航空機のような複雑なシステムでも知識ベースの開発・維持が比較的容易である。

(ii) 課題

(a) FMEA表現は単一故障での故障解析を基本としているため、重複故障による不具合のルール化には工夫が必要である。

(b) 航空機の整備においてもルール結論部の確実度が重要な鍵であるため、故障率に加えて整備性も考慮した値としているが、より実際の整備作業に適した確実度の計算アルゴリズムの考案が必要である。

#### 4. 2. 3 事例データに基づくルールの自動生成

前節では、設計段階、運用開始初期段階におけるFMEAをベースとする知識獲得について述べた。ここでは、運用開始後に蓄積される事例データから知識獲得を行うものとして、情報量に基づく「IF~THEN~」形式のプロダクションルールの自動生成について述べる。これは、エキスパートシステムの運用過程での新しく発生した事例に対応し、ルール生成のみならずルールの確実度を合理的に決定するために、航空機分野のように事例データが蓄積されている場合に、特に有効である。

##### 1) 情報量に基づくルール生成アルゴリズム

事例データからの知識獲得は、属性によって張られる概念空間をいくつかの部分空間に分割する分類問題とみなすことができる。その分類問題に対する自然な接近法として決定木による学習がある。決定木による分類学習とは、複数の事例により特徴づけられた事例集合があり、その各事例が属するクラスが与えられたとき、各事例をクラス別に分類するような決定木を求めることであり、その代表的手法として、ID3 (Quinlan 84) がある。その手法を以下に示す。

ここでは、簡単化のために事例は正または負のクラスに属するものとする。

C : 事例集合、

A : 属性集合、

$p+$ : 事例集合  $C$  の中で正の事例の比率、  
 $p-$ : 事例集合  $C$  の中で負の事例の比率、  
 $M(C)$ :  $C$  の情報量 (エントロピー)、すなわち

$$M(C) = -(p+) \log_2(p+) - (p-) \log_2(p-) \quad (4-2-1)$$

ここで事例は正・負だけでなく、複数のクラスに属してもよい。事例集合  $C$  をある属性  $a$  の属性値  $a_i$   $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  によって、 $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  に分割すると考える。

$M(c_i)$ : 属性値  $a_i$  をもつ分割集合の情報量

$p(c_i)$ :  $C$  の中で、属性値  $a_i$  をもつ要素の比率

$B(C, a)$ : 対象  $C$  を属性  $a$  の値によって分割したときに  
 得られる情報量の期待値

$$B(C, a) = \sum_i p(c_i) \cdot M(c_i) \quad (4-2-2)$$

分割によって獲得される情報量の期待値  $I(C, a)$  は、次式で表される。

$$I(C, a) = M(C) - B(C, a) \quad (4-2-3)$$

$I(C, a)$  が大きければ大きいほど、属性  $a$  は分類に大きく貢献する属性と評価される。この値が最大となる属性を選択して、事例集合を分割する。

以上が、ID3 による決定木の生成アルゴリズムの手法であり、この決定木を変換することによりルールを生成する。本研究でさらにこのアルゴリズムを改良しており、その内容は後述する。

## 2) 適用例

### (i) 適用対象

航空機での整備、特に異常が認められる場合には、その整備内容が生命の危機に直接的に関与することから、整備状況の情報が全て記録・保存されている。ここでは、事例データが格納された大規模データベースとして、航空機の不具合データベースを対象に「IF~THEN~」形式のプロダクションルールについて知識獲得を行った例について述べる。

### (ii) 対象データの構造

ここで知識獲得の対象とする事例データとは、整備員が航空機の不具合に対する整備を行った直後に記入する不具合状況および整備内容に関するデータベースであり、その構造を表 4-2-6 に示す。

(iii) アルゴリズムの改良

上記のID3アルゴリズムには以下に示す欠点があり、そのまま適用したのでは実用的なルール生成は難しい。このため、次の点を改良したアルゴリズムにより決定木を作成し、これを変換することにより「IF～THEN～」形式のプロダクションルールを生成する。

(a) 情報量に基づく決定木の生成では、属性間の物理的意味合いを考慮していないため、不自然なルールを生成する可能性がある。例えば、ある部品に対して故障状況の情報が付随するものであるが、部品情報が欠落することがある。このため、図4-2-8に示す「拡張属性」の考えを導入することにより、不自然なルールの生成を防止する。

表4-2-6 整備事例データベースの構造

番号	属性名	名称	ルール生成対象属性	支援情報
1	WCODE	作業単位コード名称	○	
2	SHOZOKU	所属部門名称	○	
3	PLANEID	航空機ID番号		
4	DATE	発生日時		
5	FLTHOUR	飛行時間		
6	FNDJIKI	不具合発見時期	○	
7	MMH	整備所要人・時間		○
8	TTR	整備経過時間		○
9	MFCODE1	機体の故障状態	○	
10	MFCODE3	部品の故障状態	○	
11	DCODE1	処置	○	
12	KOSHOU	故障内容	○	

○印は、ルール生成および支援情報として用いる属性を表し、ルールの結論部は処置(DCODE1)としている。

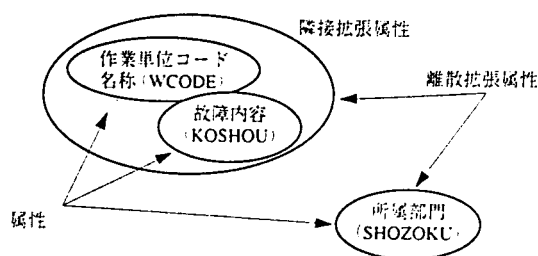


図4-2-8 拡張属性

つまり、2つ以上の属性、例えば「作業単位コード名称」および「故障内容」を拡張属性と定義して決定木を生成し、ルール生成時に分解することにより、ルールに含まれるべき属性の欠落を防止する。さらに、図4-2-8中の「所属部門」のようにルール構成要素に含めるのが望ましいが、情報量計算では欠落する可能性のある属性も拡張属性として定義できるようにする。

(b) 作成された決定木は過剰に細分化されやすいため、そのまま変換したのでは、生成ルールが大規模になる。このため、事例データを酸素系統、操縦系統などの系統ごとに分割し、またシステム、サブシステム、部品、子部品などの機能的観点から階層化構造とする。さらに、事例数の少ないルールについては、ハザード解析結果および専門家の判断からルール生成の有無を決

定する。

(c) 決定木から「IF～THEN～」形式のプロダクションルールへの変換時に、分割されたクラスに属する事例数をルール構成情報に含める。この事例数は表4-2-5に示すルール表現の确实度に相当する。确实度の決定は経験に依存する部分が多いが、この事例数を利用することにより确实度を合理的に決定できる。

(iv) 適用結果

今回対象とした航空機の不具合データベースは4,044件であり、ルール生成での計算所要時間は約10秒である。本アルゴリズムの適用に当たっては、条件部が同一であるが結論部が異なる場合には矛盾と考えられる場合もあるが、対象データが実際の整備データであることから、ルールとして生成させている。

これにより生成された「IF～THEN～」形式のプロダクションルールの診断システムへの適用例を図4-2-9に示す。将来的にはこの不具合データベースは数万件まで蓄積され、各システム単位では数千件になる見込みであるが、ルール生成に要する計算時間は実用上問題とはならない。

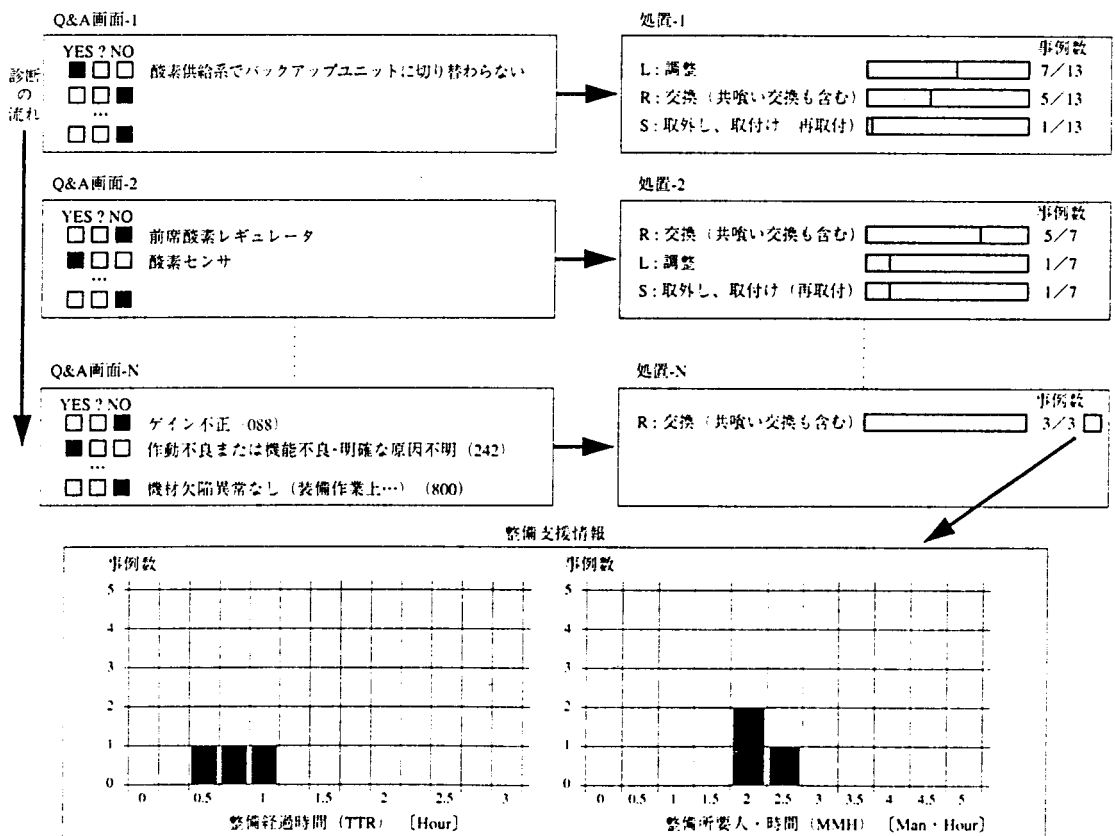


図4-2-9 診断システムへの適用

### 3) 有効性と課題

この手法は、計算量が比較的少ないことから大規模データベースに対しても実用的である。また、ルール情報に事例数を付加することにより、異常発生回数という観点から确实度を合理的に決定することが可能であり、従来専門家の判断に依存せざるを得なかった确实度の決定に関する合理的な指針として活用できることが確認できた。

一方、この手法では事例データの充実が質量ともに重要である。ここで対象とした航空機の整備事例データは、整備が行われるたびに計算機に入力・蓄積されているが、熱プラントや機器・装置などの診断や運転支援では、異常時への対応情報の蓄積は不十分な場合がある。しかし、計算機のハードウェア、ソフトウェア環境の進展は、これら情報の蓄積を自動化させ、ユーザによる入力作業の負担を軽減させるものであり、適用分野を問わず事例データの蓄積は進展するものと考えられる。

## 4. 3 機械装置の故障診断システムの実現 (Miyamoto 92)

産業界における大事故防止、未熟練者の保守・保全作業への支援による生産性向上の要求を背景として、故障診断技術はますます重要視されてきている。故障診断の対象となる機械・装置類は高性能・複雑化してきており、故障診断を行なうには高度な専門知識が必要となってきた。

そのため、故障診断を計算機に行なわせてエキスパートシステムを構築することは、実用面から見て必要性の高い技術となってきた。

本節においては、エキスパートシステムを故障診断に用いる場合について考察し、ガスタービンプラントでの応用例について述べる。

### 4. 3. 1 故障診断システムの要求機能

エキスパートシステムとは、専門家でないとは解決できない難解な問題を専門的知識の無い人でも解決できるようにした計算機プログラムであり、専門家の知識をいれた知識ベースと、その知識に基づいて推論と問題解決を行なう推論部とに分離されており、知識の管理が容易で柔軟性の高いシステムである。(Harmon 85)

故障診断には、監視と診断の機能が重要となる。すなわち、監視機能によ

り対象とする機械・装置類の性能の確認を行ない、正常でないとの判断となれば、診断機能により性能劣化の原因となった故障部品の確定を行ない、その対策を明示することが必要である。

この過程を図4-3-1に示すが、従来の故障診断手法では、全般的に各過程において情報の流れが途切れるため、即時性に欠けたり個人差の大きい診断結果となっていた。これらの問題点を補ない、総合的で柔軟な診断を行なうのに、故障診断エキスパートシステムを活用することが考えられる。

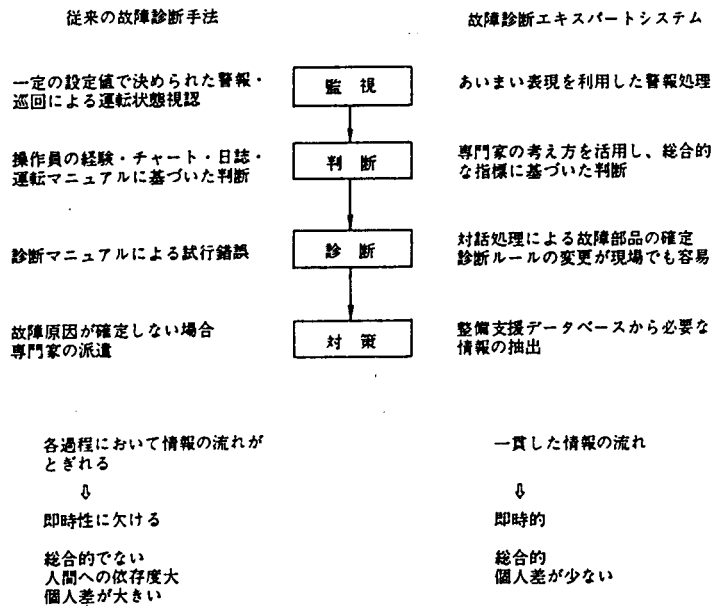


図4-3-1 故障診断における従来手法とエキスパートシステムの比較

実用段階の故障診断エキスパートシステムとしては、以下の仕様が要求される。

(1) 監視機能に対する要求仕様

監視機能では、性能確認により正常か否かの判断を行なうが、そのためには機能レベルにおける設計仕様に対応する各特性値の観測が必要である。すなわち、観測可能な計測信号をリアルタイムに採取して特性値の演算を行ない、総合的な指標に基づいて正常か否かの判断を行なう必要がある。この判断は、診断の対象となる機械・装置類が自己修復機能を持たない場合が多いため、故障予知的な手法を用いるのが望ましい。

(2) 診断機能に対する要求仕様

診断機能では、性能劣化の原因となった故障部品の確定が中心となるが、

多くの場合、観測可能な計測信号は限られており、対象の部分的な知識により故障部品の確定を行なうことが必要となる。

そのため、診断結果の精度を上げようとする、設計段階での特性式や機能系間・部品間の因果関係を総動員し、観測できない状態量については、操作者との対話により補って診断を進めることになる。

この診断過程は、人工知能の応用例としての医療診断エキスパートシステムと手法が類似している。しかし、故障診断と医療診断の二分野では、重要な相違点がある。(出海 86) すなわち、故障診断では医療診断と異なっており、設計段階での特性式により、意図する機能や構造・動作原理が明確化されており、また部品点数が多く、しかもこれらの部品は新技術の導入により頻繁に変化する。

これらの相違点を踏まえて、診断機能に対する要求仕様としては以下となる。

- ①設計段階での特性式や、機能系間・部品間の因果関係を積極的に活用して部分的な知識から故障部品の確定が行なえるエキスパートシステムとする。また、因果関係をなるべく機能レベルでまとめることにより、部品点数の増加に対して簡明なシステム構成をとるものとする。
- ②因果関係の表現は、操作員に容易に理解でき、かつ部品の多様化に対処可能なように修正・追加・削除が容易なものとする。この点は、特に従来の故障診断手法に対するエキスパートシステムの特長である。
- ③エキスパートシステムを実現するには、コンピュータの活用が前提となるが、故障診断を最も必要とするのは、機械・装置類が稼働している現場であり、実用化を考えた場合、データ通信網の整備・計算機の大容量・高速・小型化を背景として考慮した上で計算機システムを構成する必要がある。
- ④診断過程において、操作者と計算機との対話が重要な位置を占める。したがって、ユーザインタフェース機能が充実しており、操作者の入力容易であり、診断経過の説明や整備支援のための表示が明解なものでなければならない。また、因果関係を構築していく段階での支援環境も重要である。

以上の要求仕様を満足する、故障診断エキスパートシステムの機能フローを図4-3-2にまとめた。



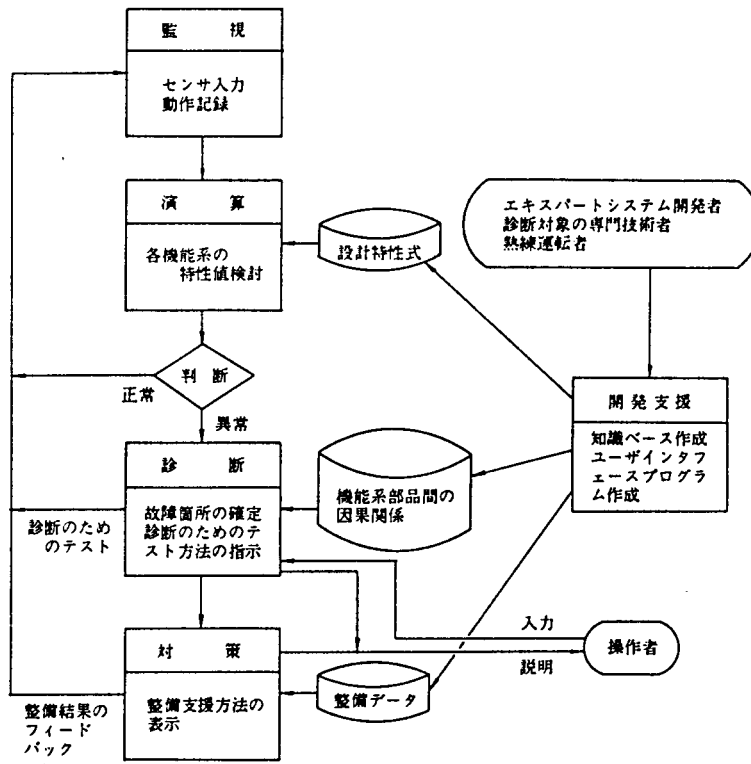


図4-3-2 故障診断エキスパートシステムの機能フロー

#### 4. 3. 2 ガスタービンプラントへの応用 (黒崎 90)

ガスタービン専門技術者の設計段階における考え方や、熟練運転者の運転経験における因果関係などの知識を活用できるようにした故障診断エキスパートシステムは、迅速で的確な故障診断を専門技術者や熟練運転者以外にも可能とするため、実用的な意義が大きい。(Stambler 86)

故障診断に用いる知識ベースは、K I Sの開発支援機能を用いて、ガスタービン専門技術者自身が作成した。

##### 1) 監視機能による故障判断

エキスパートシステムに、より精度の高い診断を行なわせるには、原因とその徴候の形に整理した表面的な因果関係のみでは限界があり、より深い知識の活用が必要である。

一般に、機械・装置類は本来「機能」を目的に作られたものであり、機能が満足されないことが一番重大な故障である。機能は設計段階において、機能に関する現象の数式の形として表現されている。したがって、設計段階における数式群を、より深い知識として故障診断に活用すれば、より精度の高

い診断が可能となる。

例えば、ガスタービンの高・低圧タービンの回転数  $N_H$ 、 $N_L$  の間には、図 4-3-3 のように線形に近い関係がある。この比例定数  $\gamma$  について、SPRT法を適用し、総合的にタービン部が正常か否かの判断を行なえる。

SPRT法 (Sequential Probability Ratio Test) (三浦 81) (Chieu 76) は、機械、装置類を常時監視して、正常か否かの判断を行なう一手法であり、図 4-3-4 のように演算アルゴリズムが漸化式の形になるためセンサベース・リアルタイム処理に適しており、観測値から演算して求めた特性値の故障判断を統計的に行なうことができる。

図 4-3-5 は、 $\gamma$  に関する正常判定処理用の関数の時間的推移を示しており、模擬的に回転数センサ部が正常でなくなった例である。

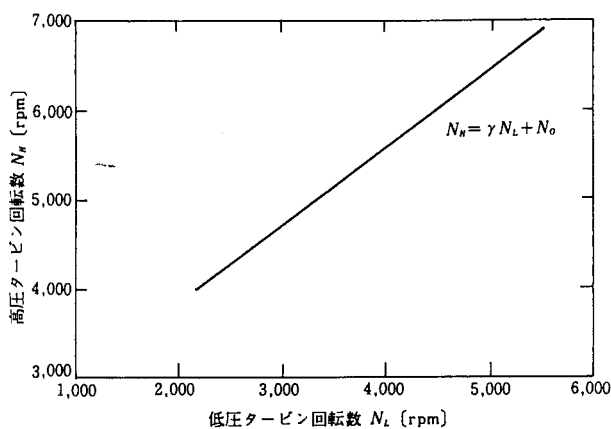


図 4-3-3 高低圧タービンの関係

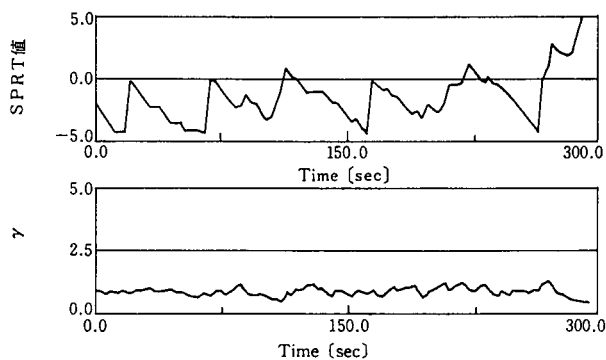


図 4-3-5 SPRT法の適用

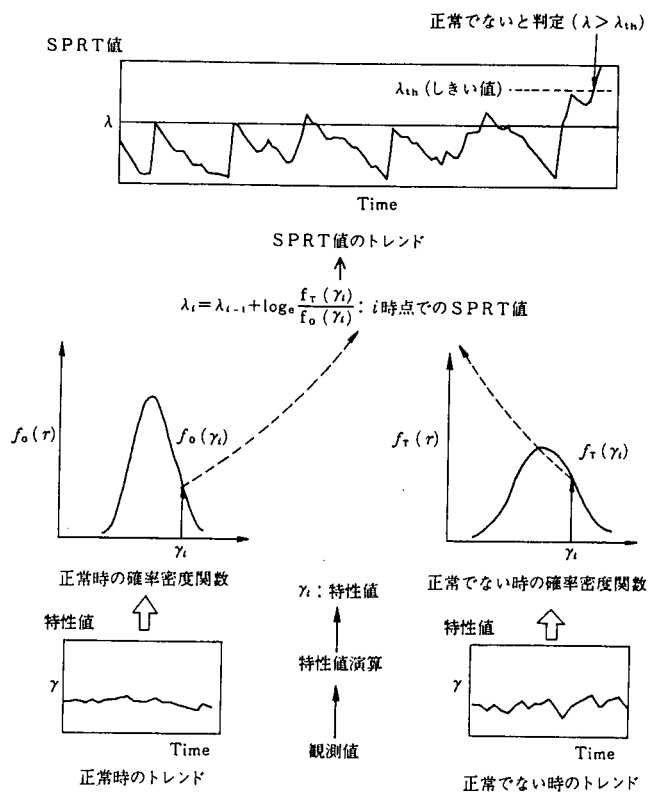
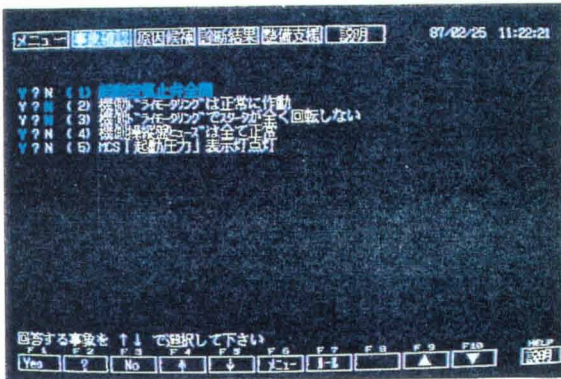


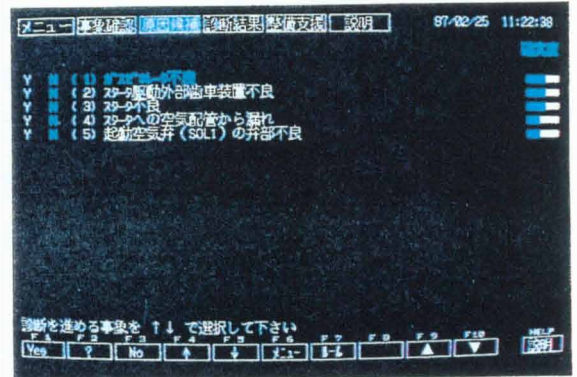
図 4-3-4 SPRT法

## 2) 診断例とシステムの評価

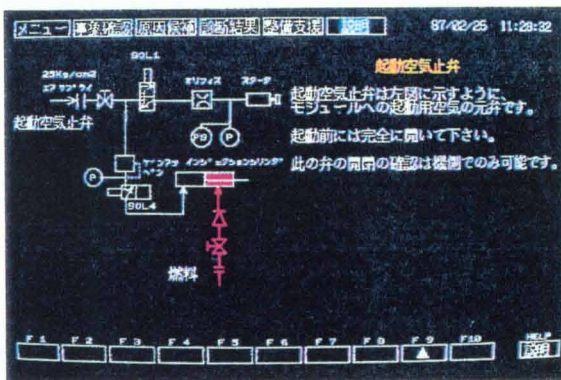
図4-3-6に、起動時における燃料系統の故障診断例を示す。図4-3-6(a)は質問事象の対話画面例であり、図4-3-6(b)は対話における説明機能の表示画面である。診断過程において、対話処理の再実行機能を備えていることから、入力誤りや、模擬的な対話による原因探索にも対



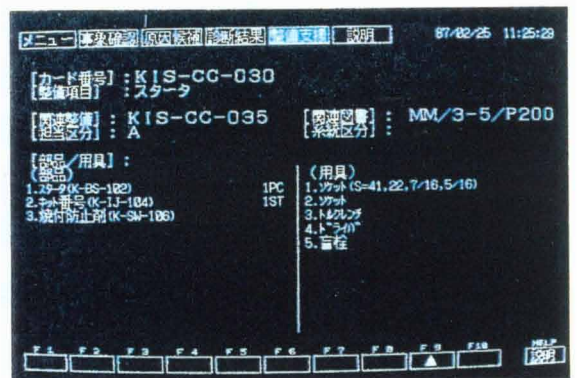
(a) 質問事象の対話例：優先度1



(b) 原因候補選択の対話例



(c) 説明機能の例



(d) 整備支援機能の例

図4-3-6 エキスパートシステムによる診断例  
 応が可能であり、使いやすいシステムとなっている。  
 また、従来、燃料系統のように様々な要因が複雑に関係しあっている系統での故障診断では、数種のマニュアル類や熟練運転者の経験・運転日誌・記録などを検討して総合的に判断していたが、故障診断エキスパートシステムを用いると、操作者の個人差なしに迅速に行なうことができる。

#### 4. 4 プラントの運転支援システムの実現

産業界における事故防止、未熟練者の運転・操作への支援による生産性向上の要求を背景として、運転支援技術はますます重要視されてきている。運転支援の対象となる機械・装置類は、高性能化・複雑化してきており、運転支援を行なうには、高度な専門知識が必要となってきた。そのため、運転支援を計算機に行なわせてエキスパートシステムを構築することは、実用面から必要性の高い技術となってきた。

また、高機能・高性能なエンジニアリング・ワークステーションの普及により、運転支援としての機能を実現するのに必要な計算機環境を容易に整えることも、運転支援エキスパートシステムの実用化要求の背景として大きいものと考えられる。

本研究においては、実用段階での運転支援エキスパートシステムの開発を前提として、まず運転支援の基本的事項について考察し、運転支援エキスパートシステムを中心課題を明らかとし、熱プラントを対象とした運転支援エキスパートシステムの開発に「K I S」を適用した例（福山 90）（川重 92）について述べる。

##### 4. 4. 1 運転支援の考え方

起動・停止などの非定常運転を含む運転時においては、熟練運転員が運転操作を行なっている時の活動状態を考察すると、次のようにモデル化することができる。

- ① 常に対象となる機械・装置の主要状態を監視し、異常がないかまたは定常運転状態が確保されているか否かを現在の状態までのデータから予測を含めて判断する。
- ② 規定の運転パターンまたは定常運転の確保が困難ということになれば、主要状態以外の詳細データの採取を行ない、状態が遷移した原因の追求、復帰のための操作方法の選択を、過去における類似パターンとの照合も行いながら評価を行なって決定する。
- ③ ②で決定した操作方法を実行する前に、予備試験的にその操作幅を安全側に短縮した形で試行してみて、決定した操作方法の実行について確信をえる。

④ 操作方法を実行し、長時間監視を含めて運転状態のリカバリーの確認の程度を予測結果との比較を行なって評価し、記憶に収める。

これらの情報処理機能をコンピュータ上で実現しようとする、図4-4-1のように、知識ベースと推論部を中心として、データ処理、通信、シミュレーション、評価演算、制御アルゴリズムなどの機能を分散協調させて並列的に行なえるようにし、かつ、コンピュータに不慣れな対象プラントの運転員や設計技術者でも取扱いが容易なように、マンマシン機能を充実させることが必要となる。

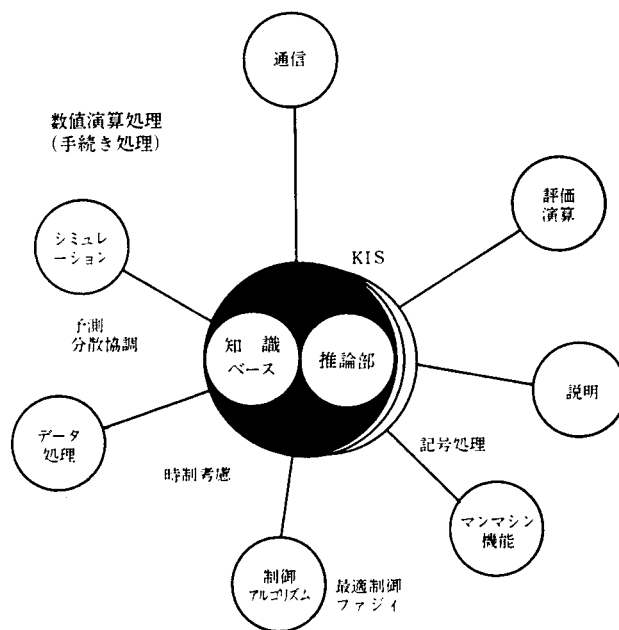


図4-4-1 運転支援エキスパートシステムの概念

#### 4.4.2 運転支援の中心課題 (国藤 88)

図4-4-1に示す各機能の中で、知識ベースの開発とマンマシン機能の充実は既存の情報処理システムとは開発過程やアプローチが異なる。知識ベースの開発においては、図4-4-2に示すように対象の同定・概念化・定式化・実現・テストの繰り返しとなるが、対象となる機械・装置ごとにアプローチ方法が異なる。特性が確定的な良構造対象では、数式モデルによる数値演算処理にて、また特性が確定的で無い悪構造対象では、定性モデルによる記号処理にて対象の同定・概念化・定式化を行なう必要がある。このように、対象のモデルに基づいて知識ベースの開発を行なっていくことは、開

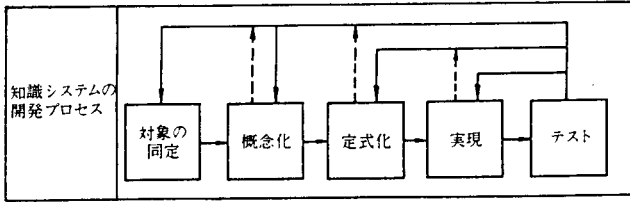


図4-4-2 知識ベースの開発プロセス

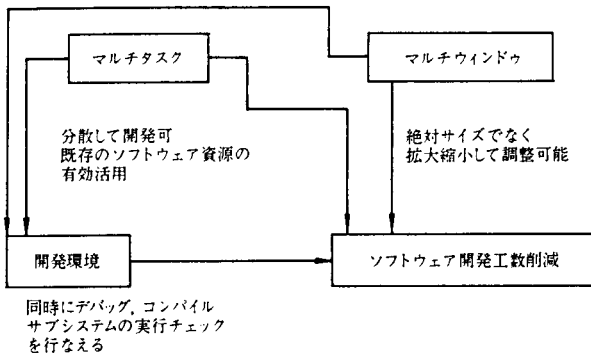


図4-4-4 マンマシン機能の開発

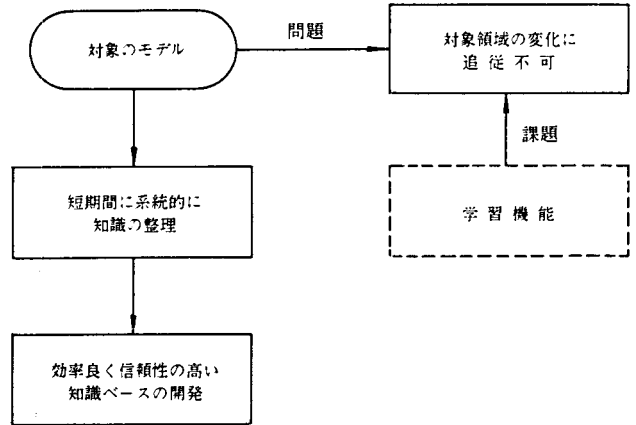


図4-4-3 モデルに基づく知識獲得

発過程を系統だてて進めることができるため、図4-4-3に示すように、短期間に系統的に知識の整理を行なうことができる。その結果、効率よく信頼性の高い知識ベースを構築することが可能となる。ただし、対象領域の変化に追従することはできないため、学習機能による補完が今後の課題となる。

また、マンマシン機能の充実の面では、計算機に不慣れな運転員でも運転支援の各機能を使いこなすことができ、計算機を専門としない機械・装置の設計者でも任意に説明機能の追加などが行なえるように、図4-4-4に示すように機能の標準化を行なって柔軟に種々の要求仕様に対応できるようにする必要がある。

#### 4. 4. 3 熱プラントを対象としたK I Sの応用 (Miyamoto 91)

##### (1) 新技術、新分野への運転支援エキスパートシステムの適用

第3章で述べたガス生成プラントは、石炭を部分燃焼させてガス化を図る熱プラントであり、従来のガス化炉に比べて運転のしやすさや設備費、運転費などのコストが低いことが特長である。このような、新技術、新分野における対象プラントの運転知識は、図4-4-5のように研究開発者、製品開

発者、運転技術者、ユーザへと継承され、さらに追加更新されていくことになるが、継承段階における運転支援エキスパートシステムの役割は重要である。すなわち、研究開発の各段階で蓄積された知識群を、最終ユーザへ理解のしやすいマンマシンインタフェースを介して継承することにより新技術、新分野でのプラント建設の目的を効率良く達成することが可能となる。

こうした熱プラントの運転支援システムに必要な機能を表4-4-1に示す。

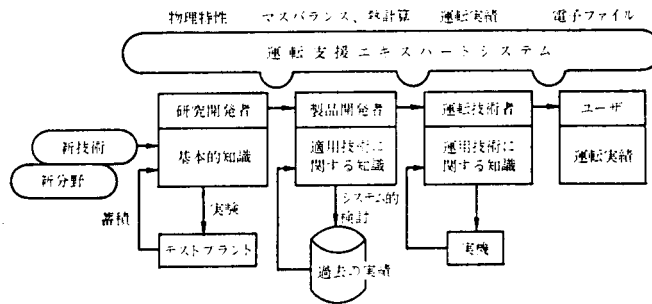


図4-4-5 運転知識の流れと運転支援エキスパートシステムの役割

## (2) 知識獲得の諸段階と運転支援機能

### ① 研究開発段階

テストプラントの開発において、熱精算、化学平衡などの特性を考慮して、設計基本式を作成し、計算機上にてパラメータサーチを行なった。さらに、テストプラントにおいて繰り返し行なった実験結果との照合により、設計基本式の見直し、パラメータ調整を行ない設計基本式をより確かなものとした。

### ② 製品開発段階

テストプラントからのスケールアップや、実用化に必要な補機類などを考慮して、設計基本式の拡張を行ないK I Sの連続系シミュレーション機能により数式モデルを開発した。図4-4-6は数式モデルから計算により求めた、蒸気および生成ガスの回収割合と酸素比との関係の一例である。

### ③ 試運転段階

試運転段階では、プラントの起動停止を頻繁に行なってプラント運転方法の確立を図る必要がある。その際に、製品開発段階で開発した、数式モデル

表 4-4-1 熱プラントの運転支援  
としての必要な機能

(1) プラントの状態監視  
データの微小変化を運転員が迅速・的確に把握するために、従来の警報以外に変化率・分散の大きさ、通常運用域からの逸脱などをプレアラームさせる必要がある。  
また、物質収支・熱収支などに基づく静的・動的な状態およびその予測値を用いたプラント状態の監視機能が必要である。

(2) 起動・停止操作  
① 起動・停止操作のスケジューリング  
プラント制御装置内の起動・停止スケジュールは事前に決められており、対象プラントの状態や起動パターンが変化した場合およびトラブルが発生した場合などの条件変更時には柔軟に対応できない。このような場合に柔軟に対応できるスケジュール作成機能が必要である。  
② 起動・停止操作の状態監視  
起動・停止操作は最近ではほとんど自動化されているために、ある一つの異常事象が全体スケジュールに与える影響が大きくなり、また運転員の異常状態への対応能力が低下する傾向にある。このため、起動・停止操作時の進行・渋滞状態の監視機能が必要である。  
③ 起動・停止時の操作支援  
起動・停止操作の自動化の拡大により、自動化シーケンスや関連ソフトウェアが非常に複雑になっており、それらに異常が発生した場合には、その原因究明にはかなりの専門技術を持った人材と時間を要するようになってきている。このため、異常時にアドバイスする機能が必要である。

(3) 定常運転時の操作支援  
定常運転時の場合も起動・停止操作時と同じく異常時には必要な情報を適切に提示する機能が必要である。  
また、現在の状態からある操作をした場合にどう変化するか、つまりプラント状態の予測機能が必要である。

(4) データの管理  
① 運転員がプラントを運転していく上で必要なデータは、帳票の形式では出力されているが、そのデータの加工を考慮したシステムとはなっていない。運転員自らデータを管理し、プラント効率の最適化・各種特性の把握・機器の状態変化などを把握するために、容易にデータを加工できるシステムが必要である。  
② プラント運転データの保存は、その膨大さのために保存の対象とする点数が少ないか保存の期間が短い、プラントを総合的に管理し、性能向上のために設計段階にフィードバックさせるためには運転データは必須であり、そのデータの解析が容易な形式でのデータの保存が必要である。

(5) マンマシン機能の向上  
現在広く使用されている制御システムは、ユーザーの意見を取り入れることによりマンマシン機能が改善されてきているが、音声による通知システム・大型CRTの利用・必要な運転情報の適切な提供など機能向上が必要である。

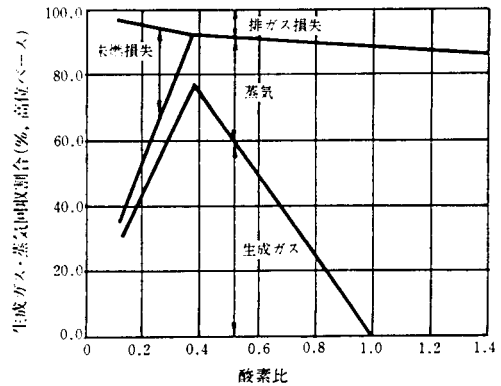


図 4-4-6 酸素比による蒸気  
および生成ガスの回収割合

が起動停止スケジュールを決定するのに有効である。例えば、ガス生成プラントでは、図 4-4-6 のように、プラントの起動停止時に酸素比 1 を通過する必要がある。炉の熱負荷が最大となる領域が存在する。その領域での石炭供給量や O<sub>2</sub> 濃度を調整することによって、炉壁への影響を少なくすることができる。また、リサイクルチャーの分布予測を行なって、チャーホッパの円滑な運用を可能とすることができる。

④ 運用段階

運用段階で得られた、故障事例や炭種による運転操作に関する知識は I F ~ T H E N ~ 形式の因果関係として表わされることが多いため、「K I S」のプロダクションルールの推論機能を活用して知識ベースの拡充を図っている。



### (3) 適用結果

#### ① 適用効果

K I Sを応用した運転支援エキスパートシステムは多くの機能を備えているが、一つには、研究開発者から製品開発者、運転技術者まで計算機に不馴れな技術者でも容易に操作が可能なマンマシン性の良さがあげられる。すなわち、基本的な機能については、その起動・終了処理から各機能のサブメニュー実行に至るまで、マウスによるメニュー選択のみで実行ができるようになっている。CRT出力の一例を図4-4-7に示す。

これらの、マンマシン性の良さと遠隔地からのモニタ機能により広い範囲で使用され、円滑な起動停止、早期での異常発見に役だっている。

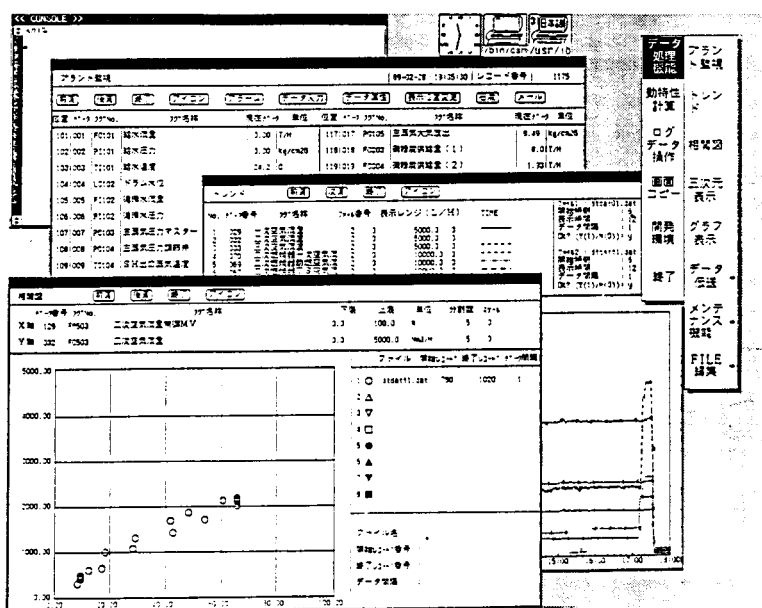


図4-4-7 運転支援エキスパートシステムのマンマシン

#### ② 適用知見

ガス生成炉におけるガス化特性は、石炭の炭種、性状により大きく影響を受ける。そのため、生成ガス発熱量、生成ガス量、生成ガス・蒸気回収割合、チャー量を目的の範囲内にて運転しようとするると石炭供給量、酸素比、O<sub>2</sub>濃度を変数間の干渉を考慮しつつ操作する必要がある。

現状の運転支援エキスパートシステムでは、これらの操作支援をシミュレーション結果やトレンド、過去の操作事例などを運転者に示して行なって

いる。

しかし、これらの外乱により大きく運転状況が変化する対象の制御では第3章で述べたファジィ制御が有効と思われる。すなわち、あいまいさを持ったベテラン運転員の経験やノウハウをルール形式に表現し操作量を決定するアルゴリズムを活用する。ファジィ制御での操作量の数値化を行なう過程については、妥当性の評価は難しいが、制御量のフィードバックループが構成されているため、結果的には人間が行なっているような複雑な制御動作をまねることができる。

#### 4. 5 物流搬送の最適スケジューリングシステムの実現（宮本 95）

組合せ離散最適化問題は、生産分野において多様な場面で直面する課題である。例えば、工場の生産計画、各工程のスケジューリング、施設配置、搬送問題などがある。このような問題は定式化において人間のような個人差、機械プラント類における燃焼や化学反応のようなあいまいさがないので、

(I) 対象を論理的に表現できる。

(II) 制約条件が明確である。

という利点を持つ。しかしながら、その最適解を厳密に求めようとする、組合せ爆発が生じて現実的な時間で解くことはできない。したがって組合せ離散最適化問題を扱うシステム・手法は、生産分野での実用化の条件として要求される時間内に要求を満足する解（近似解）を得る必要がある。

本研究では、制約充足問題を解決する知識処理手法を適用し、生産分野における工場内物流搬送システム特有の現象である干渉を伴う組合せ離散最適化問題の近似解を求める手法を提案する。さらに、搬送車間のブロッキングやデッドロックといった干渉を伴う閉ループ台車搬送システムを対象に離散値シミュレーションを実施しその有効性を示す。

##### 4. 5. 1 物流搬送問題における最適化

###### 1) 流通分野における物流搬送問題における最適化

物流搬送の基本的な目的は、ワークや部品、工具などを搬送ネットワーク上のある地点（From点）から他の地点（To点）へ搬送する搬送要求に対し、搬送要求を利用可能な搬送車に割り当て（割り当て問題）、走行時間や搬送

コストによる目的関数によって最適な経路と走行スケジュールを決定する（運行経路決定問題）ことである。

一般的な割り当て問題は、0-1整数計画問題として表すことができる。走行時間を目的関数としてn搬送要求をn搬送車に割り当てる場合、 $C_{ij}$ を搬送要求iを搬送車jに割り当てたときの走行時間、 $X_{ij}$ を0-1変数とすると式(4-5-1)のように定式化ができる。

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij} \rightarrow \min \quad (4-5-1)$$

$$\text{subject to } \sum_{i=1}^n X_{ij} = 1, j=1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = 1, i=1, 2, \dots, n$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\} \quad i, j=1, 2, \dots, n$$

整数計画問題の近似解法アルゴリズム、とくに商用パッケージとして流通分野などで実用に供されているものの多くは、緩和問題として線形計画(LP)問題を用いた分枝限定法を用いている。(茨木 93)ここで式(4-5-1)の $C_{ij}$ は実数の係数であり、式(4-5-1)を解く前に既知としている。すなわち、n搬送要求m搬送車の場合、 $C_{ij}$ は搬送要求iのFrom点、To点、搬送車jの現在位置、速度、加速度から決定できると仮定しているので、 $C_{ij}$ のサイズは $n \times m$ であり、従来の整数計画的解法により高速に近似最適解が得られる。

また一般的な流通分野における物流搬送問題では、搬送車の目的地は予め決定されている。よって運行経路決定問題とは、現在値からFrom点を経由し、To点(目的地)までの経路が複数ある場合、何らかの目的関数で最適な経路を決定することをいう場合が多い。

## 2) 生産分野における物流搬送問題における最適化

生産分野における組合せ離散最適化問題は、フレキシブルな生産システムを用いたFA化が進むに従い、産業用ロボット・無人搬送車・自動倉庫など柔軟性の高い運用が可能なハードウェアのスケジューリングが対象となること

が多い。すなわち、ハードウェアの能力を最大限発揮させるようなスケジューリングが要求される。さらに対象となる産業用ロボット・無人搬送車・自動倉庫は、複数台となるから大規模な組合せ問題となるが、スケジューリング結果をオンラインで、産業用ロボット・無人搬送車・自動倉庫のコントローラへ送らなければならないことからリアルタイム性が要求される。

また、生産分野における搬送モデルは、流通分野における搬送モデルと比べて、かなり複雑であり必ずしも式(4-5-1)のように数学的に正確に表現可能とは限らず、搬送車間の干渉が発生する。すなわち、干渉とは $C_{ij}$ が搬送要求 $i$ のFrom点、To点、搬送車 $j$ の現在位置、速度、加速度から決定できず、他の搬送車 $k(k = 1, 2, \dots, m, k \neq j)$ がどのような搬送経路をとるかに影響を受け、直ちに決定できないことをいう。よって干渉が発生する場合、整数計画的解法のための定式化ができない。また、 $C_{ij}$ のサイズは、干渉のない場合の $n \times m$ に対し、干渉のある場合は $nC_m \times mP_m = n! / (n-m)!$ となる。物流搬送問題における標準的な $n = 20$ 、 $m = 5$ というサイズの干渉を考慮しなければならない $C_{ij}$ のサイズは、干渉を考慮しない場合に比べて18000倍以上になる。こうした組合せ爆発により要求される時間内での解探索を困難としている。

#### 4. 5. 2 知識処理手法による近似解法

##### 1) 知識処理手法の構成

筆者は、組合せ離散最適化問題の近似解法として、論理プログラミングと論理式と相性のよい制約処理に注目し、制約充足問題を解決する知識処理システムKIS-V(Kawasaki Inference System-V)を開発した。(黒崎,宮本 93)

(Kurosaki, Miyamoto 94) 本知識処理システムは、制約をルール形式で記述できることを特徴とし、ルールに書かれた制約条件の集合を組み込まれた制約評価系により評価することで最適解の探索を行う。制約評価系は、制約条件をルールの属性として持つ制約条件の優先度順に解釈し組合せを生成する。物流搬送問題解法のアルゴリズムは、図4-5-1に示すようにまず割り当て問題の制約、さらに運行経路決定問題の制約により探索範囲を限定し、これらの制約を満たす組合せの中から、走行時間が最小となる解を近似解として選定する。また、近似解が得られない場合制約緩和処理を行い探索範囲を広げる。

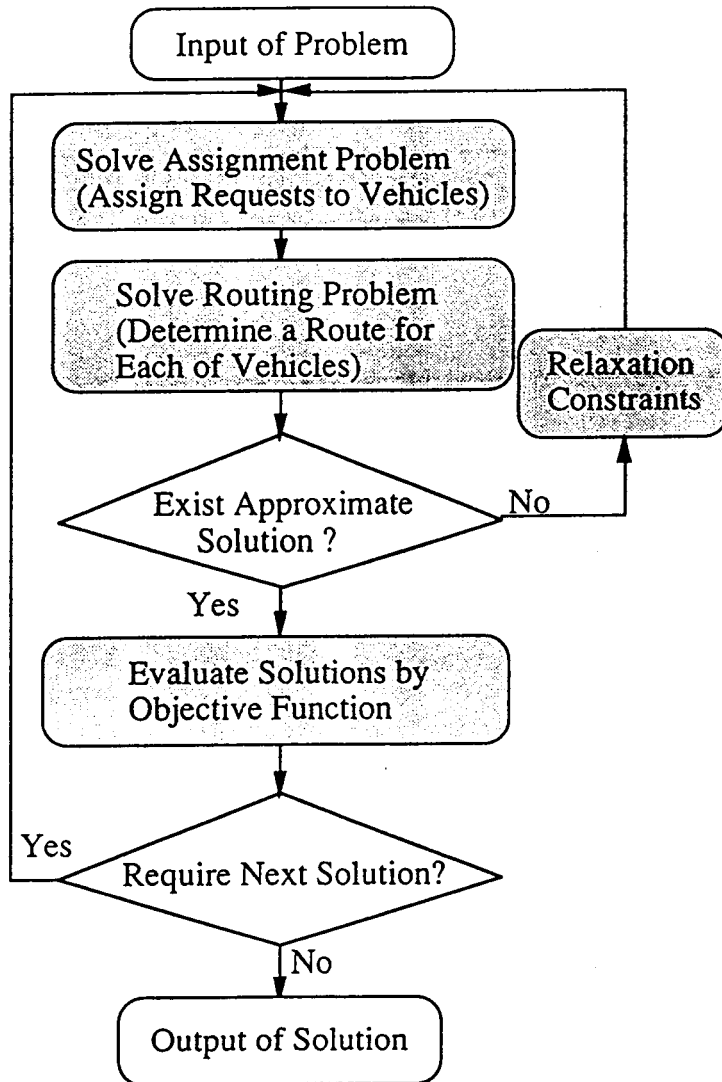


図 4-5-1 物流搬送問題解法アルゴリズム

## 2) 搬送系モデル

工場内搬送路は、シャトルタイプとループタイプがほとんどである。ここでは、ループタイプの高速度重量物搬送システムを対象としたため、搬送車の走行する搬送路を図 4-5-2 のようなネットワークを用いて表現する。ただし以下のような仮定を設定する。

- i) アークは、工場内に設置された搬送車の走行可能経路を表し、有向すなわち一方通行とする。ノードはロード／アンロードステーション、閉塞分離点を表す。
- ii) 同一ノード・同一アークに、同時間に 2 台以上の搬送車が存在することはできない。

すなわち、搬送車間の干渉とは、ある搬送車が他の搬送車のために、あるノード／アークに進行しようとして進行できず、その前方のアーク／ノードに停止しようとして減速または停止する場合（ブロッキング）をいう。

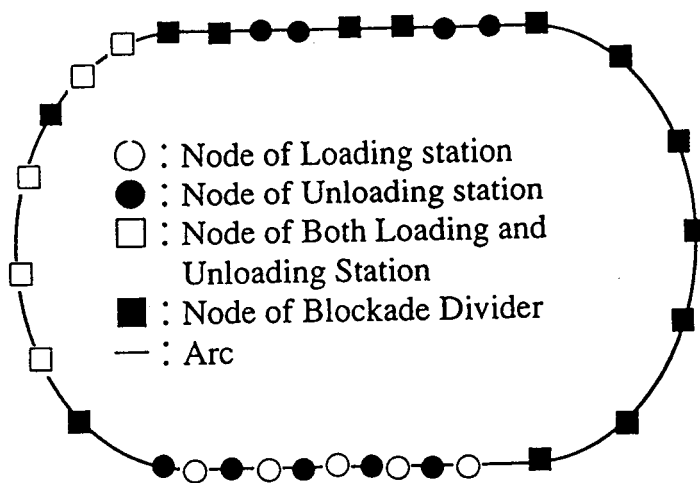


図 4-5-2 搬送系モデル

### 3) 制約充足問題の解法

#### (i) 割り当て問題

割り当て問題で発生する干渉問題を図 4-5-3 の例を用い、2 搬送車間の問題として述べる。搬送車 A、B は、待機中など搬送要求割り当て可能な状態で、進行方向に向かって B が A より前方にいる。この時点で搬送要求 1、2（1 のロードステーション、アンロードステーションは、それぞれ 2 のロードステーション、アンロードステーションより進行方向に向かって前方にある。）が発生したとき、搬送車割り当ての組合せは 2 通りである。

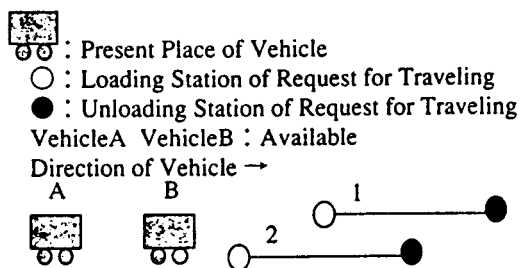


図 4-5-3 割り当て問題における制約

(I) Aが1、Bが2に割り当てられた場合

Bが2をローディング中、AはBにブロッキングされ前へ進めず、搬送車間に干渉が発生する。

(II) Aが2、Bが1に割り当てられた場合

ブロッキングが起こらず、搬送車間に干渉が発生しない。

干渉が発生しない搬送車の割り当ては、搬送車の現在位置、搬送要求のロード／アンロードステーションの幾何学的な条件に依存する。n搬送要求m搬送車と一般化した場合、干渉が発生しない、すなわち、m搬送車間の幾何学的な関係が(II)のようになるための制約条件は、 $R_i$ 、 $R_j$ を搬送車 $i$ 、 $j$  ( $i, j = 1, 2, \dots, m$ ) の現在位置から割り当てられた搬送要求 $r$  ( $r = 1, 2, \dots, n$ ) のロードステーションまでの走行経路とすると式(4-5-2)のように記述できる。

[制約式]

$$\forall i \forall j [ (i \neq j) \wedge (R_i \supseteq R_j) \wedge (R_j \subseteq R_i) ]$$
$$[i = \{1, 2, \dots, m\}, j = \{1, 2, \dots, m\}] \quad (4-5-2)$$

ここで $R_i$ は、図4-5-2で示したノードとアークの有限離散集合からなる。いま、命題 $p(x, i)$ を

$p(x, i)$  : 「ノードまたはアーク $x$ は、搬送車 $i$ の走行経路である」

とすると、式(4-6-2)は式(4-6-3)に変形できる。

$$\forall i \forall j [ (i \neq j) \wedge \exists x [p(x, i) \wedge \neg p(x, j)] \vee \exists y [p(y, j) \wedge \neg p(y, i)] ]$$
$$\quad (4-5-3)$$

ここで $D$ は、図4-5-2で示したノードとアークの全集合とする。存在記号を除去するためスコーム定数 $q_1$ 、 $q_2$ を用い、節形式に変換すると式(4-5-4)となる。

$$\forall i \forall j [ (i \neq j) \wedge (p(q_1, i) \wedge \neg p(q_1, j)) \vee (p(q_2, j) \wedge \neg p(q_2, i)) ]$$
$$\quad (4-5-4)$$

さらに式(4-5-4)は、式(4-5-5)のように節の集合として表現できる。(太原 91)

$$\{i \neq j\}, \{p(q_1, i) \wedge \neg p(q_1, j)\},$$
$$\{p(q_2, j) \wedge \neg p(q_2, i)\} \quad (4-5-5)$$

式(4-5-5)の2番目の節は、論理プログラミング言語 (PROLOG) により簡単に表現できる。

```
member(Q, RouteI), not( member(Q, RouteJ) ) (4-5-6)
```

ただし、RouteIは搬送車iの走行経路、

```
member(Head, [Head|_]).
```

```
member(Element, [_|Tail]):-member(Element, Tail).
```

```
not(X):-X, !, fail.
```

```
not(X).
```

である。これより節形式に変換した制約条件を式(4-5-7)のようにルールの前件部のAND結合として記述する。

```
rule(constraint_condition,
```

```
if, [ frame(VehicleA, instruction = InstI),
```

```
frame(VehicleB, instruction = InstJ),
```

```
VehicleA <> VehicleB,
```

```
frame(VehicleA, path = RouteI),
```

```
frame(VehicleB, path = RouteJ),
```

```
(Ri ~>> Rj; Ri ~<< Rj) ],
```

```
then, [succ_constraint] ).
```

(4-5-7)

ただし、今回用いたProlog処理系はDEC-10Prologに準拠し、演算子~<<、~>>は、結合力が演算子=に等しい中置演算子である。

```
:-op(700, xfx, ~<<).
```

```
:-op(700, xfx, ~>>).
```

```
~<<(RouteI, RouteJ):-
```

```
member(Q, RouteI), not( member(Q, RouteJ) ).
```

```
~>>(RouteI, RouteJ):-~<<(RouteJ, RouteI).
```

すなわち、上記のように組合せ離散最適化問題を、制約条件を論理表現し、さらに、論理プログラミング言語に変換し、(4-5-7)式の形で知識表現の後、ルールで記述した制約の集合を制約評価系により評価することで、干渉が発生しない搬送車の割り当てを決定できる。

#### (ii) 運行経路決定問題（制約充足問題）

本研究での運行経路決定問題は、To点でのアンロード完了後、次に発生する搬送要求や、他の搬送車の搬送の妨害にならないように移動を考え、干渉回避のための最終的な目的地を与えることが必要である。



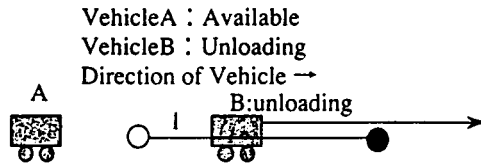


図 4-5-4 運行経路決定問題における制約

運行経路決定問題で発生する干渉問題を図 4-5-4 の例を用い、2 搬送車間の問題として説明する。搬送車 A は搬送要求 1 を割り当てられ、B は A の走行経路内のステーションで、搬送物をアンロード中である。B がアンロード完了後そのステーションで停止していると、A は B にブロッキングされる。よって B はその地点に、次に発生する搬送要求を割り当てられるまで停止せずに、搬送物を積まずに A のアンロードステーションより遠方に移動することが要求される。さらに移動先として次に発生する搬送要求を考えると、ロードステーションへ移動することが望ましい。

干渉が発生しない走行経路は、 $n$  搬送要求  $m$  搬送車と一般化した場合、その制約条件は、 $O_i$  を搬送車  $i$  の現在位置から既に割り当てられた搬送要求  $r$  ( $r = 1, 2, \dots, n$ ) の  $To$  点までの走行経路、 $L_i$  を先に述べた理由による  $To$  点からの移動走行経路とし、 $R_i = O_i + L_i$  とおくと式(4-5-2)となる。したがって、式(4-5-2)を満たすような最終目的地を求めれば運行経路を決定できる。これにより干渉が発生しない搬送車の運行経路を決定できる。

#### 4) 制約緩和処理

本手法は、整数計画的解法のための定式化が困難な物流搬送問題をロード・アンロード時の干渉回避を制約条件とする制約充足問題として近似解を得るものである。そのため搬送要求割り当て可能なすべての搬送車を対象に搬送要求を割り当てようと試みるが、3) で示した制約条件を満たす解が得られない場合、制約緩和処理として、割り当てる搬送車の台数を減らすこととした( $m \rightarrow m'$ 、 $m > m'$ )。その理由として、

(I) 搬送車の干渉のために発生する加減速は走行時間に与える影響が大であ

る。よって無理に干渉が発生するような割り当ては行うべきでない。すなわち、3) で示した制約条件は強いものである。

(II) 搬送車の台数が減少するのに従い干渉度も減少する。よって、搬送車の台数を減らすことにより制約条件が守られる。

ただし、搬送要求を割り当てられなかった搬送車に対しても、他の搬送車の搬送の妨害にならないように移動を考え、干渉回避のための最終的な目的地を与える。

制約緩和処理により、 $m' = 0$ となった場合、現時点での搬送車の割り当てを行わないこととした。そして干渉の原因であった搬送車が待機中など搬送要求割り当て可能な状態に変化した時点で、再度、搬送車の割り当て、運行経路決定を行うようにした。また本手法は、 $m'$ 搬送車を割り当てることに失敗した場合、その原因となった干渉を受ける搬送車 $i$  ( $i = 1, 2 \dots m'$ ) を記憶しておき、次の制約緩和処理において搬送車 $i$ 以外の搬送車での割り当てを行い、バックトラッキングによる探索空間を限定し、問題解決の処理効率を上げている。

#### 4. 5. 4 離散値シミュレーション

##### 1) 問題の設定と現状

A工場内における閉ループ台車搬送システムを対象に離散値シミュレーションを実施した。表4-5-1に搬送車の条件、図4-5-5にシステム構成を示す。

システムは稼働状況下であり、以下のイベントが発生したとき、数秒以内に近似解を求めることが要求される。

- I. 搬送要求が発生した。(搬送要求はA工場の稼働実績をもとに、乱数により任意のタイミングで発生させる。単位時間あたり60個の搬送要求を発生させる。)
- II. 搬送車の状態が変化した。(表4-5-1に示すように6つの状態を定義する。)

表4-5-1 搬送車の条件

	速度(m/min)	
	with a Load	without a Load
直線部	150.0	200.0
カーブ	100.0	100.0

Time for Acceleration/Deacceleration	0.15min
Loading/Unloading Time	0.75min

搬送車の状態
1. Waiting
2. Moving to take an assigned of traveling
3. Loading
4. Traveling with a load
5. Unloading
6. Moving without a laod

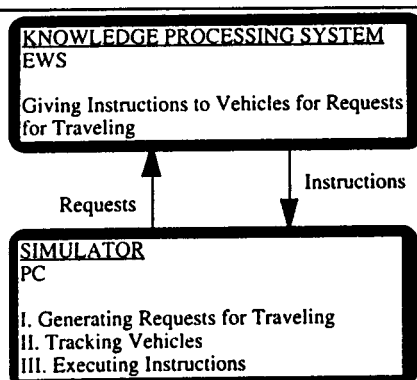


図4-5-5 システム構成

また図4-5-6は、A工場の現状の搬送状況である。搬送車5台の場合を基準とし、搬送車1台あたりの搬送能力、干渉度を比で表したものである。ここで、

1台あたりの搬送能力：単位時間あたりに搬送を完了した搬送物の総数を搬送車数で割った値

干渉度：単位時間あたりに搬送車がブロッキングされた時間

と定義する。搬送車が5台から6台になった時、干渉度は約50%増加し、1台あたりの搬送効率は逆に約10%減少している。すなわち、搬送車の台数が増加するに従い、干渉度が増加し、システムの運行効率に影響を及ぼすことがわかる。

□ : Interference Opportunity  
○ : Ability per Vehicle

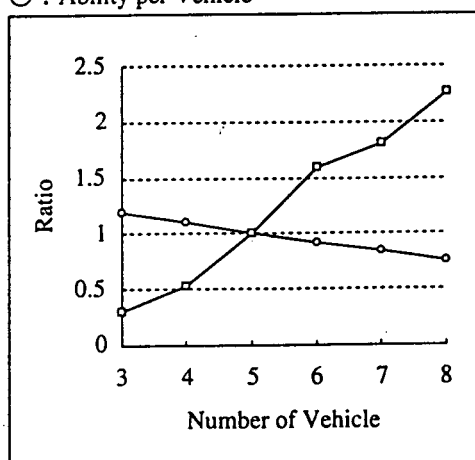
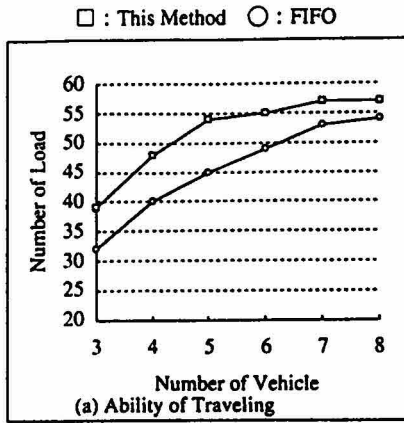


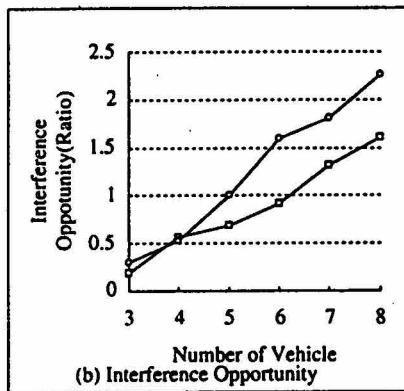
図4-5-6 対象問題の搬送状況

## 2) シミュレーション結果

図4-5-7に本手法と従来からよく用いられている搬送要求が発生した順に、搬送要求のFrom点に最も近くに位置する利用可能な搬送車を割り付けていくFIFO(First In First Out)手法との比較を示す。搬送能力(単位時間あたりに搬送を完了した搬送物の総数)から見ると本手法は搬送車1台分少なくとも、FIFO手法と同等以上の搬送能力を持つ、すなわち搬送能力が約20%上がっていることがわかる。また、単位時間あたり60個の搬送要求を発生させているが、本手法は、搬送要求の90%を単位時間内に搬送車5台で処理できるのに対して、FIFO手法では搬送車8台が必要である。また、搬送車の台数が増加しても、干渉度の増加を抑制し効率のよい搬送を行っていることがわかる。



(a) Ability of traveling



(b) Interference opportunity

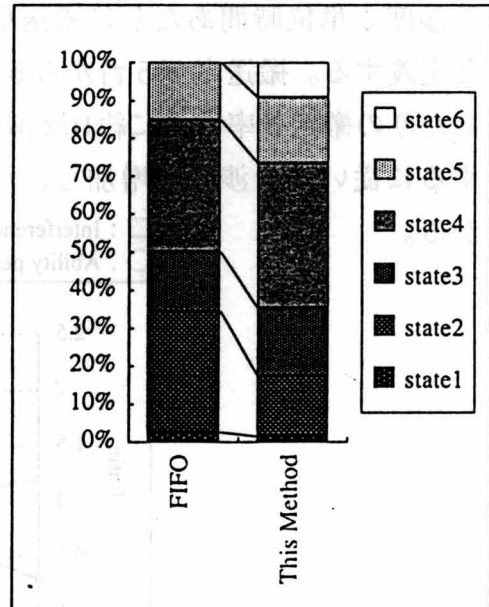


図4-5-7 本手法とFIFO手法(I)の比較 図4-5-8 本手法とFIFO手法(II)の比較

図4-5-8に本手法とFIFO手法の単位時間あたりの搬送車の状態の比較を示す(状態の定義は表4-5-1による)。state2(搬送要求を割り当てられてからFrom点へ移動するまでの時間)の割合が、本手法では約50%減少していることがわかる。これは搬送車の干渉が減り、搬送要求を割り当てられてから短時間でFrom点へ移動することができ、効率よく搬送要求を処理しているためと考えられる。

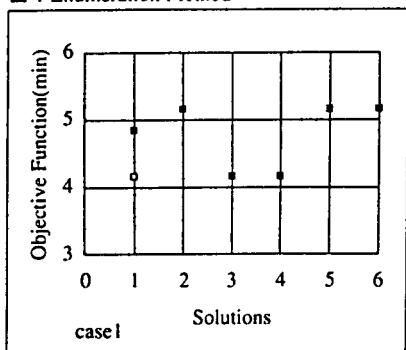
### 3) 近似解の最適性の検討

本手法によって得られる解の最適性を示すために列挙法(enumeration method)との比較を示す。3搬送要求3搬送車問題(case1、case2)において、列挙法では4.5.1で述べたように $3! / (3-3)! = 6$ 通りの全組合せ(解)が得られる。図4-5-9は、□が本手法で、■が列挙法で得られた解に対する解の評価値(搬送要求を処理し終えるまでの走行時間)を示す。本手法は、case1、case2(図4-5-7に結果を示したシミュレーション中に発生した状

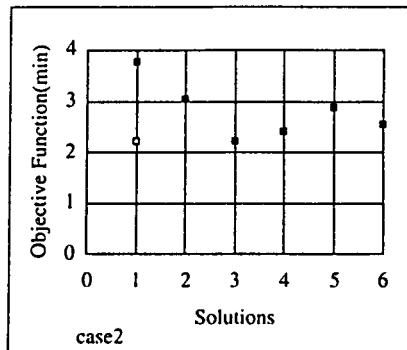
況) ともに最適解を得ることに成功している。また本手法によって回避することのできない干渉 (ハードウェアの構成上どうしても回避することのできない干渉) が発生しても最適解になるケースが考えられるが、長期運用期間では、統計的には図 4-5-7 に示すように本手法が有効である。

□ : This Method

■ : Enumeration Method



case 1



case 2

図 4-5-9 本手法と列挙法との比較

#### 4. 6 関連研究との比較

エキスパートシステムの開発、運用、維持においては、その知識ベースの開発、すなわち知識獲得をいかに行うかが重要な課題であり、この課題に対する回答なくしては、実用的かつ効率的なエキスパートシステムの開発は難しい。(計自 88)

本研究では、この課題を解決するための手段として、設計段階で実施するFMEAをベースとする情報から「IF～THEN～」形式のプロダクションルールを自動生成する手法、および事例データに基づいてルールを自動生成する手法について開発事例を紹介した。我々の数多くのエキスパートシステムの開発経験に照らしても、これらの手法は実用的かつ効率的なエキスパートシステムの開発・運用には不可欠である。さらに、知識獲得の対象となるデータは、専門家の頭脳に蓄積されているものだけではなく、数々の異常事例が発生するたびに専門家を交えて検討し、問題解決を図った事例が、ドキュメントおよび電子情報として計算機上に再利用可能な形で蓄積されている場合も多い。これは、運用開始後において特に顕著である。このデータに基づいて問題解決を行う事例ベース推論(小林 91)の研究が今後の課題であり、対象システムに適したこれらの知識獲得手法を組み合わせ、より実用的なエキスパートシステムを開発するのが望まれる。

熱プラントにおいて、その高機能化と運用における高効率化・運用性能の向上などが求められており、これに対応して熱プラントの制御技術も複雑化・自動化・高度化の一方をたどっている。このような状況下では、運転員が、これらの要求に適切に対処して行くためには、運転員を支援する運転支援エキスパートシステムの確立が不可欠である。特に、新技術、新分野の開発においてはメーカとしてのノウハウを積極的に活用し、実用化を目指して開発を行なう必要がある。

生産分野における物流の効率化は、搬送、倉庫などの運用、機能に支えられている。本節では、物流システムにおける搬送問題(以後、物流搬送問題という)を、無人搬送車の運行・走行管理を中心に考察する。物流搬送問題での最適化は、同一の搬送系内において複数の搬送車を用いる場合、搬送車間でのブロッキングやデッドロックといった干渉の問題を解決することが必要不可欠である。とくに近年、搬送システムは大規模化し、搬送ネットワークも複雑になり、搬送車も増大する傾向にある。このような状況下にあつて

は干渉の多発化が予想され、干渉回避がシステムの運行効率に及ぼす影響は大である。また、加工・組み立てのために多数の設備が集められた生産現場では、それらの設備を結ぶ搬送系には高密度の干渉発生ポイントが潜在的に存在するものと考えられる。(宝崎 93)

干渉回避の問題を陽に考慮し経路選択を行わせる方法として、線形計画法を用いた藤井らの研究があるが、干渉が発生する幾何学的な判断の自動化については、今後の課題としている。(藤井 89) 本研究では、干渉回避の条件を制約条件とする制約充足問題を知識処理手法により割り当て問題、運行経路決定問題として解き、全搬送車の走行時間の最小化という目的関数のもとに近似解を求める手法を提案した。

#### 4. 7 結言

エキスパートシステムの開発は、単に計算機プログラミングにおける記号処理技術に止まるものではなく、対象に関する深い知識を駆使して、対象に応じた推論機能やマンマシン機能を開発し、また、従来からのシステム技術との融合を図っていくことが必要である。そのため、エキスパートシステムの開発者は、より対象に近い技術者へ重心を移行して行くべきであり、その傾向は今後のコンピュータや周辺技術の進展により、より加速されるものと思われる。

エキスパートシステムの主たる対象分野である故障診断、運転支援としての基本的な考えについて考察し、中心課題を明確にした。そして、汎用エキスパートシステム構築ツール「K I S」を用いて、その適用例として、機械装置、熱プラントの故障診断、運転支援エキスパートシステムの開発例について記した。

今後、エキスパートシステムの対象も故障診断、運転支援に限らずより一般的な領域に広がり、さらに通信ネットワークを利用したシステムへ展開されて行くものと思われる。(船越 89) (吉田 89) (三井 89)

それに応じて、エキスパートシステム構築ツールもドメイン化していく傾向があると考えられる。「K I S」そのものは汎用エキスパートシステム構築ツールとして開発しているものであるが、対象プラント・適用分野が限定されるものではない。今後とも、より実用的なエキスパートシステムの開発を積極的に展開し、それに応えうるドメイン対応の汎用構築ツールの開発を



推進する必要がある。(Miyamoto 94)

さらに、本研究ではエキスパートシステムの合成型分野として、制約充足問題を解決する知識処理システムを構築し、干渉を伴う組合せ離散最適化問題の一例として、閉ループ搬送系を対象に離散値シミュレーションを実施し、従来のFIFO手法と比較して効率のよい搬送が行えることを示した。すなわち、整数計画的解法などを用いるための定式化が困難な問題の場合、干渉などその問題に対して重要な制約条件を発見し、制約処理により解の探索範囲を限定し近似解を得る手法は、実用上有効な手段である。

### 参考文献

(ICOT 88) -JIPDEC AIセンター：“知的情報処理システムに関する調査研究報告書－知識獲得支援－”、('88)

(茨木 93) 離散最適化法とアルゴリズム、岩波書店(1993)

(加藤 91),山本,西部,角井:"P-3C型航空機自動操縦装置用故障診断システムの開発",川崎重工技報[111],平成3年10月

(川重 92) 船舶事業本部:"ディーゼル船向機関部運転支援装置",川崎重工技報[112],平成4年1月

(Quinlan 84) "Learning Efficient Classification Procedures and Their Application to Chess End Games", Machine Learning, Springer-Verlag, 1984

(國藤 88) "知識獲得と学習研究の新しい流れ",人工知能学会誌,3[6],('88)

(黒崎 87)、稲垣、宮本、西野：故障診断エキスパートシステム、計測自動制御学会学術講演会予稿集 ('87)

(黒崎 89)、宮本：第2世代エキスパートシェル技術、システム／制御／情報、33巻3号 ('89)

(黒崎 90)、宮本、西野、稲垣：人工知能(AI)を利用した故障診断装置、ガスタービン学会誌、1990年1月号

(黒崎、宮本 93)、林ほか：知識獲得支援技術の研究開発；川崎重工技報、118号、2/9(1993)

(Kurosaki,Miyamoto 94), M.Hayashi, K.Ozaki, T.Yoshimura and Y.Miki : A Constraint Oriented Realtime Knowledge Processing System and Its Application to A Physical Distribution Problem (1st Report) ; 第33回SICE学術講演会

(SICE'94)

(計自 88) 計測自動制御学会：特集知識システム、計測と制御、27巻10号('88)

(小林 91) "CBRの現状と課題",人工知能学会知識ベースシステム研究会資料, SIG-KBS-9102, 1991

(阪上 87)、黒崎、稲垣、宮本、河野、西野、林：故障診断エキスパートシステムの開発、川崎重工技報95号('87)

(塩見 86)、島岡、石山："FMEA,FTAの活用",日科技連信頼性工学シリーズ第7巻,1986

(Stambler 86) Utility to test 'expert' trouble-shooting system, GASTURBINE WORLD May-June ('86)

(太原 91) 認知情報処理、オーム社(1991)

(Chieu 76)、M.B.Adams:A Sequential Failure Detection, IEEETrans. AC-21, ('76)

(出海 86)、木口：異常診断のための情報処理、計測と制御、25巻10号('86)

(Harmon 85)、D.King：EXPERT SYSTEMS (諏訪 監訳 エキスパートシステムズ)、サイエンス社('85)

(福山 90)、坂本、横山、湯浅、庵原、羽畑、宮本、西野："ごみ焼却プラント異常診断・運転支援エキスパートシステム",川崎重工技報[106],平成2年7月

(藤井 89)、三道、宝崎：自動搬送台車の経路決定法(第1報、経路決定アルゴリズム)；日本機械学会論文集、55-C-514,1568/1573(1989)

(船越 89)、新家：化学プラント向け汎用運転支援システムPDIAS、三菱重工技報、26巻、5号('89)

(宝崎 93)、藤井：物流システムにおけるスケジューリング；システム／制御／情報、37-5,344/349(1993)

(三浦 81)、Chan:機械の故障診断、自動車技術35-9('81)

(三井 89)、三井造船(株)プラント事業部、プラント運転支援エキスパートシステム、三井造船技報138号('89)

(宮本 95)、黒崎、林、尾崎、吉村：物流搬送システムにおける干渉を伴う組合せ離散最適化問題の近似解法、計測自動制御学会論文集、Vol.31,No.5,675/681(1995)

(Miyamoto 91) ,Kurosaki,Miyatake:"An Operation Support Expert System for a Thermal Plant",The World Congress on Expert Systems Proceedings,Dec.,1991

(Miyamoto 92) ,Nishino,Hayashi,Kato,Fukuda:"Development of Fault Diagnosis for Airplane and Motor Ship Machinery", Proceedings of the IMACS/SICE International Symposium, Sep., 1992

(Miyamoto 94) ,Nishino,Tamura,Kurose,Sakai:"Development of an Expert System for Quality Control of Casting Materials",The Second World Congress on Expert Systems Proceedings,Jan.,1994

(吉田 89) 、鈴木、大塚：船舶推進プラントのオンライン監視故障診断装置 (DYMOS) 、石川島播磨技報、28巻、5号 ('89)

# 第5章 ニューラルネットワークによる画像・プロセス信号融合とその熱プラントへの応用

## 5.1 緒言

ニューラルネットワークとは、脳などにおける神経細胞とその結合様式を工学的にまねた神経回路網モデル(Neural Network Model)のことであり、これにより生体の持つ優れた情報処理能力を実現しようとするものである。ニューラルネットワーク自体は1940年代頃に提案された技術であり、連想記憶や視覚情報の認識などの分野において研究がなされていたが、1980年代中頃に学習アルゴリズムとして有効な逆誤差伝播学習法が提案されると、産業界においても画像処理、判別問題、モデル同定、制御などの分野を中心に実用化が進められるようになった。(宮本 9 1-1) ここで、ニューラルネットワークの主な特長をまとめると以下のようなになる。

- ・学習能力がある
- ・汎化能力(補間, 耐ノイズ)がある
- ・多変数非線形入出力関数の実現が容易である

本研究では、これらの特長に着目し、パラメータ推定、燃焼識別、形状識別に適用した。

## 5.2 ニューラルネットワークによるパラメータ推定(宮本 9 6)

制御対象としての熱プラントは、多くの場合、直接計測できない状態パラメータが数多く存在し、これらのパラメータを推定し制御に活かすことにより、制御性能を大幅に向上させることができる。流動床ごみ焼却炉は第3章で述べたように燃料である供給ごみの量・質が不確定であり、かつ燃焼完結速度が大のため燃焼制御が難しい。しかし、層上部と層内部各々での燃焼割合や実効空気比などの状態パラメータが把握できると、CO・NO<sub>x</sub>抑制など飛躍的に制御性能向上が可能と考えられる。

本研究では、これらの状態パラメータを温度、空気流量、冷却水量などの計測信号と動的解析モデル、ニューラルネットワークを活用して求める手法を提案し、実炉データによりパラメータ推定が可能であることを示す。さらに、パラメータ推計式を一般化して他への展開を可能とする。

### 5. 2. 1 ニューラルネットワークを用いたパラメータ推定

熱プラントを表す特性式群は本質的に非線形であり、計測値との関係から入出力特性が逆となる逆モデルとなる場合が多い。

こうした非線形連立微分方程式群のオンライン解法として、ニューラルネットワークの誤差表面に関する最急降下法が有用である。

$n$  個の未知数を持つ、 $n$  個の状態方程式群が、 $i=1,2,\dots,n$  に対して、

$$F_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (5-2-1)$$

で表される場合、エネルギー関数を次式で表す。

$$E = (1/2) \sum_i F_i^2 \quad (5-2-2)$$

エネルギー関数の最小値問題は、式(5-2-3)の初期値問題に置き換わる。

(Cichocki 93)

$$\begin{bmatrix} dx_1/dt \\ dx_2/dt \\ \cdot \\ \cdot \\ dx_n/dt \end{bmatrix} = -\mu \begin{bmatrix} \partial E / \partial x_1 \\ \partial E / \partial x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \partial E / \partial x_n \end{bmatrix} \quad (5-2-3)$$

$\mu$  は  $n \times n$  の正定行列であり、式(5-2-4)となる。

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_{11} & & \mu_{ij} \\ & \mu_{22} & \\ & & \cdot \\ \mu_{ij} & & \mu_{nn} \end{bmatrix} \quad (5-2-4)$$

$(\mu_{ij} > 0, i, j = 1, 2, \dots, n)$

図5-2-1のニューラルネットワークは、式(5-2-2)のエネルギー関数を最小にする  $x_i$  を出力する収束演算を行う。このニューラルネットワークは、エネルギー関数が偏微分可能であれば簡単に構成できる。

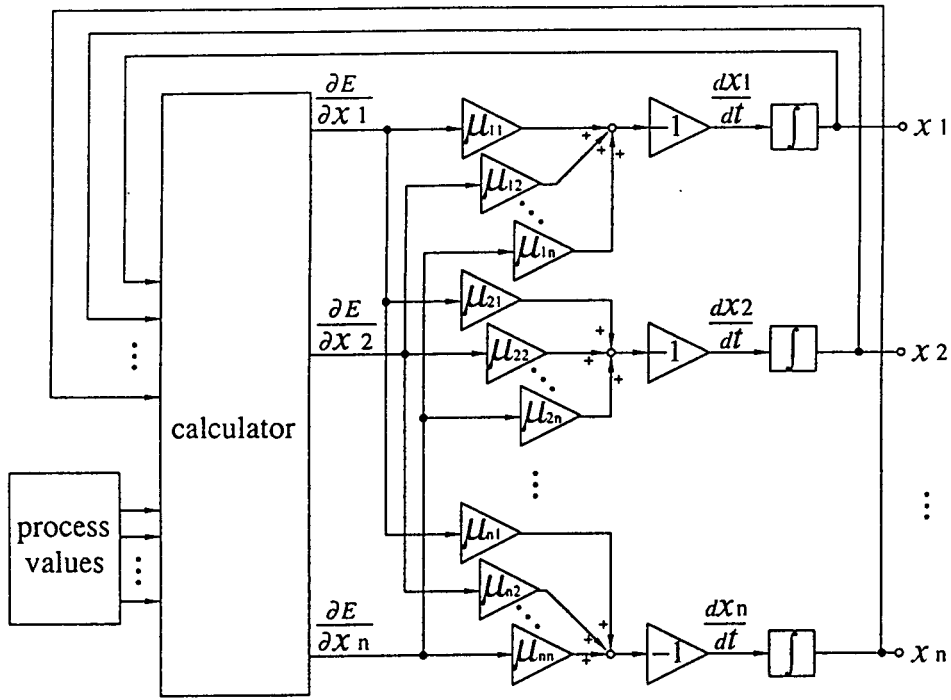


図 5-2-1 パラメータ推定のためのニューラルネットワーク

### 5. 2. 2 流動床ごみ焼却炉での層内燃焼率の推定

流動床ごみ焼却炉は第 3 章で述べたように、予熱空気によって激しく混合・攪拌している加熱砂粒層に投入されたごみが層内に巻き込まれ、その熱によって短時間に燃焼し、さらに層上部で燃焼を完結するものである。また、不燃物は層内を沈降し、焼却残さとして砂粒とともに抜き出される。流動床ごみ焼却炉の特徴として、燃料である供給ごみの量・質が不確定であり、かつ燃焼完結速度が大のため燃焼制御が難しい。しかし、層上部と層内部各々での燃焼割合や実効空気比などの状態パラメータが把握できると、CO・NOx 抑制など飛躍的に制御性能向上が可能と考えられる。

ここでは、システム分析としてこれらの状態パラメータを温度、空気流量、冷却水流量などの計測信号と動的解析モデル、ニューラルネットワークを活用して求めることを考える。さらに、構造同定として、流動層燃焼部と層上燃焼部に要素を分割し、理論解析として、各要素にてエネルギーバランス、マスバランスを数式で記述する。(宮本 95-1)

$$d/dt(C_b W_b T_b) = C_{pa} T_a G_{a1} - C_{pg} T_b G_{gb} + H_u K G_R - 600 G_{sp} \quad (5-2-5)$$

$$C_{pg} T_g G_g = C_{pg} T_b G_{gb} + H_u (1-K) G_R + C_{pa} T_a G_{a2} \quad (5-2-6)$$

$$G_g = \{(V_0/A_0)/\lambda + (1-\lambda)\} G_{a2} + G_{gb} \quad (5-2-7)$$

$$G_{gb} = (V_0/A_0)G_{a1} + (22.4/18) G_{sp} \quad (5-2-8)$$

$$\lambda = (V_0/A_0)21/(21-O_2) \quad (5-2-9)$$

$$\lambda = (G_{a1} + G_{a2})/(A_0 G_R) \quad (5-2-10)$$

ここで、

$C_b$ :層物質比熱(Kcal/Kg $^{\circ}$ C)

$C_{pa}$ :空気比熱(Kcal/Nm $^3$  $^{\circ}$ C)

$C_{pg}$ :ガス比熱 (Kcal/Nm $^3$  $^{\circ}$ C)

$W_b$ :層物質重 (Kg)

$T_b$ :層温度 ( $^{\circ}$ C)

$T_a$ :空気温度( $^{\circ}$ C)

$T_g$ :燃焼室出口ガス温度( $^{\circ}$ C)

$G_{a1}$ :一次空気流量(Nm $^3$ /h)

$G_{a2}$ :二次空気流量(Nm $^3$ /h)

$G_{gb}$ :層出口ガス流量(Nm $^3$ /h)

$G_g$ :燃焼室出口ガス流量(Nm $^3$ /h)

$G_R$ :ごみ供給量(Kg/h)

$G_{sp}$ :冷却水流量(Kg/h)

$K$ :層内燃焼率(Kg/Kg)

$\lambda$ :空気比(Nm $^3$ /Nm $^3$ )

$H_u$ :ごみ低位発熱量(Kcal/Kg)

$V_0$ :理論排ガス量(Nm $^3$ /Kg)

$A_0$ :理論空気量(Nm $^3$ /Kg)

$O_2$ :排ガス中酸素濃度(Nm $^3$ /Nm $^3$ )

式(5-2-5),(5-2-6)はそれぞれ流動層、層上部でのエネルギーバランスであり、式(5-2-7),(5-2-8)は燃焼ガスのマスバランスを表す。また、式(5-2-9)は計測可能な排ガス中酸素濃度から、空気と燃料の実効空気比を求める式である。式(5-2-10)は空気比の定義式である。

式(5-2-5)～(5-2-10)に3章で述べたニューラルネットワークによるパラメータ推定を適用する。6式あることから6変数を未知数と定義できるが、計測値から自明な $G_g, G_{gb}, \lambda$ の式(5-2-7)～(5-2-9)は省き、未知数として $K, H_u, G_R$ の

3変数とし、 $T_b, T_a, G_{a1}, G_{sp}, T_g, G_{a2}, O_2$ の7変数を計測値から得るものとする。したがって、残りの $C_b, W_b, C_{pa}, A_0, V_0$ は定数として扱う。演算にはオンボードコンピュータを用い、バス通信によりプラント制御装置との間で入出力変数のやりとりは自由である。演算周期は6秒で行った。

図5-2-2に示す実稼働中の流動床ごみ焼却炉での運転データを採取し、 $T_g, T_b$ などをニューラルネットワークに入力して $K, \lambda$ などを得た。ここで、計測値の排ガス中酸素濃度 $O_2$ はプラント煙道からのサンプリング経路による計測遅れがあるため、前処理を必要とする。すなわち、ニューラルネットワークより出力された $K, \lambda$ 間の相互相関関数を求めると図5-2-3a)のように5step(30秒)の遅れが存在する。このため、 $O_2$ について30秒進めたデータを用いて再度ニューラルネットワークの入力とし、求めた $K$ と $\lambda$ の相互相関関数を図5-2-3b)のように遅れがないことを確認し以後の検討に考慮した。

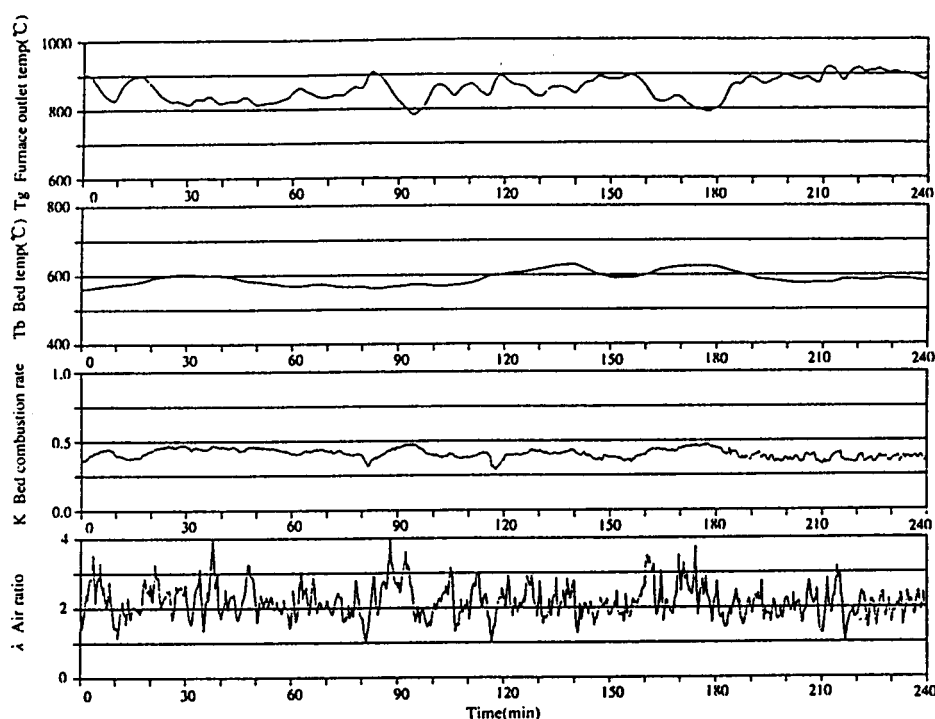


図5-2-2 流動床ごみ焼却炉の運転データ

流動床炉に投入された燃料のごみが投入後燃焼完結までには、融点の低い成分の蒸発燃焼、揮発成分の分解燃焼、酸素の個体表面への拡散による表面燃焼の過程を経る。ここで、層内燃焼率 $K$ はどの過程での燃焼が支配的である



かを示す指標となり、層温度、燃焼室出口ガス温度を決定する。両温度ともに環境問題からの要請である排ガス低CO低NO<sub>x</sub>濃度運転には影響が大きい。(横山 92)

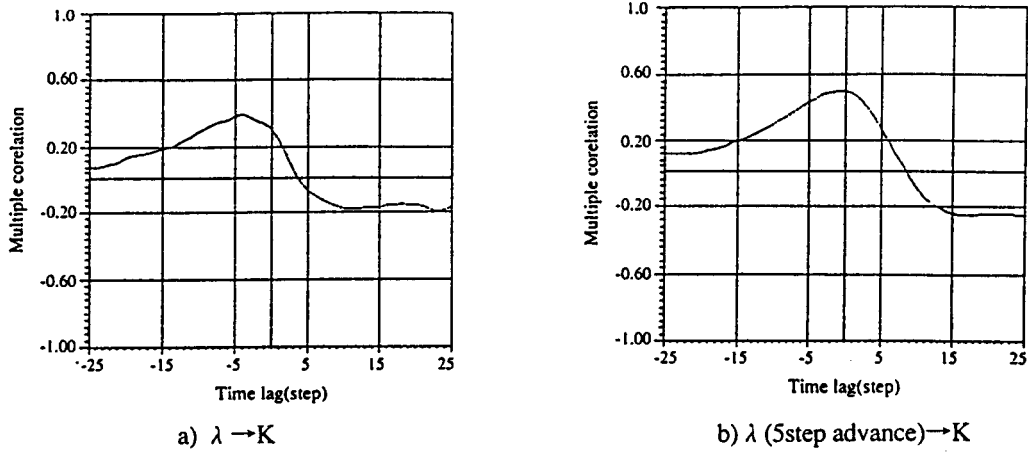


図5-2-3 λとKの相関関数

したがって、Kを表現できる実験式を他の変数で簡略に一般化しておき、今後の制御系設計やプラント本体の機器設計に用いられるよう考慮することは有用である。今注目している層内燃焼率Kは、燃焼を化学反応ととらえれば、式(5-2-11)のアレニウスの式(矢木 58)に従うものと考えられる。

$$K = A_n \lambda^\alpha \exp \left\{ -E/R(T_g + 273) \right\} \quad (5-2-11)$$

ここで、 $A_n$ ：係数

$\alpha$ ：反応次数

E：反応の活性化エネルギー

R：ガス定数1.987(Kcal/Kgmol°K)

図5-2-2で得られたK、λと $T_g$ との関係を図5-2-4にて表示する。λの範囲を限って抽出したKと $T_g$ の間には、ノイズは含まれるものの静的相関が認められる。(Antoulas 93)

したがって、式(5-2-11)の形式でK、λ、 $T_g$ の関係式を一般化することは可能であり、 $A_n$ 、 $\alpha$ を代表データから決定した後、推計式を求めた。

図5-2-2で得られたニューラルネットワークの出力と推計式出力との比較を図5-2-5に示すが、よく一致しており、一般化できたものと考えられる。さらに、得られた式(5-2-11)を式(5-2-6)~(5-2-10)の動特性モデルに

加味してシミュレーションを実行し、実機データとの比較を試みた。図5-2-6のように、シミュレーション結果は実機データと良く一致し、動特性モデル、推計式共に有用であることが実証できた。

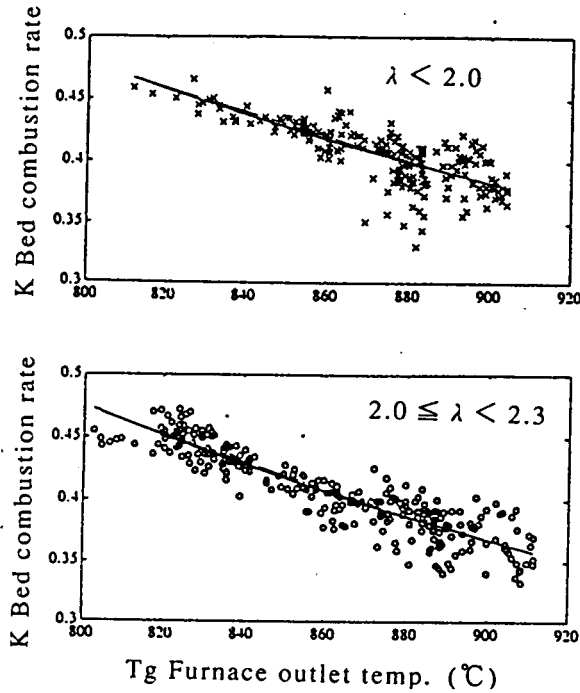


図5-2-4 K、 $\lambda$ とTgの関係

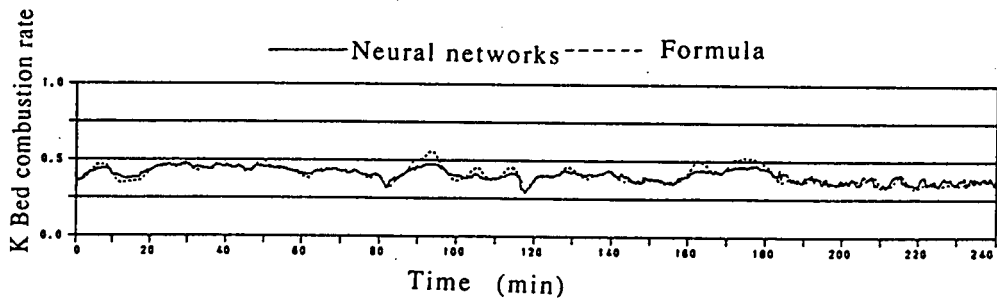


図5-2-5 ニューラルネットワーク出力と推計式の比較

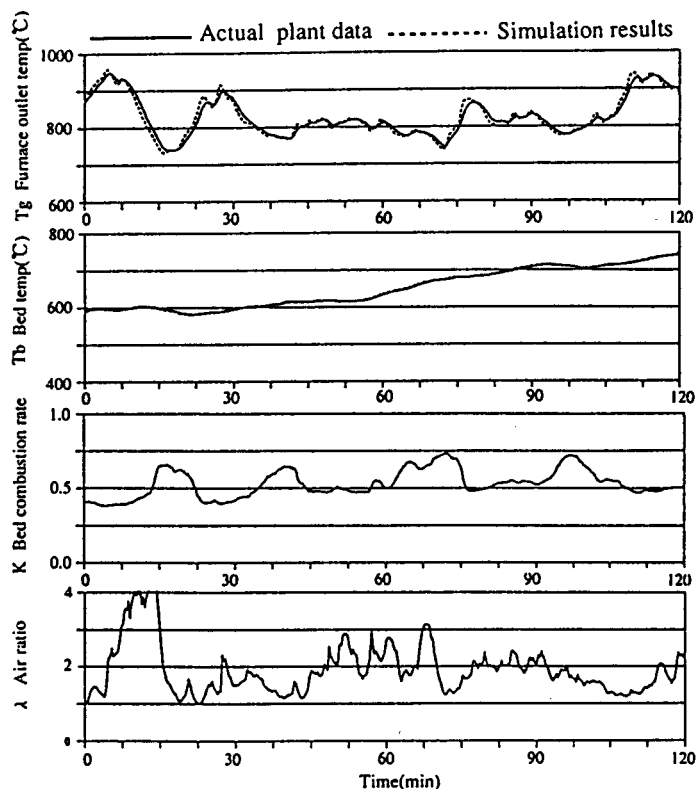


図5-2-6 実プラントデータとシミュレーション結果の比較

### 5.3 パターン認識によるごみ焼却炉適応燃焼制御の実現(Miyamoto 96)

第3章では、流動床ごみ焼却炉の公害抑制のための低CO、低NO<sub>x</sub>運転実現条件の考察を行い、ファジィシステムによる予測燃焼制御について述べた。本節では画像処理とニューラルネットワークを用いた燃焼識別装置により、ごみ突変現象を捉えるパターン燃焼制御することにより、ごみ特性を吸収することを提案し、実炉で実証した結果について述べる。

#### 5.3.1 燃焼画像識別装置

流動床ごみ焼却炉において、COの発生は2つの場合に分けられる。1つは供給空気に対して過剰燃焼（以後過燃と略す）の場合、もう1つは供給空気には余裕があるが温度降下による燃焼凍結がおこる燃焼悪化（以後悪化と略す）の場合である。この区別を行なうのにO<sub>2</sub>と温度の計測データを参考とする。CO発生を抑えるためには、過燃や悪化にならないよう、安定した燃焼を

行なう必要がある。しかし、実炉においての調整により安定条件を確保して運転を行なっても、ごみ質等の変化のため、COの突変現象がおこる問題がある。低公害の流動床ごみ焼却炉の実現のためには、このCO突変現象を抑える必要がある。

第3章のシステムはCO突変と給じん電流の突変との相関関係が高いことを利用し、ファジィ推論によりCO突変を予測し、CO抑制操作を行なう。しかし、給じん電流の変化に表われないCO突変の予測は困難であり、また、ごみ切れが給じん電流では捉えられないことから、悪化に対するCO突変現象の予測はできないという問題がある。仮にCOやO<sub>2</sub>の分析計からの信号でCO突変現象を検知しても、分析計の遅れのため、CO抑制操作の対応も遅くなり間に合わない。そこでこれらの問題解決のため、燃烧画像識別装置を利用したCO抑制システムを構築した。(宮本 95-2) これは燃烧画像とニューラルネットワークを利用して、いち早くCO突変現象を検知し、CO抑制操作を行なうものであり、ファジィシステムの補完となるものである。

ごみ燃烧の場合、第3章燃烧制御の目的と動特性解析モデルでも述べたように、燃料となるごみの性状・供給状態は不確定であり、燃烧結果としての画像情報は著しく変動する。ニューラルネットワークを用いた場合、こうした変動の中から特徴を抽出し、類似パターンとの識別を行なえることから有用である。

燃烧画像識別装置の全体構成を図5-3-1に示す。この装置には2つのCPUボードがあり、画像処理に関する処理は画像処理ボードで行ない、ニューラルネットワークに関する処理はAIボードで行なう。

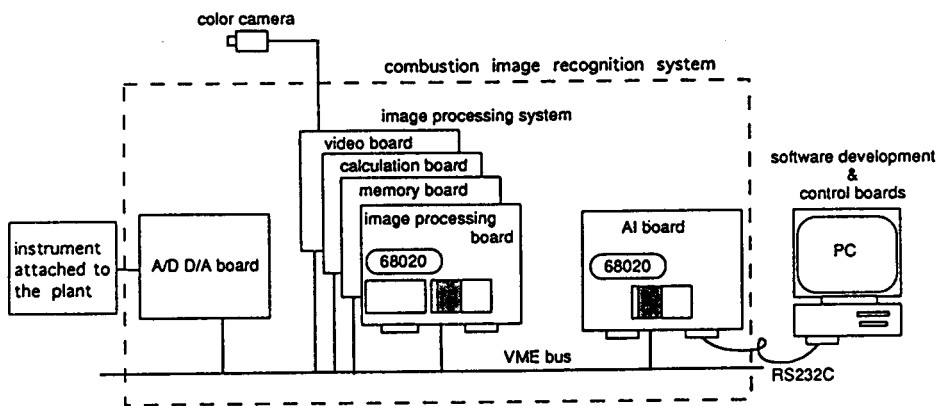


図5-3-1 燃烧画像識別装置の構成

ニューラルネットワークに必要な情報はカメラからの燃焼画像データとプラント既設の計測機器からのデータに分けられる。画像データは画像処理装置にて加工され、画像処理ボード上の共有メモリに格納される。AIボードからこの共有メモリにアクセスし、画像データを得る。計測機器からのデータはアナログ入力(A/D)ボードを介してAIボードに取り込まれる。ニューラルネットワークでの処理結果はアナログ出力(D/A)ボードにより出力され、これをトリガとしてCO抑制のための操作が自動で行なわれる。

### 5. 3. 2 ニューラルネットワークを用いた画像からのCO発生検知

ニューラルネットワークは、人間の右脳に似せた信号処理手法であり、信号パターンの記憶、識別を得意とする。図5-3-2に運用中の流動床ごみ焼却炉のプロセス状態の時系列を示す。この時系列にはO<sub>2</sub>濃度から判定して悪化(O<sub>2</sub>大)と過燃(O<sub>2</sub>小)によるCO発生が見られるが、このCO発生の約60秒前に画像の赤成分(R)および青成分(B)に特徴が現れている。すなわち、悪化の場合は赤成分、青成分ともに著しい低下が見られ、また過燃の場合は赤成分は上昇するが、青成分は低下するという特徴が現れている。このような特徴パターンをニューラルネットワークに記憶させ、燃焼状態の判断を行なう。

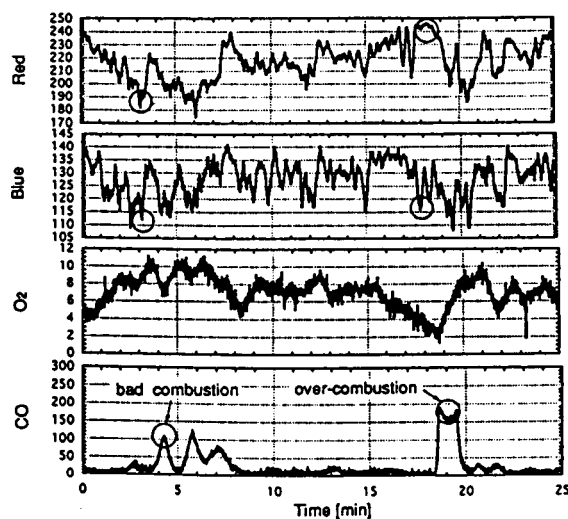


図5-3-2 流動床ごみ焼却炉運転データ

ニューラルネットワークへの入力として、画像のRGB成分とガス分析程の遅れがなく過燃、悪化の判定に有効な炉出口ガス温度(TL)の4種を用いた。ここでRGB成分や炉出口ガス温度の時間的な変化も重要な情報であるため、それぞれ30点ずつ(過去30秒までに相当)をニューラルネットワークへの入力として用いた。すなわちこれはトレンド中の特徴のある部分の形状を記憶させることに相当する。ここで30点としたのは、CO発生の約60秒前のRGB成分の波形の立ち上がりから立ち下がりまでの時間が平均約30秒であったためであり、また、画像のRGB成分は日や時間によってそのベース値が異なることを考慮し、それぞれの30分移動平均の値との差をとることにより規格化を行なった。

ニューラルネットワークのセル構造に関しては、入力層・中間層・出力層の3層構造とし、入力層のセル数は4種×30点の120入力、出力層のセル数は、過燃・適正・悪化の3出力となる。中間層のセル数に関しては、シミュレーションの結果、20を採用した。このようにして決定したニューラルネットワークの構成を図5-3-3に示す。ニューラルネットワークの教示は運転中の流動床ごみ焼却炉で採取したデータを用いて行った。教示データはCO突変データを基に過燃、悪化の判定にO<sub>2</sub>データを考慮することにより抽出を行なった73パターン、学習回数は3000回、エラーは0.0059であった。ここで、エラーとは1教示パターンあたりの教示出力データとニューラルネットワーク出力データの絶対偏差総和平均をいう。(安西 93)

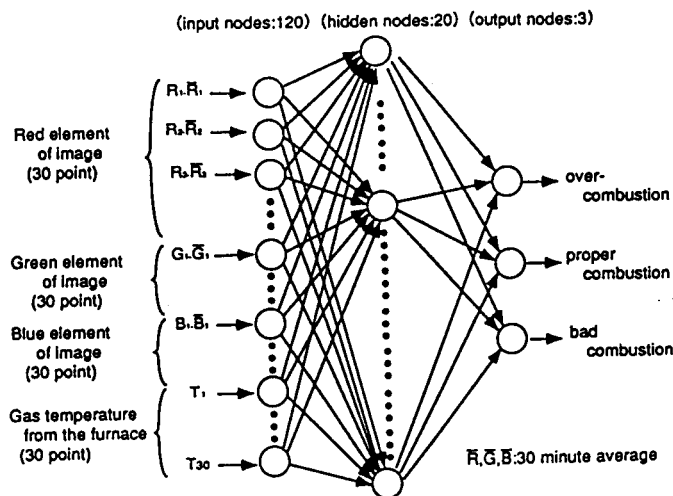


図 5-3-3 ニューラルネットワークの構成

### 5. 3. 3 CO抑制のための操作

過燃および悪化時のCO抑制の操作として検討したものを表5-3-1に示す。表5-3-1では垂直方向に操作量（1次空気流量、二次空気流量、給じん装置回転数、プラント水供給量）を掲げ、水平方向にCO発生要因の悪化、過燃の項を設けて、表中には操作量増減でのCO抑制効果を示した。空気流量、給じん装置の複合操作により、操作遅れの補償、確実性の向上を狙い操作方法を決定した。

表5-3-1 CO抑制操作

CO発生要因 操作		悪化	過燃
		急冷により反応凍結 高温での平衡組成ガス排出。	混合が一樣でなく、局部的に燃料過 濃ガス塊排出
1次空気量 Gal	増	層燃焼一時的に活発とし、層温 度(Ta) 燃焼室温度(Tc)上昇	温風air増によりガス混合を促し、か つO <sub>2</sub> 不足解消
	減	—————	—————
2次空気量 Ga2	増	—————	ガス混合を促し、かつO <sub>2</sub> 不足解消
	減	冷却用に効いていたGa2減分 Tc上昇	—————
給じん回転数 Gr	増	燃料切れ対策としての回転数 操作有効	—————
	減	—————	燃料過多防止効果あり
層内注水量 Gsp	増	COの酸化反応式(*)の水分項増に よる効果あり?	同左
	減	層温度上昇は期待できるが、熱容 量大のため速効は疑問	同左

### 5. 3. 4 実炉での適用結果

図5-3-4はファジィとニューラルネットワークによる予測、パターン燃焼制御を適用した実炉でのシステム構成を示す。ニューラルネットワークによるCO発生予測の妥当性確認のため、CO抑制運転試験での的中率を表5-3-2に示す。過燃・悪化時ともに的中率95%以上、誤報率10%程度を得ており、十分実用化が可能である。

表5-3-1の操作検討をふまえ、過燃および悪化時におけるCO抑制運転試験を行なった。

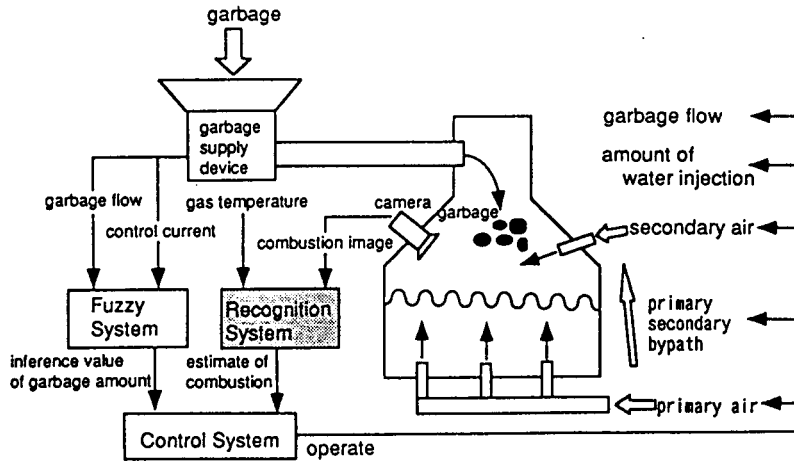


図 5-3-4 流動床ごみ焼却炉制御システム

表 5-3-2 ニューラルネットワークによるCO突変予測

	N N Signal	Hit Signal	False Alarm Signal	Actual Co Emergence	False Alarm Rate	Hit Rate
Over Combustion	42	37	5	38	5/42=11.9%	37/38=97.4%
Bad Combustion	13	12	1	12	1/13=7.7%	12/12=100%

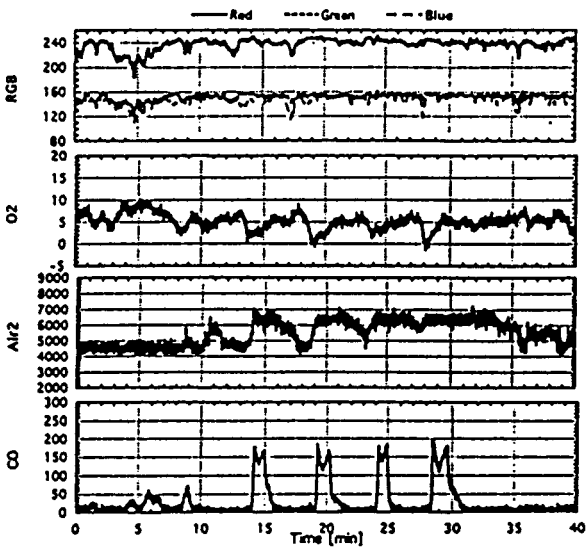


図 5-3-5 燃烧識別装置無し

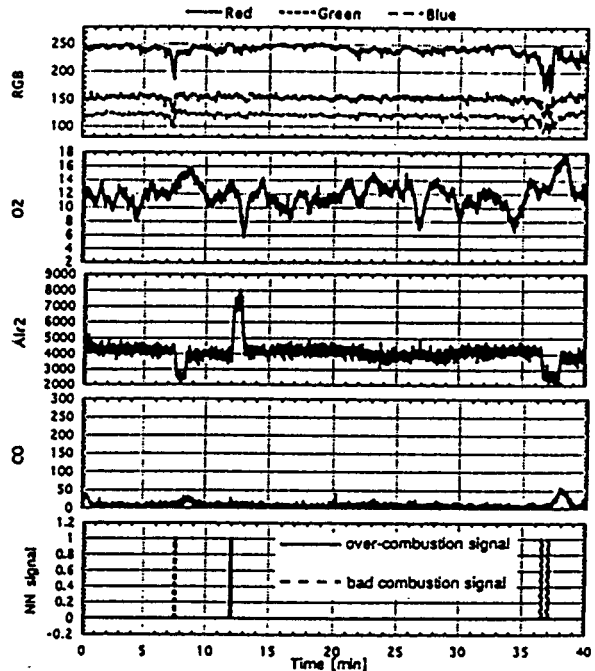


図 5-3-6 燃烧識別装置有り



燃焼識別装置での操作を行っていない場合の運転結果を図5-3-5に、操作を行った場合の運転結果を図5-3-6に示す。図5-3-6より、過燃および悪化の信号(NN signal)が出された場合、それぞれ対応した操作がなされる。過燃信号が発生したとき、O<sub>2</sub>濃度をみると大きく値が落ちており、確かに過燃の状態であったことが確認できる。この場合はCOは抑え込まれており、悪化の場合にわずかに発生した程度である。

また、NO<sub>x</sub>も静的条件、ごみ量推定に基づく給じん装置、空気量操作により、低レベルでの運転が実現されている。

#### 5. 4 記憶・識別処理によるスラグ流下状態評価手法の実現

第3章で述べた石炭部分燃焼炉を備えたプラントの自動運転において、信頼性確保の観点から重要なスラグ（溶融灰）流下状態監視システムの開発にあたり、スラグの流下状態を認識する手法としてニューラルネットワークを適用した結果について以下に述べる。

##### 5. 4. 1 スラグ挙動監視の必要性

石炭部分燃焼炉は運転制御の観点から以下のような課題がある。

- ・ 起動停止段階での自動運転機能
- ・ 制御量と操作量間の相互干渉
- ・ スラグ流下状態監視の自動化

これらの課題の内、起動停止における自動運転は、最新の計算機制御技術により全自動運転を実現している。（野添 9 1）また制御量と操作量間の相互干渉については多変数間の因果関係を制御則に展開容易なファジィ制御を用いて解決してきた。（宮本 9 1-2）スラグの流下状態の監視はプラントの自動運転を実現するために非常に重要であるが、スラグはプラントの運転状態や使用炭の性状に応じてその流動特性が変化するため、プロセス量によるスラグ流下状態の予測だけでは十分ではなく、現状ではスラグの流下状態の監視は目視に頼っており、スラグ状態を自動監視するシステムの開発が必要となっていた。本報では、以下にスラグ挙動の検討、および画像とプロセスデータを融合した自動監視システムの詳細について述べる。

## 5. 4. 2 スラグ挙動の検討

### 1) スラグとは

CPC炉で使用する石炭は主成分である炭素以外に、窒素、硫黄、灰分（不燃分）などを含んでおり、通常その性状は表5-4-1に示すように産地等により異なる。石炭が完全にガス化された場合、石炭中の可燃成分はCO、H<sub>2</sub>などのガスとなり排出されるが、灰分は熔融スラグとなりCPCで捕捉され、そのままでは炉内に滞留することになる。従ってCPCでは排出口からスラグを排出する必要がある。スラグは炉内の高温雰囲気のため熔融状態でこの排出口から排出されるが、表5-4-1に示したように石炭の灰分、流動点は炭種により異なり、それに加え温度などによりその粘度が変化するため、種々の炭種について同一の運転条件のままで安定してスラグを排出することは困難である。そこで、スラグ流下口の最適形状に対する検討（野添 91）などを行っており、静的状態での安定排出を実現してきた。

### 2) 炉内スラグの動特性シミュレーション

プラントの運転状態がスラグ滞留状態に与える影響を検討するために、燃焼炉内のエネルギーバランスによるスラグ挙動モデルを作成した。

モデルの構成図を図5-4-1に示す。

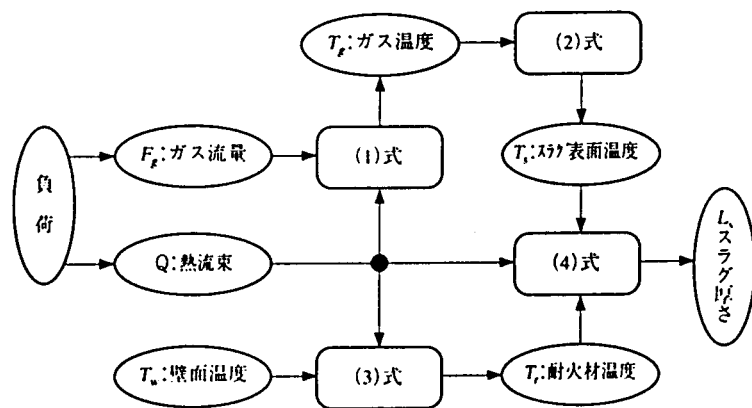


図5-4-1 スラグ挙動モデルの構成

炉内の燃焼過程において負荷によって決定されるガス流量 $F_g$ [Nm<sup>3</sup>/H]と熱流束 $Q$ [kcal/m<sup>2</sup>H]よりガス温度 $T_g$ [°C]は、

$$T_g = f(F_g, Q, T_a, S_w, C_{pg}) \quad (5-4-1)$$

但し、 $T_a$  : 断熱火炎温度[°C]

$S_w$  : 炉内壁表面積[m<sup>2</sup>]

$C_{pg}$  : ガス比熱[kcal/Nm<sup>3</sup>°C]

と表される。また、輻射伝熱計算よりスラグ表面温度 $T_s$ [°C]は、

$$T_s = g(T_g, \epsilon) \quad (5-4-2)$$

但し、 $\epsilon$  : 放射率[kcal/m<sup>2</sup>H°C]

となる。

耐火材温度 $T_r$ [°C]は、熱伝導式により熱流束 $Q$ と壁面温度 $T_w$ [°C]から、

$$T_r = h(Q, T_w, L_r, \text{Lamr}) \quad (5-4-3)$$

但し、 $L_r$  : 耐火材厚さ[m]

$\text{Lamr}$  : 耐火材熱伝導度[kcal/mH°C]

と表される。この $T_s$ 、 $T_r$ 、 $Q$ よりスラグ厚さ $L_s$  [m]は、

$$L_s = \text{Lams} * (T_s - T_r) / Q \quad (5-4-4)$$

但し、 $\text{Lams}$  : スラグ熱伝導度[kcal/mH°C]

と表される。

これらの関係式に加えてスラグの流動特性、灰分の捕捉率などを考慮したモデルに対して、石炭投入量の変動による運転負荷変動を与えたときのシミュレーション結果を図5-4-2に示す。

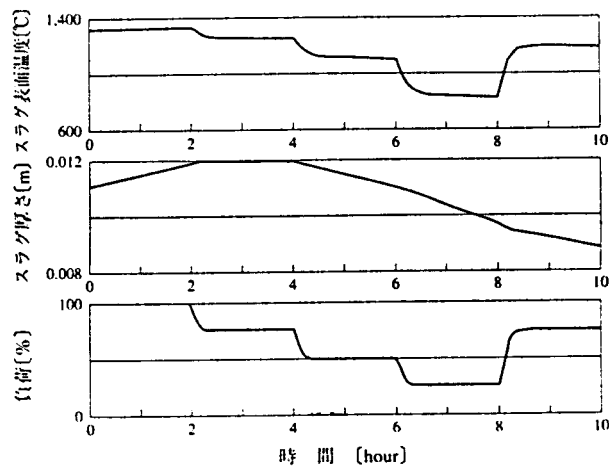


図5-4-2 スラグ挙動シミュレーション結果

図中から読みとれる様に運転負荷によってスラグ厚さは影響される。スラグ厚さの急激な変動はスラグ安定排出の外乱因子であり、スラグ安定排出のための適当な運転条件というものが存在することが分かる。しかし、スラグ特性はプラントの運転状態や使用炭の性状などの外乱因子の影響を受けるため、負荷変動を伴う運転状態でのスラグの安定排出運転条件の確保は困難である。

このように複雑な挙動特性を持ったスラグ流を監視する際、通常図5-4-3に示すようなプロセスデータを参考としながら主に画像によりスラグ流下状態の評価を行う。従って、自動監視システムにおいても画像情報から得たスラグ流の特徴量とプロセスデータを融合した形で利用することにより、有効なスラグ流下状態の評価を行うことが可能になる。本研究ではこの融合手法としてニューラルネットワークを採用した。

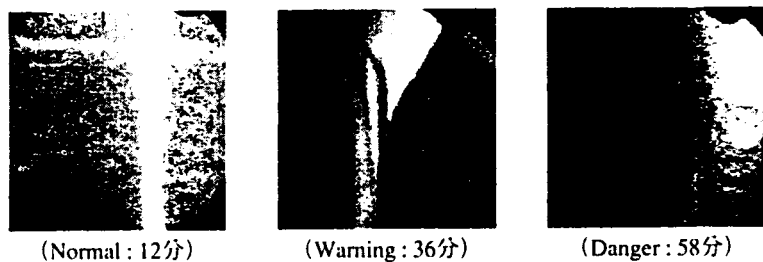
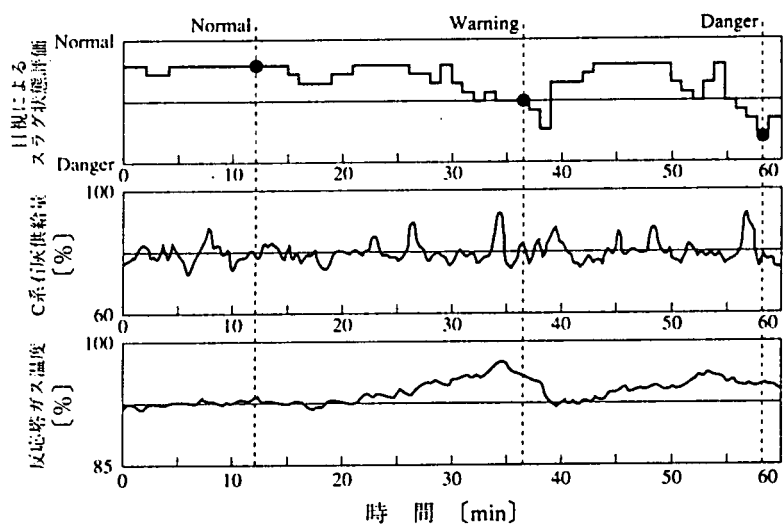


図5-4-3 スラグ流下状態の変化

#### 5. 4. 3 画像処理によるスラグ流下状態の特徴抽出

ここでは、スラグ流下状態画像を画像処理することによりスラグ画像の特徴を抽出する手法について述べる。図5-4-3からわかるように、正常なスラグ流下状態(Normal)と異常が見られるスラグ流下状態(Danger)、およびその中間的な状態(Warning)では、スラグ流れの形状、明るさ、流れの位置・動きなどが異なる。そこでこれらの特徴パラメータに着目して画像処理を行う必要がある。(小林 93)

また、スラグ流下状態画像には燃烧炎がスラグ流下口からもれてくるために生じるノイズが存在する。このノイズの明るさはスラグ部分と同程度であるためにスラグ流下状態画像を単に2値化しただけではスラグ部分だけを抽出することができない。しかし燃烧炎によるノイズの形状、大きさは流動的であり、非常に早い速度で変化する。したがってスラグ部分の状態変化が無視できる時間内の時系列画像を複数入力し、それぞれを2値化した画像をAND処理することで燃烧炎によるノイズを除去したスラグ部分画像が得られる。その後スラグ部分を抽出した2値画像およびグレイ画像から各特徴パラメータを測定する。

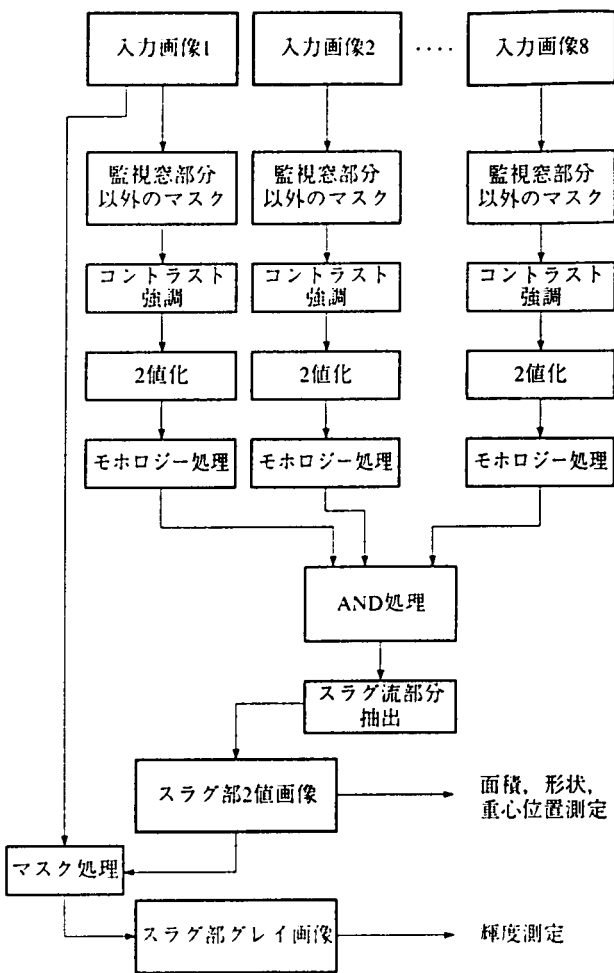


図5-4-4 画像処理フロー

図5-4-4に本研究で用いた

画像処理フローチャートを示す。入力する画像は1フレーム（33msec）の時間をおいた8つの時系列画像である。それぞれの入力画像について、スラグ流下状態監視用窓以外の部分の除去、ヒストグラム平滑化などによるスラグ部分と背景のコントラスト強調、判別分析法によるしきい値を用いた2値化処理、孤立点等のノイズ除去や形状補完のためのモロロジー処理を行う。そしてそれらの処理の結果生成された8つの2値画像をAND処理し、スラグ流下口を含むセグメントを選択することで入力画像からスラグ部分を抽出した2値画像が得られる。またそのスラグ部分2値画像で入力画像の中の1つをマスクすればスラグ部分グレイ画像が得られる。これらの画像から特徴パラメータとして、スラグ部分面積、輝度、形状、および重心位置を測定した。なお、形状としては図5-4-5に示すようにスラグ部分の上部、中部、下部の幅を測定した。

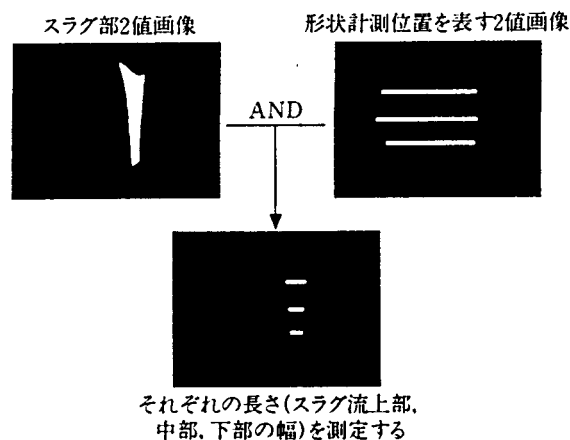


図5-4-5 スラグ形状の測定方法

#### 5. 4. 4 ニューラルネットワークによるスラグ状態認識

##### 1) ニューラルネットワークの適用 (安西 93)

本システムでは、画像情報やプロセスデータに内在するスラグ流下状態に関する情報をその評価に結びつける関数として、ニューラルネットワークを利用することを考えた。このような運用方法においてニューラルネットワークの持つ多変数非線形入出力関数獲得能力は非常に有効である。それに加え、その学習・汎化能力は燃焼等の不確定要素を内在するシステムのデータを利用する上で必要不可欠な要素である。

本システムで採用したニューラルネットワークは教師ありの階層型ニューラルネットワークである。実際に使用したネットワークの構造を図5-4-6に示す。全体は3層（入力層、隠れ層、出力層）からなり、各層はユニットと呼ばれる非線形入出力関数で構成されている。また、ユニットは各層間でリンクと呼ばれる情報伝達器で接続されている。ネットワークに入った入力を入力層のユニットに伝えられ、さらに隠れ層、出力層へと伝播し、最終的に出力層のユニットから出力される。

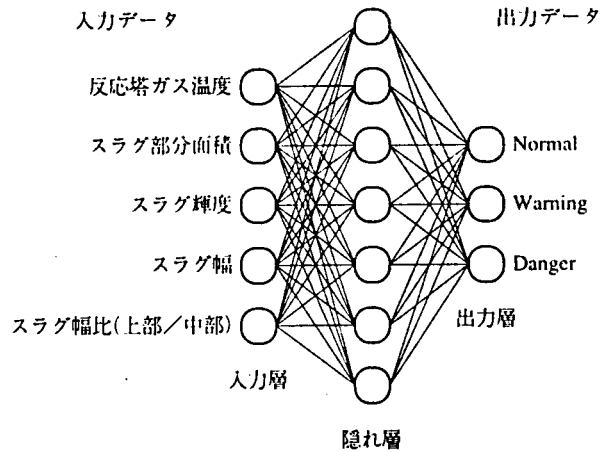


図5-4-6 ニューラルネットワークの構造

ネットワークの学習には、ある入力に対する所望（正解）の出力の組み合わせをあらかじめ準備し、このデータを教師としてリンクの伝達効率、ユニットの出力関数のパラメータなどのネットワーク内部パラメータを変更する。すなわち、教師入力をネットワークに入力した際の出力が教師出力に近づくように内部パラメータを更新する。この操作を複数の教師データに対して繰り返し行うことにより、所望の多変数非線形入出力関数を獲得することができる。

## 2) ネットワーク入出力の検討

本システムで採用したニューラルネットワークは、画像情報およびプロセスデータを入力とし、スラグ流下状態に対する評価を出力とする。具体的には先の図5-4-6に示した入出力を採用した。すなわち、反応塔ガス温度、スラグ部分面積、スラグ輝度、スラグ幅、スラグ幅比（上部/中部）の5種類の値を入力とし、Normal, Warning, Dangerを出力とする。出力は $0 \leq Y_i \leq 1$ の連続値をとり、それぞれ各出力に対応したスラグ流下状態の确实度を表

す。

### 3) Dempster & Shafer理論による情報統合

本システムにおいては燃料となる石炭の炭種変化や運転状態などによってスラグ特性が変化するため、評価結果の的中率が低下する可能性がある。そこで新しい状況に対応するためにオンラインでニューラルネットワークの学習を行い、評価結果の的中率を向上させる必要がある。しかし、オンラインで学習を行うには教師データが適正でなかった場合、ニューラルネットワークの学習が不完全となることが考えられ、新しく得たネットワークの挙動に対する信頼性に問題がある。

本システムでは図5-4-7に示すように各々、教師データの異なるネットワークを複数利用し、得られた複数の出力を統合することにより最終的な評価結果を決定する。ここで、各々のネットワークは過去の様々な時点のデータを教師として学習されており、統合した評価結果の的中率が低下した場合には、的中率の最も低いネットワークを、現在のデータで学習した新しいネットワークに更新する。これによりシステムを現在の状態に適応させることができ、評価結果の的中率を向上させることが可能となる。

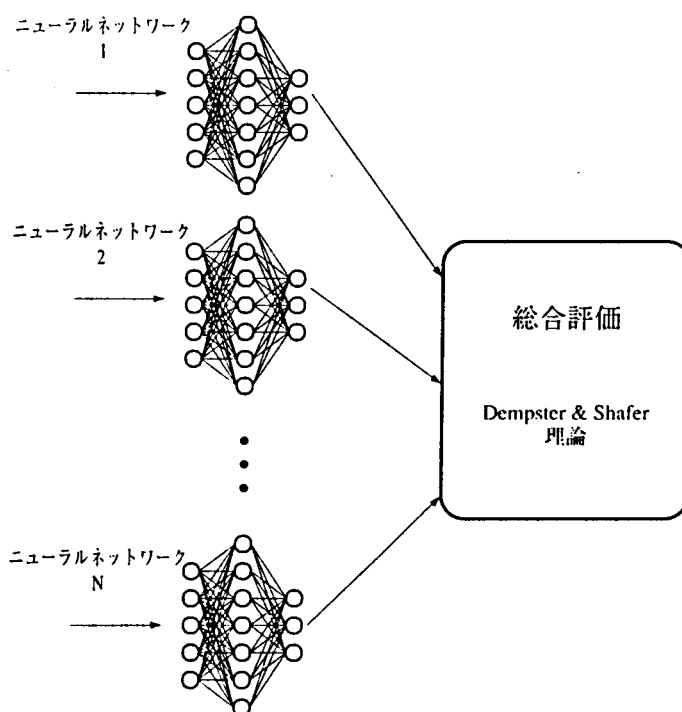


図5-4-7 DS理論による情報統合システム



本研究ではこの統合手法としてDempster & Shafer理論（以下，DS理論と略称）（石塚 83）を利用する。DS理論は「ある事象が確かである確率」と「確かであるか決めかねる確率」を計算するための理論である。通常確率理論では「決めかねる確率」は扱うことができないが，DS理論ではこれを積極的に利用することにより，より多くの情報に基づいた合成確率を導くことができる。

例えば，出力ユニットが3個であるN個のネットワークの出力についてDS理論を用いた情報統合を行うには次のように考える。まず，i番目のネットワークの3個の出力はそれぞれ事象A, B, Cの基本尤度 $p_i(A)$ ,  $p_i(B)$ ,  $p_i(C)$ を表すと考える。この基本尤度より基本確率 $P_i(A)$ ,  $P_i(B)$ ,  $P_i(C)$ ,  $P_i(A, B)$ ,  $P_i(A, C)$ ,  $P_i(B, C)$ ,  $P_i(A, B, C)$ を計算する。N個のネットワークから計算した基本確率より以下に示すDempsterの結合規則に基づいて合成基本確率 $P(A)$ ,  $P(B)$ , ...,  $P(A, B, C)$ を計算する。

$$P(E_u) = \frac{\sum_{E_s \cap E_t = E_u} P_i(E_s) P_j(E_t)}{1 - \sum_{E_s \cap E_i = \phi} P_i(E_s) P_j(E_t)} \quad (5-4-5)$$

但し，  $i, j$  : ネットワーク番号(1, 2, ..., N)

$E_s, E_t, E_u$  : 確率要素(A, B, C, (A, B), ..., (A, B, C))

合成基本確率より事象A, B, Cが解である可能性を表す指標である合成尤度 $p(A)$ ,  $p(B)$ ,  $p(C)$ を計算する。

$$P(F_t) = \sum P(E_s) \quad (5-4-6)$$

但し，  $E_s$  : 確率要素(A, B, C, (A, B), ..., (A, B, C))

$F_t$  : 確率要素(A, B, C)

本システムではこの合成尤度を評価結果として利用する。これにより，挙動特性の異なる複数のネットワークの出力を統合し，より多くの情報に基づいた評価結果を得ることができる。

#### 4) 認識結果

前述のDS理論によりニューラルネットワークの出力を統合した結果の例を図5-4-8に示す。(a)は入力したスラグ画像(Warning状態), (b)(c)はそれぞれ別のネットワークの出力, (d)はDS理論を用いて(b)(c)の出力を統合した例である。図から読みとれるように, (b)はWarningと評価しているのに対し, (c)はWarningかDangerか決めかねている。これを統合した(d)はWarningと評価している。このように, 挙動の異なる2つのネットワークの出力を統合することにより確実な評価結果を得ることができる。

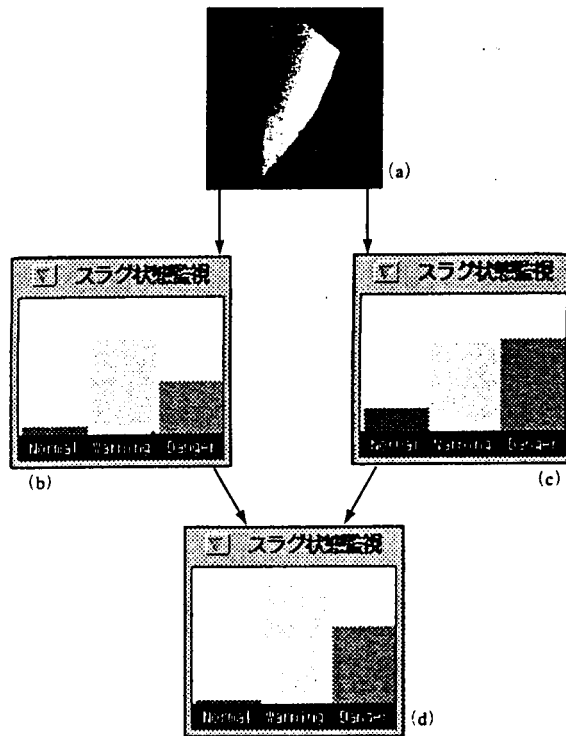


図5-4-8 スラグ状態認識結果

#### 5-4-5 CPC運転監視システム

CPC運転監視システムの構成を図5-4-9に示す。大きく分けるとデータロギング機能, リアルタイムデータ表示機能, 画像処理機能, スラグ流下状態評価・監視機能, 遠隔監視機能から構成されており, エンジニアリングワークステーション上で稼働する。また, 本システムにおけるユーザインタフェース画面の例を図5-4-10に示す。

##### (i) データロギング機能

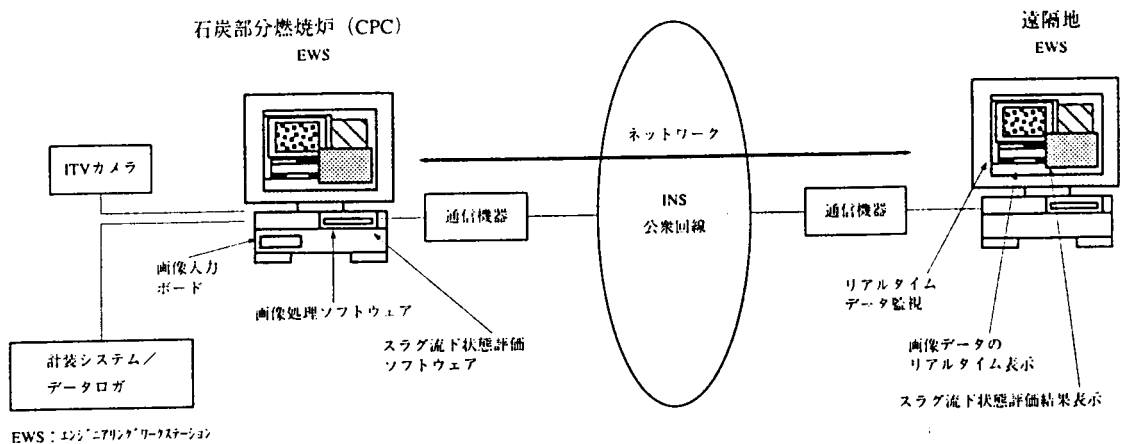


図5-4-9 CPC運転監視システム

計装システムに接続したデータロギング装置により、プロセスデータを計装システムからエンジニアリングワークステーションへ転送する。

(ii) リアルタイムデータ表示機能

データロギング機能により取得したプロセスデータを数値とトレンドにより表示する。また、過去のヒストリカルデータについても再生・表示する。

(iii) 画像処理機能

スラグ流下口付近に設置したITVカメラより得たスラグ画像を処理し、スラグ形状、スラグ輝度などの特徴量を抽出する。

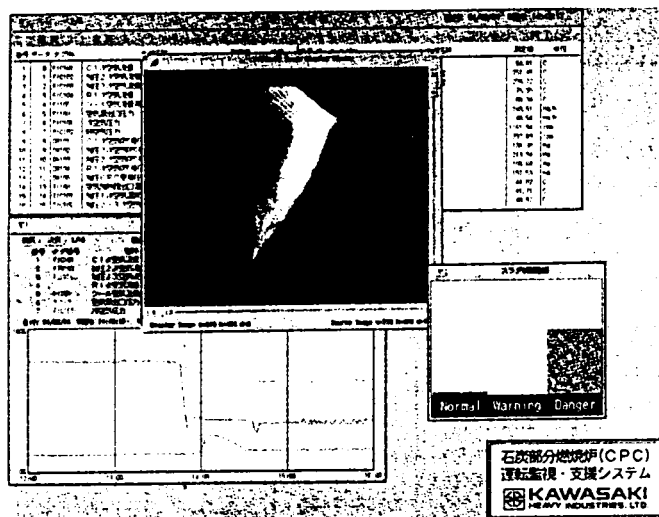


図5-4-10 ユーザインタフェース画面

(iv) スラグ流下状態評価・監視機能

ニューラルネットワークを利用したセンサフュージョンによりスラグの流下状態を評価する。評価結果を数秒毎にヒストグラムで表示する。

(v) 遠隔監視機能

プラント側で獲得した画像、プロセスデータ、スラグ評価結果等を公衆電話回線等の通信回線を利用して転送することにより、遠隔地における運転状態の把握を容易にしトラブルの早期発見、迅速対応に寄与している。

## 5. 5 関連研究との比較

モデリングは通常システム分析、構造同定、パラメータ同定、モデルの検証の手順を含んでいる。(相良 81) システム分析では、モデルの使用目的・要求機能の決定、システムと周辺環境との境界決定が必要である。構造同定では、システムの構成要素の決定と各要素間の相互関係の調査を進め、理論解析として、各要素に対して先験的知識、物理・化学法則などを適用してモデルを導く。パラメータ同定では、モデルに含まれた不確定要素(パラメータ)を、対象に関する実験データにより同定する。さらに、モデルの検証では、得られたモデルにより、シミュレーションを行いモデルと実システムとの対応を調べる。(橋本 89)

熱プラントの場合、構造同定が核となる作業であり、プラント製造メーカーが保有する対象に関する有用な知識を駆使して合目的で本質的な部分だけをモデル化し、かつ簡単なものとする必要がある。

特に、環境・エネルギー問題を背景として、モデリングへの要求は、熱プラント本来の効率や安全性のみならず、排出物や排ガスの性状特性の表現が重要項目となっている。こうした特性値を求めようとすると、直接計測できないため、定義式やエネルギーバランス式、マスバランス式を連立させた特性式群にプロセス計測値を入力し、未知数として求解することになる。入力としてのプロセス計測情報には計測遅れや外乱が重畳されているため、統計的な前処理を行った後、活用することが必要である。

さらに、プロセス計測情報により得られた特性値は、本来の物理・化学法則に基づいたパラメータ群にて表現し、一般化を行って設計、制御などの分野への展開を図ることで熱プラントの性能向上を可能とする。

## 5. 6 結言

熱プラントにおけるモデリングのアプローチを述べ、システム同定に重要なパラメータを計測信号と動的解析モデル、ニューラルネットワークを活用して推定する手法を提案し、流動床ごみ焼却炉を対象とした例で有用なことを示した。

流動床ごみ焼却炉における低CO・低NO<sub>x</sub>運転をファジィ、画像処理、ニューラルネットワークを用いた予測、パターン燃焼制御により実現した。

さらに、石炭部分燃焼炉のスラグ流下状態の自動評価をニューラルネットワークを利用したセンサフュージョンにより実現する手法を提案し、その実行結果について述べた。また、本手法を組み込んだ遠隔監視システムの構成について述べた。

筆者は約10年にわたって、知識応用システムの基礎的な研究開発からその製品への適用による各種システムの実用化・製品化に深く関わってきた。知識応用システムはニューラルネットワークを含めエキスパートシステムやファジィなど、従来の数値計算や記号処理の枠組みを越えた技術であり、その柔軟性や拡張性から注目され、多くの応用例が提案されてきている。しかし、まだ理論的に解明されていない点や方法論の確立していない点があり、現在進行形の技術である。従って、今後とも基礎技術も含めた研究開発を推進することにより、より一層実用的な知識応用システムの実現を目指していく必要がある。

## 参考文献

(安西 93) 認識と学習、岩波書店 (1993)

(Antoulas 93)、山本：ノイズを含むデータの静的同定—その概観、計測と制御、Vol.32, No.9, 1993

(石塚 83) "Dempster & Shaferの確率理論", 電子通信学会誌 [66] (Sep. '83) pp.900-903

(小林 93), 宮本, 西野, 尾関, 原田："画像処理によるスラグ流下状態評価手法", 第36回自動制御連合講演会 (Oct. '93) pp.383-384

(相良 81)、秋月、中溝、片山：システム同定、計測自動制御学会、1981

- (Cichocki 93)、R.Unbehauen:Neural Networks for Optimization and Signal Processing,Teubner-John Wiley,1993
- (野添 91)、伊藤,平尾,宮本,白羽,藤井,原田,岡崎:"石炭部分燃焼炉(スラッキングコンバスタ)の開発",川崎重工技報 [109] (Jan. '91) pp.12-21
- (橋本 89) 化学プロセスのモデリング、計測と制御,Vol.28,No.4,1989
- (宮本 91-1)、宮武,林,谷口:"ニューラルネットワークによる時系列データ予測",第30回計測自動制御学会学術講演会 (Jul. '91) pp.621-622
- (宮本 91-2)、山本,田中:"熱プラントへのファジィシステムの応用",日本機械学会ファジィ/ニューラルネットワークの機械システムのダイナミクスと制御への応用シンポジウム (Jul. '91)
- (宮本 95-1)、林、宮崎、小谷野、南部、豊嶋:ニューラルネットワークによる流動床産廃焼却炉の混焼率推定、第34回計測自動制御学会学術講演会予稿集 (1995)
- (宮本 95-2)、西野、小倉、井上、月本、澤井、南部、越田:流動床ごみ焼却炉向けAIビジョン装置の開発、第34回計測自動制御学会学術講演会予稿集 (1995)
- (宮本 96)、林、宮崎、小谷野:熱プラントの動特性解析とパラメータ推定、計測自動制御学会論文集、投稿中
- (Miyamoto 96)、K.Nishino,T.Sawai,E.Nanbu:DEVELOPMENT of 'AI-VISION' for FLUIDIZED-BED INCINERATOR,IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems,Dec.,1996、投稿中
- (矢木 58) 化学反応装置概論、新化学工学講座、日刊工業新聞社、1958
- (横山 92)、藤山、高田、宮本、下川:流動床炉のCO抑制燃焼技術、機械学会環境工学総合シンポジウム,1992

# 第6章 遺伝的アルゴリズムによる組合せ最適化とその熱プラントへの応用

## 6.1 緒言

遺伝的アルゴリズムGAは、自然界における生物の優れた進化のメカニズムを模擬するものであり、設計・計画問題における最適解探索の一手法として注目されている。(Goldberg 89)(北野 92) GAでは、まず様々な形質を持つ個体の集団を考え、各個体に対して評価値を求める。次に、その評価値に基づいて優れた個体を選択する。さらに、選択された個体同士の交差及び突然変異により、優れた形質の継承と新しい形質の獲得を行う。以上の一連の操作(世代交代)を繰り返し、最終的に優れた個体を獲得することを目標とする。

本研究では、電力プラントのNO<sub>x</sub>動特性モデルのパラメータ調整に遺伝的アルゴリズム(GA: Genetic Algorithms)を適用することにより、パラメータ調整の自動化を行う手法及び実行結果について述べる。(宮本 93)

近年、電力会社の中央給電指令所では、電力の系統需要を予測し最も経済的な負荷配分を計算して、各発電プラントに対して発電指令を送っている。発電指令の変動パターンによっては、プラントの各プロセスに与える影響が大きくなるため、各プロセス量の挙動を予測・制御することが非常に重要である。

本研究で対象とした電力プラントは、石炭焚きボイラでA~D段の給炭機が設置されている。定常運転時は4段全ての給炭機を使用して発電を行うが、発電指令が変化した場合、給炭機の台数を3段、2段へと切り替えることにより発電出力を調整する。発電出力の調整時において、NO<sub>x</sub>値が大きく変動する場合が発生した。このための検討としてプラントのNO<sub>x</sub>動特性モデルを構築し、シミュレーションを行うことによって、発電指令が変化した時のNO<sub>x</sub>値の挙動を予測した。

動特性モデルを構築する際、必ず直面する問題として、モデルのパラメータ調整を上げることができる。一般に、モデルのパラメータ調整は、シミュレーションの実行とパラメータの修正を繰り返すことにより行われる。しか

し、プラントのプロセス特性は常に一定ではなく、プラントの経年変化等により変化する。ゆえに、動特性モデルはプラントのプロセス特性の変化に対応して再度パラメータ調整を行う必要があり、パラメータ調整の自動化が望まれている。

## 6. 2 動特性シミュレーションにおけるパラメータ調整

対象としたNO<sub>x</sub>動特性モデルの構成を図6-2-1に示す。No<sub>x</sub>動特性モデルは基準No<sub>x</sub>テーブルに各補機類、分析系遅れ等を考慮した数式モデルで表現されており、連続系動特性シミュレーション言語：K S L（KHI Simulation Language）にて記述されている。基準NO<sub>x</sub>テーブルは、実験炉での運転実績から得られた実効空気比とT S（二段空気）比率から作成した。

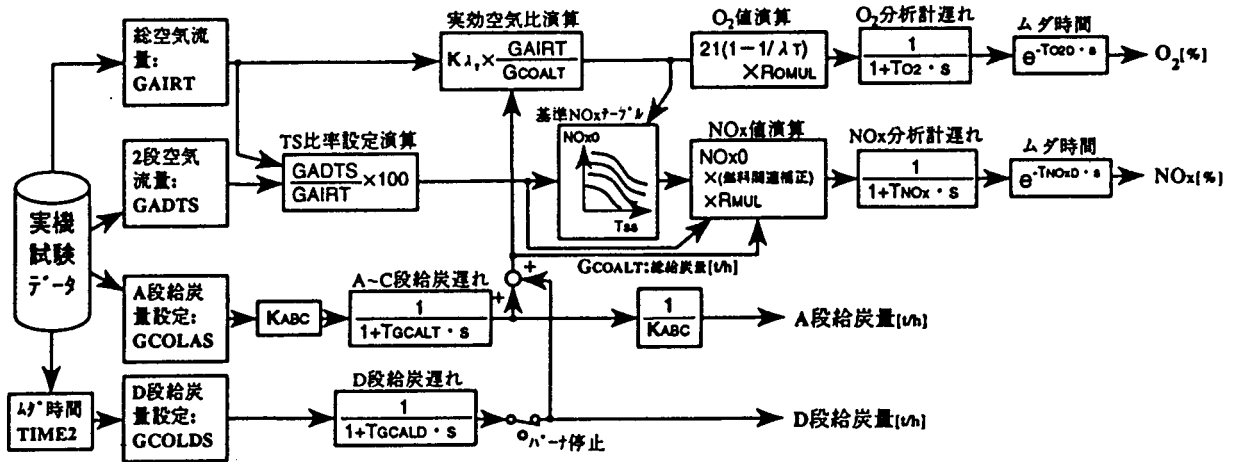


図6-2-1 NO<sub>x</sub>動特性モデルの構成

NO<sub>x</sub>動特性モデルのパラメータ調整は以下の手順で行う。

- (1) 実機試験データ及びNO<sub>x</sub>動特性モデルに必要なデータの入手
- (2) NO<sub>x</sub>動特性モデルによる動特性シミュレーションの実行
- (3) 実機及び動特性シミュレーションによるNO<sub>x</sub>値 波形の比較
- (4) 動特性シミュレーション結果に大きく影響するパラメータの抽出
- (5) NO<sub>x</sub>動特性モデルのパラメータの修正

通常、パラメータ調整は(2)~(5)の手順を繰り返し、試行錯誤することにより行われる。このような手順によって得られたNO<sub>x</sub>動特性モデルの入力例を



図6-2-2に示す。この時のシミュレーション出力と実機試験データを比較した例を図6-2-3に示す。横軸は基準時刻からの経過時間を、縦軸は各シミュレーション出力値を表す。シミュレーション出力は給炭機の台数変化に伴うNO<sub>x</sub>値の複雑な挙動をよく捉えており、実機試験データとほぼ一致している。しかし、このような試行錯誤による調整は、技術者の経験に依存しており、モデルの規模が大きい場合、最適なパラメータの探索に要する手間と時間が非常に問題となる。

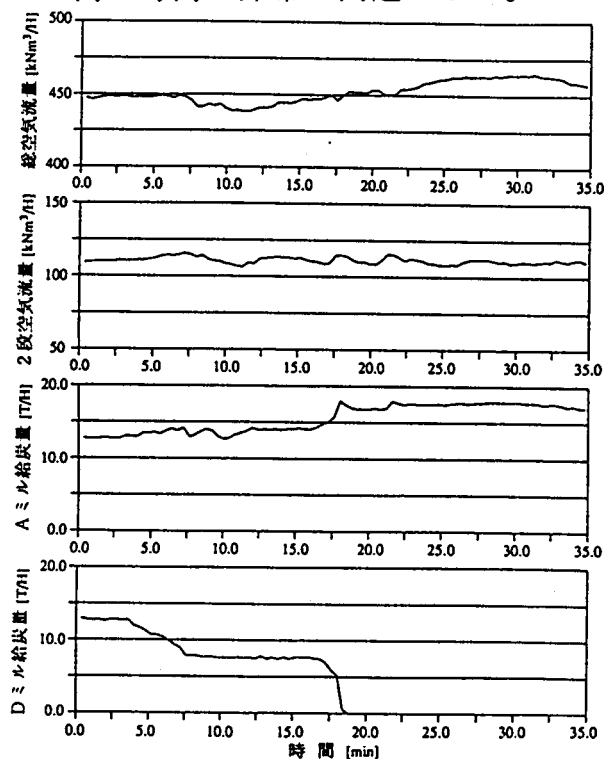


図6-2-2 NO<sub>x</sub>動特性モデルの入力

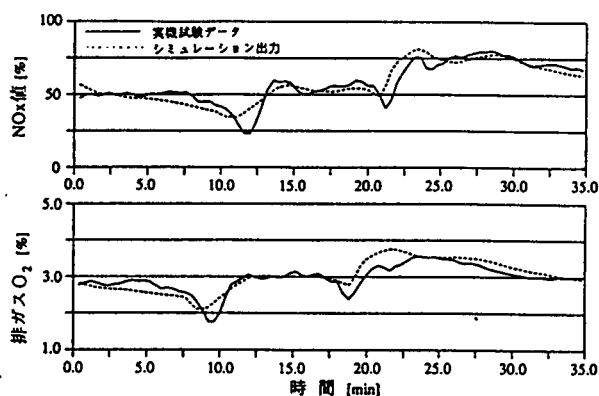


図6-2-3 NO<sub>x</sub>動特性モデルによるシミュレーション結果 (試行錯誤モデル)

## 6.3 GAの構成

### 6.3.1 集団の生成

集団は様々な形質を持つ複数の個体から構成される。通常、各個体の染色体は0、1の2値をもつ複数の遺伝子から構成されており、全体としてパラメータ値の組み合わせを表現する。個体の染色体の長さLは、パラメータの数をM、パラメータ値の分割数をNとすると(6-3-1)式により求められる。

$$L = M \times \log_2 N \quad (6-3-1)$$

ただし、Nは2のべき乗である。

また、この染色体により表現されるパラメータの組み合わせの種類は(6-3-2)式により求められる。

$$K = NM \quad (6-3-2)$$

ここで、パラメータ数が3であり、パラメータ分割数が4である場合の個体の遺伝子の例を図6-3-1に示す。

集団を構成する個体数やパラメータ分割数は、多いほど探索精度や探索効率が向上し新形質を獲得する可能性が増加するが、同時に処理時間の増加を伴う。ゆえに、個体数やパラメータ分割数は、要求される探索精度や探索時間を考慮した上で設定する必要がある。

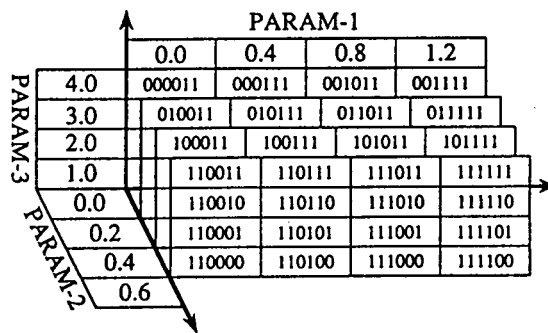


図6-3-1 個体の染色体の表現例

### 6. 3. 2 個体の評価

各個体は、現在の状態が目標とする状態（最適解）にどの程度近づいているかを表す適応度  $f$  を求めることにより評価される。適応度  $f$  の求め方は対象とする問題によって異なるが、今回のような動特性モデルのパラメータ調整問題の場合、比較区間  $(T_{start}, T_{end})$  における実機試験データ  $Y(t)$  とシミュレーション出力  $y(t)$  の自乗誤差  $err(t)$  の逆数の総和により求める。

$$f_i = \int_{T_{start}}^{T_{end}} \frac{1}{err(t)} dt = \sum \frac{1}{\{Y(t)-y(t)\}^2} \quad (6-3-3)$$

すなわち、個体の適応度  $f$  が大きいほど最適解に近いと考えることができる。

### 6. 3. 3 遺伝子操作

遺伝子操作は世代交代による進化の過程を実現する方法でありGAの最大の特徴である。ゆえに、遺伝子操作の仕様によってシステムのパフォーマンスが決定される。遺伝子操作は大きく分けると、選択、交差、及び突然変異に分けることができる。

### 1) 選択

選択とは交差を行う組み合わせを決定する操作である。選択を行う方法として適応度比例戦略がある。適応度比例戦略はルーレットモデルとも呼ばれ、各個体の適応度にほぼ比例した確率で次の世代に子孫を残す方法である。

まず、全ての個体に対して各個体  $i$  の適応度  $f_i$  より選択確率  $P_i$  を求める。

$$S_j = \partial f_i / \partial x_j \quad (6-3-4)$$

ここで、 $n$  は 1 集団あたりの個体数である。

さらに、各個体の選択確率に応じた確率で選択を行うランダム発生器（ルーレットホイール）により、交差を行う組み合わせを決定する。ルーレットホイールの例を図 6-3-2 に示す。図 6-3-2 は 1 集団あたりの個体数が 4 の場合であり、0 ~ 1 の値をとるルーレットの停止した地点の個体を選択する。この操作を個体数だけ繰り返すことによって交差を行う個体を選択する。選択確率の大きな個体は複数回の交差に参加するので、その遺伝子は次世代に継承される可能性が大きくなる。選択の方法にはこのほかに、集団中で適応度が最大の個体をそのまま次世代の集団に残すエリート保存戦略などがある。

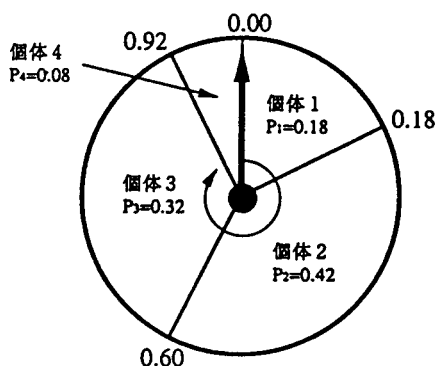


図 6-3-2 ルーレットホイール

### 2) 交差

交差とは2つの個体の染色体を組み替える操作である。交差を行う方法として単一交差がある。ここで、単一交差の例を図6-3-3に示す。図6-3-3のように単一交差では、染色体の任意の位置に交差位置を設定し、交差位置の前後で遺伝子を交換する。これにより、優れた親の形質が次世代に受け継がれる。交差の方法にはこのほかに、複数交差や一様交差などがある。

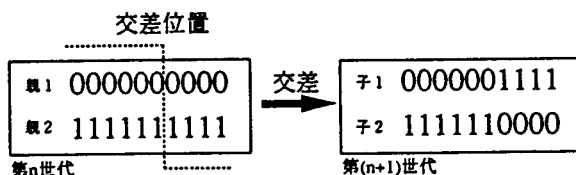


図6-3-3 単一交差

### 3) 突然変異

突然変異とは個体の遺伝子を一定の確率で変化させる操作である。選択と交差のみで優良形質の獲得及び新形質の獲得は可能ではあるが、突然変異を行わなければ局所解に陥る可能性が大きくなる。ゆえに、突然変異を行うことにより探索範囲の拡大と局所解からの脱出を図る必要がある。

### 4) 集団の評価

集団の評価は平均適応度  $F$  により行う。平均適応度は各個体の適応度  $f$  の平均値として求める。

$$P_i = f_i / \sum_{i=1}^n f_i \quad (6-3-5)$$

ここで、 $n$  は1集団あたりの個体数である。

世代交代は平均適応度  $F$  が設定値より大きくなった時点、あるいは変化しなくなった時点で終了する。

## 6. 4 GAによるパラメータ調整方法

本研究では、先に示したNOx動特性モデルのパラメータ調整にGAを適用した。自動調整を行ったパラメータについて表6-4-1に示す。表に示したように、パラメータ数は7であり、パラメータ値は最大値と最小値の範囲

内で調整される。ここではパラメータ値として探索範囲を8分割した各区間の中心値を用いた。各個体の染色体の長さは(6-3-1)式より21であり、各個体は21個の遺伝子によって表現される。また、この時のパラメータの組み合わせは(6-3-2)式より約200万(=8<sup>7</sup>)通りであり、試行錯誤による調整は非常に困難である。初期集団(第0世代)に用いるパラメータの値は、各パラメータの探索範囲内の任意の値とし、集団を構成する個体数は10とする。

表6-4-1 パラメータリスト

番号	略称	名称	最小値	最大値
1	TIME2	D段給炭量設定からのむだ時間	0.6	1.0
2	TGCALT	A~C段給炭遅れ時定数	1.0	3.0
3	TGCALD	D段給炭遅れ時定数	0.8	2.8
4	TNO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub> 分析計遅れ時定数	0.5	1.5
5	TO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> 分析計遅れ時定数	0.5	1.5
6	TNO <sub>x</sub> D	NO <sub>x</sub> むだ時間	2.0	4.0
7	TO <sub>2</sub> D	O <sub>2</sub> むだ時間	0.3	0.9

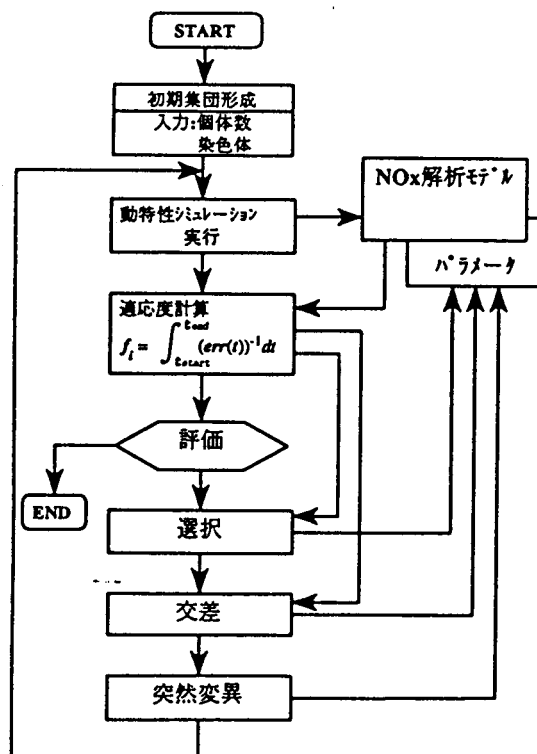


図6-4-1 GAによるパラメータ調整の処理手順

パラメータ調整の処理手順を図6-4-1に示す。まず初期集団を生成し、そのパラメータを用いてシミュレーションを実行する。次にシミュレーション出力と実機試験データより各個体の適応度を計算する。集団全体の適応度の値を用いて終了判定を行う。世代交代を続行する場合、遺伝子操作を行い次世代集団を生成する。このパラメータを用いてさらにシミュレーション、評価、世代交代を繰り返す。

## 6.5 関連研究との比較

先に述べた方法によりNO<sub>x</sub>動特性モデルのパラメータ調整を行った。世代交代による平均適応度Fの推移を図6-5-1に示す。横軸は世代番号（世代交代の回数）を、縦軸は集団の平均適応度を表す。図のように約8回の世代交代により、平均適応度は初期集団の約2倍になった。

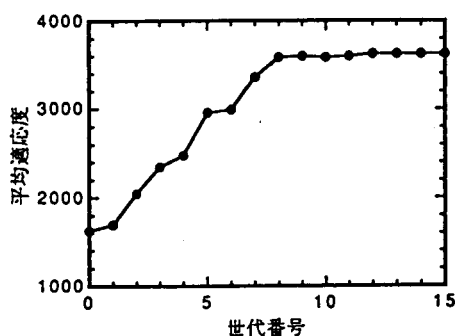
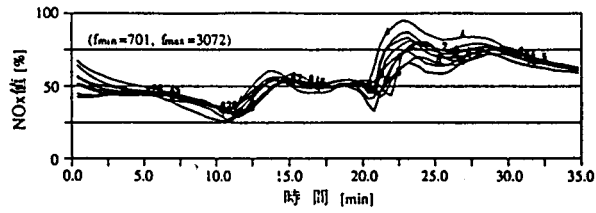
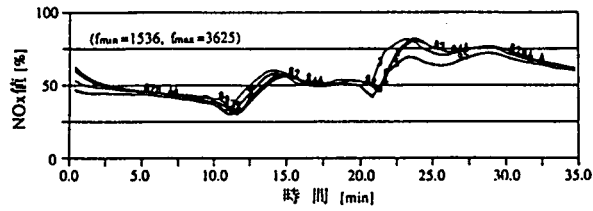


図6-5-1 集団の平均適応度の推移

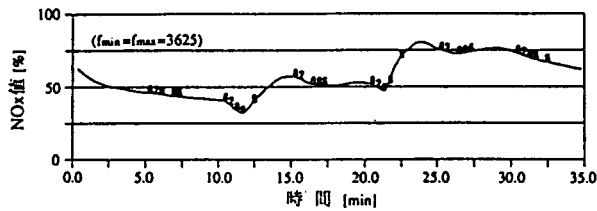
ここで、初期集団（第0世代）、第5世代、及び最終集団（第15世代）の集団のパラメータを用いた場合のシミュレーション出力を図6-5-2に示す。初期集団では各個体の適応度が701~3025の間に分散していたが、世代交代を行うことにより最終集団では全ての個体の適応度が3625に収束した。このことから、世代交代を行うことにより、優良形質の継承及び新個体の獲得が行われたことがわかる。また、最終集団のパラメータを用いたシミュレーション出力と実機試験データを比較した結果を図6-5-3に示す。自動調整したパラメータによるシミュレーション結果（図6-5-3）は、試行錯誤により調整した場合（図6-2-3）と比較すると、NO<sub>x</sub>値の複雑な挙動をよりよく捉えている。このことは、今回のようなパラメータ調整問題にGAが非常に有効であることを示している。



(a) 第0世代 (初期集団)



(b) 第5世代



(c) 第15世代 (最終集団)

図6-5-2 シミュレーション出力の推移

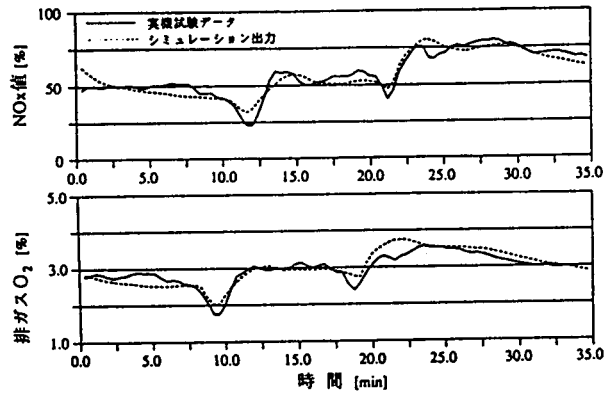


図6-5-3 NO<sub>x</sub>動特性モデルによるシミュレーション結果

## 6.6 結言

本研究で得られた結果より、動特性モデルのパラメータ調整にGAを適用することの特長として以下のことが挙げられる。

(1) 複数のパラメータに対する探索の組み合わせ爆発を防止することができる。

(2) GAは人間が自然に行っている選択・更新の処理をよく似たアルゴリズムで表現し、自動処理することができる。

(3) 突然変異は他の最適化手法にない解領域の拡張が行える。

今後の課題としては以下のことが挙げられる。

(1) パラメータの解があらかじめ与えられたいくつかの種類の中で選出されるため、厳密な求解を行うためには個体の表現を工夫する必要がある。

(2) GAによる求解探索の結果に対する評価を汎用的に行える方法を考案する必要がある。

(3) より大規模なモデルに対して試行・評価を行う必要がある。

#### 参考文献

(北野 92) 「遺伝的アルゴリズム」, 人工知能学会誌, Vol.7, No.1, p.26-37, (1992)

(Goldberg 89) "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-Wesley, (1989)

(宮本 93)、宮武、黒坂、森：遺伝的アルゴリズムによる電力プラント動特性シミュレーションの調整法、電気学会論文集D, 113巻12号(1993)



## 第7章 結論

本研究はファジィ、AI、ニューロ、GAからなるインテリジェントシステムのプラント制御への応用に寄与することを目標に実施したものである。以下では、本研究の総括と今後の展望について述べる。

本研究で実施したインテリジェントシステム構築技術のFANG技術と従来からのシステム制御技術を支える制御理論との機能比較を表7-1に示す。従来からのシステム制御技術は、対象とする問題をコンパクトに数学モデルで表現することをその基本としており、そのため産業応用に必要とされる実時間性についてもマイクロコンピュータ環境で充分実用性を獲得することができ大いに産業界に貢献してきた。しかし、従来からのシステム制御技術では以下の点の問題が存在する。

- 1) 問題の記述範囲が狭い：線形問題を中心課題として体系の整備がなされたため、産業応用で必須とされる非線形領域などの実用問題への制御理論の適用は制限されることが多かった。
- 2) 人間が特長とする予測能力と適応能力を取り入れる柔軟性：数式表現を基本とするため、言語表現された専門知識や現場での経験などを吸収する柔軟性に難点があった。また、適応制御や学習理論も記述された数式の範囲に限定された理論先行型であり、産業応用の立場からは有用性を欠くものであった。
- 3) 最適化能力を持たない：オペレーションズリサーチなどの最適化手法はダイナミクスを考慮しない体系であり、システム制御分野からは実用する際に限定された領域の問題にしか適用し得ないものであった。

FANG技術に代表されるインテリジェントシステム構築技術は、表7-1のようにシステム制御技術の問題を解決する可能性を秘めており、例えば、非線形領域問題にはファジィ、ニューラルネットワーク、GAを用い、専門知識やヒューリスティックスの吸収にはAI、ファジィ、学習や最適化にはニューラルネットワークやGAを用いて問題解決を図ることが考えられる。しかし、インテリジェントシステムのプラント制御への応用を考える上では、従来からの

システム制御技術との融合を図り、有用性を確認した上で適用を図って行くことが必須である。

表 7-1 インテリジェントシステム構築技術の機能比較

機能 技術	実時間	数学 モデル	非線形	専門 知識表現	現場 ヒューリスティクス	学習	最適化
制御理論	◎	◎	×	×	△	×	×
ファジィ	◎	○	◎	△	◎	×	×
AI	×	△	△	◎	◎	×	×
ニューラル ネットワーク	◎	×	◎	×	×	◎	○
GA	△	×	◎	×	×	◎	◎

凡例 ◎：最適 ○：適 △：問題あり ×：不適

こうした問題点に対する解決策として、本研究では以下の手法を提案し、産業上の実問題で適用し考察することでその有用性と限界を示した。

1) モデルベースインテリジェントファジィシステム：専門知識とは設計段階での数式群であり、現場ノウハウとは経験に基づいたルールである。したがって、こうした設計数式群をシステム制御の立場から考察、導出を行ってファジィシステムの基本ルール、セル構造の決定に展開した。さらに、ノウハウルール群を基本ルール群に付加させてより有用なものとする手法を提案し、非線形性や非定常性が強い悪構造問題である流動床ごみ焼却炉、石炭部分燃焼炉の熱プラント分野での実問題に適用した。

2) 汎用エキスパートシステム構築ツールKIS：専門知識表現や現場ノウハウは言語表現されるのが通常である。エキスパートシステムは、こうした言語表現知識をコンピュータ上にて活用することを可能とする技術であり、システム制御技術分野の対象領域を拡大するのに有用である。本研究では汎用エキスパートシステム構築ツールとしてKISを開発し、機械装置の故障診断

やプラントの運転支援の分野で実用化した。さらに、エキスパートシステム構築技術で課題とされている知識獲得の分野で、信頼性解析手法であるFMEAを拡張して拡張FMEAを構成しそこから知識ベースの自動生成を行う手法を提案した。そして、この手法を航空機の整備支援システムに適用し有用性を示した。

3) ニューラルネットワークによる記憶・識別機能：インテリジェントシステムのプラント制御への応用の立場から要請が強い機能として、教示学習効果による記憶・識別機能の自動手順確立である。本研究では、ニューラルネットワークを用いてこれを実現し、画像処理技術との融合による燃焼判断、パターン識別に実時間問題として適用し有用性を示した。

4) GA、計画型KISによる最適化問題解法：最適化問題はコンピュータを活用したシステム制御分野でも最重要課題であるが、本研究では問題規模に応じた手法の適用を考案した。すなわち、比較的実時間性を要求するスケジューリング問題には制約指向のヒューリスティクスを表現できる計画型KISを用い、シミュレーションでのパラメータ調整などの繰り返し計算を要求される最適化問題では遺伝的アルゴリズムGAの適用が有用なことを示した。

以上のように、本研究ではインテリジェントシステムのプラント制御への応用における課題とその解決策としてのインテリジェントシステム構築方法と、その有用性を実用問題に適用することにより示した。これにより、本研究の目標とした、インテリジェントシステムのプラント制御への応用に寄与できたものとする。

残された課題と今後の展望としては以下があげられる。

1) 今後、さらなるインテリジェント化を図るシステム構築を行うためには、目標をシステム自ら創出し、それを達成する制御手段を選択し、さらに制御結果を予測して適応を図る必要がある。そのためには、図7-1のようにインテリジェントシステム構築技術の複合化を行い対象に応じたシステム化が必要である。

2) 第2章では、FANG技術のインテリジェントシステム構築技術としての得失を明確としたが、インテリジェントシステムが産業応用として浸透していくためには、人間との共生が必須であり、オペレータインタフェースと

してマルチメディア技術を活用した統合化が課題である。

3) 第3章では、熱プラントを対象に悪構造問題でのファジィシステムの有用性を示したが、数学モデルを補完する形でのファジィ表現であり、両者を悪構造問題へ適用を図るアプローチの体系的な整理は今後の課題である。

4) 第4章では、航空機を例としてエキスパートシステムでの知識ベースが設計段階での検討作業から自動生成できることを示したが、運用後の事例ベースとの融合をどう対処するかが課題である。

5) 第5章では、ニューラルネットワークの収束性とセル構造の設定を実用問題として如何に設計指針を与えるかが課題である。また、対象問題の大規模化に対応して、センサ融合を図る必要性に対してニューラルネットワークの活用が課題である。

6) 第6章では、遺伝的アルゴリズムGA単独ではなく他の最適化手法との複合化により問題解決を図る手法の確立が課題である。

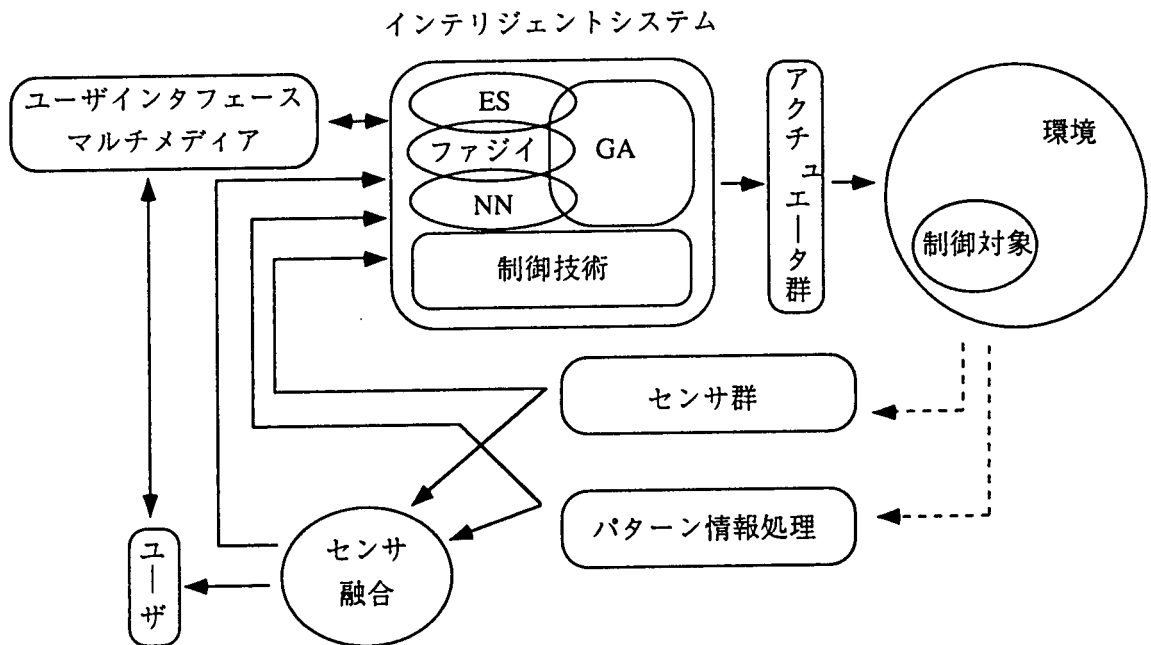


図7-1 インテリジェントシステム構築技術の複合化

# 謝辞

本研究を遂行するにあたり、終始温かいご指導とご鞭撻を賜りました神戸大学工学部情報知能工学科、高森年教授に心から感謝致します。

本研究の主題としましたインテリジェントシステムの方向付けをご指導頂き、また、本論文をまとめるにあたりましても有益なご助言を賜りました神戸大学工学部情報知能工学科、北村新三教授に心から感謝致します。

本論文をまとめるに際して、貴重なご助言を賜りました神戸大学工学部情報知能工学科、赤澤堅造教授にお礼申し上げます。

筆者が神戸大学在学中から、終始温かいご指導を頂き研究姿勢についてご鞭撻を賜りました米持政忠先生、木村一郎先生にお礼申し上げます。

本研究の機会をお与えくださり、終始温かいご指導とご鞭撻を賜りました川崎重工業株式会社電子・制御技術開発センター黒崎泰充センター長、伊藤憲治氏、三橋寛治応用技術部長、三隅隆也部長に感謝致します。

また、本研究の応用に関して積極的に供に考え、供に行動していただいた川崎重工業株式会社産機プラント事業部尾崎賢二部長、吉村孝課長、庵原滋課長、環境装置事業部横山賢一部長、藤山博部長、南部栄一郎課長、湯浅健司課長、豊嶋則雄氏、航空機事業部坂川典正部長、山田幸宏氏、ボイラ事業部田中信二部長、宮武達也課長、梅木徹也氏、原動機事業部稲垣雅也部長、井上基広氏、明石技研堺邦益課長、堤香津雄課長、原田英一係長、精機事業部田村範夫課長、黒瀬憲雄氏、岐阜技研加藤正義部長、尾関修一郎氏、船舶事業部福田俊一郎課長に感謝致します。

さらに、本研究を遂行するにあたり、有益な助言と討論を頂いた川崎重工業株式会社電子・制御技術開発センター応用技術部AIシステム課の西野公祥係長、林正人係長、小林政巳氏、森芳信氏、澤井恒義氏、宮崎英隆氏、橋寺晋氏、松井健一郎氏、小谷野薫氏、日隈克敏氏、加藤幸二氏、片岡幹彦氏に感謝致します。



パートシステムまで、システムの成長に応じてエキスパートシステム構築ツールの拡張も容易なように考慮されている。

### 1. 汎用エキスパートシステム構築ツール「K I S」の開発

K I Sシリーズの仕様を付表1に示し、その開発経緯について以下に述べる。

付表1 KISシリーズの仕様

開発ツール名称	KIS-I	KIS-II	KIS-III
計算機	16ビットパソコン ×2台	32ビットパソコン (ラップトップも可)	32ビット ワークステーション
プログラム言語	LISP BASIC	LISP C	LISP PROLOG C
知識表現	プロダクション型 (IF~THEN~形式) 確実度付	プロダクション型 +フレーム型 確実度付	プロダクション型 +フレーム型 確実度付 ファジィ
推論方式	前向き・後向き	前向き・後向き	前向き・後向き
説明機能	有	有	有

#### 1) K I S-Iの開発 (川重 88)

エキスパートシステムを実用化しようとする、日本語の使用が不可欠である。「K I S」の開発開始時点では、大型機・工業用ミニコンでの日本語対応は不十分であり、日本語対応が可能なパーソナルコンピュータでの構成が最適であった。

エキスパートシステムは、推論部とマンマシン部に大別できる。推論部は汎用化が可能であり、記号処理に適したL I S P言語にて開発し、マンマシン部については対象ごとに仕様が異なるため、利用者が容易にプログラムを作成できるB A S I C言語にて開発できるようにした。

実機レベルのルール数・処理速度に対応するため、K I S-Iでは2台のC P U構成とし、推論部側には高性能C P Uボードを搭載し、大容量主記憶装置・高速処理を可能とした。これにより、実用上十分なルール数・処理時間にも対応できるようになった。

また、ルール数の増大に対応してルールの管理・更新が容易なように、

データベース言語を用いて知識ベース開発・管理機能を実現した。

## 2) K I S-I I の開発

しかし、パソコンの普及と高性能化により、導入用として、あるいは実用機としても1台システムに対する要求が根強くなってきた。そのため、従来用いていたL I S P言語での推論部構成を見直し、L I S P言語自体をC言語にて作成し、推論機能に必要な最小構成が可能ないようにした。これにより、推論部のメモリ消費を押さえて、かつ高速化が可能となった。

## 3) K I S-I I I の開発

ここ数年来、国内において普及が著しいエンジニアリング・ワークステーションを用いて開発した。エンジニアリング・ワークステーションの特長として、マルチウィンドウに代表されるマンマシン機能の従来計算機からの改善と、マルチタスク、仮想記憶機構による大容量プログラムの並列処理が可能なが挙げられる。これらの特長は、人工知能応用分野の中での診断・監視・制御・計画・データの解釈などを融合した運転支援システムの要求に合致するものである。

## 2. K I S の機能構成

開発した汎用エキスパートシステム構築ツール「K I S」の機能構成を付図2に、特長を以下に示す。

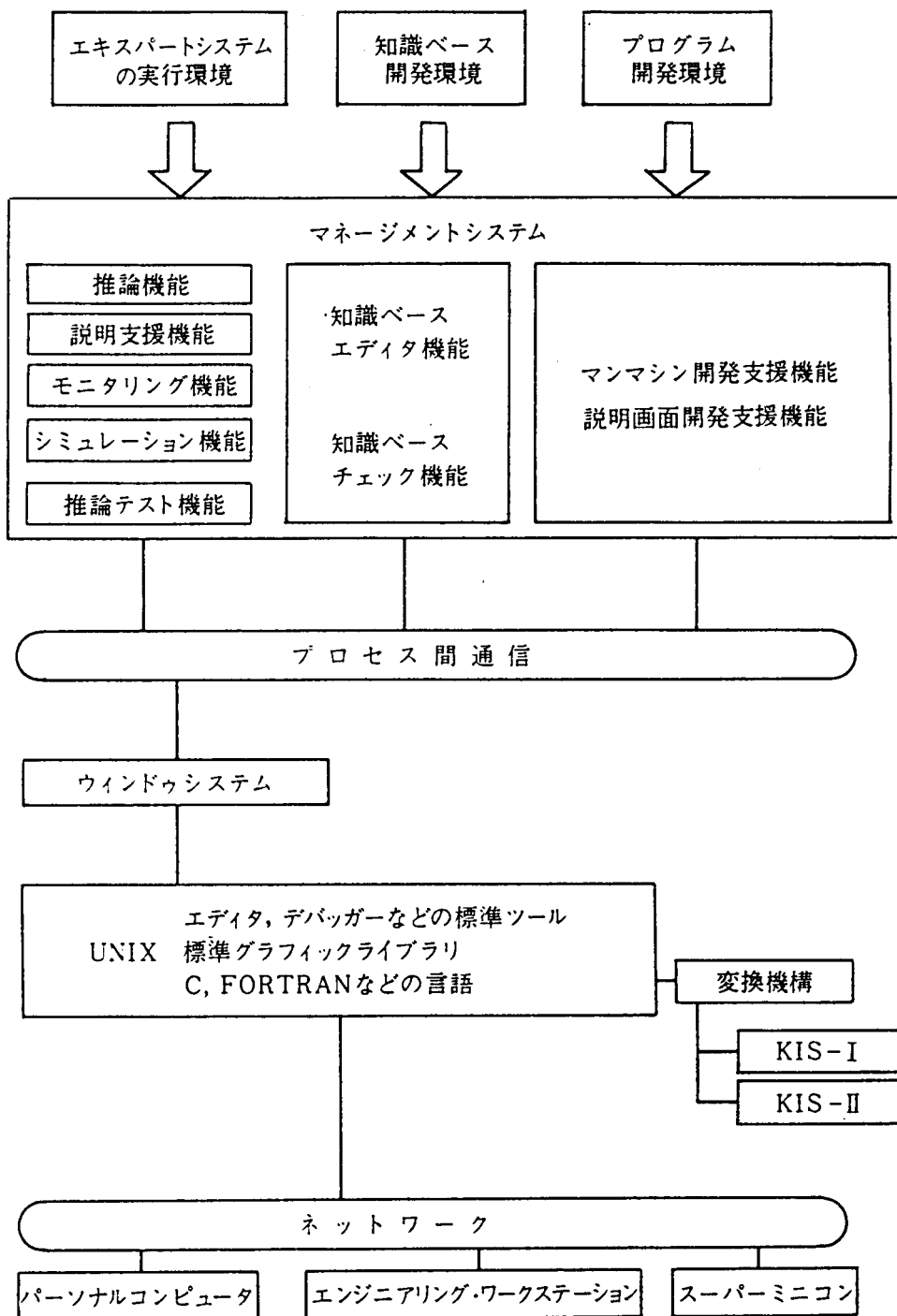
### 1) エキスパート自らが開発できる使いやすい構築ツール

エキスパートシステムの開発は、研究・開発・設計に携わっている技術者や対象プラントの運転に関する専門家すなわち対象分野のエキスパート自らが行き、そのためにエキスパートシステム構築ツールがあるとの認識のもとに、計算機に不慣れな技術者であっても開発が容易なシステムとなっている。

### 2) コストパフォーマンスに優れたシステム構成

ワークステーションは、低級機から高級機まで原則として同一のソフトウェア体系にあるため、要求仕様に応じた機種を選択することが可能である。また、基本的にK I Sを構成するソフトウェアは、U N I Xの標準言語やユーティリティを活用して開発しているため、コストパフォーマンスに優れている。





付図2 KISの機能構成

### 3) ネットワーク機能の有効活用

ネットワーク機能を活用することにより、障害の発生やユーザからの質問に対応するために、現地における調整の前段階として遠隔地からのオンラインによるメンテナンスやモニタリングを可能とする。また、パーソナルコンピュータとネットワーク結合することにより、その種類が豊富で広く普及しているハードウェア・ソフトウェアの利用が可能となっている。

### 4) K I Sシリーズでの知識ベースの互換性の確保

知識ベースシステムの構築にあたっては、知識の継承が重要である。これまで、K I S-I、I Iを利用して開発した診断型の知識ベースをK I S-I I Iにおいても利用できるように知識の継承が可能となっている。

## 3. K I Sの機能概要

### 1) 知識ベース開発支援機能

#### (i) 知識ベースエディタ機能

知識表現として、プロダクションルール、フレーム、ファジィ論理をサポートしており、各知識表現に適した開発支援機能を持っている。基本的には、各知識表現とも計算機に標準で持っているテキストエディタを利用して入力できるが、計算機に慣れていない技術者や運転に関する専門家でも利用しやすい環境とするためには、表形式の入力機能を用意することが不可欠である。KISでは、基本的なプロダクションルールの場合について、表形式入力機能を用意している。

#### (ii) 知識ベースチェック機能

エディタ機能を利用して入力した知識ベースに関するチェック機能をサポートしている。チェック内容としては、文法的なチェック以外に知識ベースの矛盾・不完全・重複などについて検出する機能を持っている。また、チェック結果の表示機能やエラー発生箇所の検出機能などを実現し、ユーザによるデバッグを容易にしている。

### 2) 推論機能

知識ベースエディタ機能により作成した知識ベースを利用する推論機能として、各知識表現に適した推論機能を実現している。

不確実性をともなう知識の取り扱いについては、Dempster & Shafer理論

(石塚 83) による推論を用意している。この推論の特長は、従来の方法ではうまく表せなかった無知量を取り扱えるようにしたことである。

ルールの I F 部を A、T H E N 部を B とすると、ルール「IF A THEN B」の確実度の取り扱いは次のようになる。すなわち、対象とする事象を肯定(添え字'+')、無知(添え字?)、否定(添え字'-')の3通りで表す。本来ならば、I F 部の事象の状態と T H E N 部の事象の状態の全組合せである9通りについて係数を決定しなければならない。しかし、全部のプロダクションルールを対象に各ルールごとに係数を決定するのは知識ベース開発者への負担が大きい。「K I S」では付表2に示すように係数を定義することにより、A+ならばB+の確実度のみを決定すればT H E N 部の確実度が求まるようにした。

付表2 ルールにおける確実度の定義

IF部 \ THEN部	B+	B?	B-
A+	CF	0	1 - CF
A?	0	CF	1 - CF
A-	0	0	1

また、I F 部が A 1 & A 2 の場合には、I F 部の確実度は以下の式により算出した。

$$CF+ = \min(A1+, A2+)$$

$$CF- = \max(A1-, A2-)$$

$$CF? = 1 - CF+ - CF-$$

### 3) シミュレーション機能

#### (i) 連続系シミュレーション

対象プラントの高度な運転の実現や運転操作の確実性を高めるためには、プラントの動特性を把握して、その予測を行なうことが不可欠である。そのためには、対象プラントをリアルタイムにシミュレーションする機能が必要である。このため、当社で開発したシミュレーション言語をワークステーション上に移植し、マンマシンインタフェース機能を用意することにより、従来一部の技術者に限られていたシミュレーション機能の利用を一般のユーザにまで利用可能としている。

(ii) 定性シミュレーション (Ishida 87) (室井 87) (室井 88)

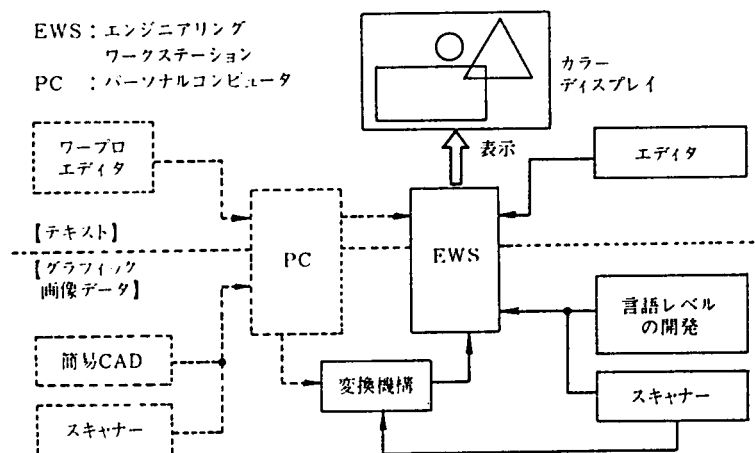
上記の連続系シミュレーションが対象の厳密な動特性モデルを利用するのに対して、定性シミュレーションは、数式表現が困難な対象に対する場合や定量的なデータが入手しにくい基本設計段階において、対象の特性表現が可能であるため有効である。

例えば、機能ブロックごとの因果関係を記述し (Lapp 77)、要素間の関係を計算機上に有向グラフの形で表現して (Kramer 87)、ルールを自動的に生成したり (黒崎 88)、要素間の関係の抽出や故障発生時の各状態の変化の検討が可能である。また、結果から原因をたどるバックトラック機能によって、故障事象から発生原因をもれなくリストアップできる。

また、動特性シミュレーション、定性シミュレーションの両機能を活用する例として、故障原因を与えて連続系シミュレーションを行なうことは困難であるため、このリストアップされた発生原因にしたがって連続シミュレーションを実行し、検証していくことができる。

#### 4) 説明画面作成支援機能

テキスト・グラフィックス・画像データによる説明画面用開発機能を実現するために、付図3に示す構成を用意している。



付図3 説明画面開発フロー

##### (i) テキストによる説明画面の作成

エンジニアリング・ワークステーション上の各種エディタを利用して入力することにより説明画面を作成できる。また、パーソナルコンピュータ上の

エディタ、ワープロソフトを利用しても、そのデータをエンジニアリング・ワークステーションに伝送することにより、説明画面を作成できる。

#### (ii) グラフィックス・画像データによる説明画面の作成

エンジニアリング・ワークステーション上のグラフィックス・画像画面作成用アプリケーションを利用することにより、またパーソナルコンピュータ上の簡易CADやイメージスキャナによる入力データを変換・伝送することにより説明画面を作成できる。

このような構成にすることにより、開発者のレベルを問わずに短期間で開発可能な説明画面作成支援機能を実現している。

#### 5) マンマシン開発支援機能

ユーザによるウィンドウ機能を利用したアプリケーションの開発を促進するために、ウィンドウ機能に関する知識がなくてもアプリケーションの開発を可能とする支援機能が必要である。このため、メニュー選択または所与のフォーマットに入力することによりウィンドウアプリケーション開発を可能とする支援機能を実現している。

#### 参考文献

- (Ishida 87), L.Eshelman: "Integrating Model-based and Syndrome-based Diagnosis", 第50回情報・通信システム分科会資料('87)
- (石塚 83) "Dempster & Shaferの確率理論", 電子通信学会誌、66[9] ('83)
- (川重 88)、機械・プラント事業本部: "シールド掘進機の故障診断", 川崎重工技報[101], 昭和63年12月
- (Kramer 87)、B.L.Palowitch, Jr: "A Rule-Based Approach to Fault Diagnosis Using the Signed Directed Graph", AIChE Journal, ('87-7)
- (黒崎 88)、宮本、河野、西野、林: "定性シミュレーションによる故障診断プロダクションルールの自動生成", 日本自動制御協会、システムと制御研究発表講演会予講集('88)
- (日機連 93) (社)日本機械工業連合会、エンジニアリング能力の強化に関する調査研究、1993年3月
- (室井 87)、宮本、河野、西野、藤森、米原、石上、岩崎: "宇宙用環境制御装置故障診断エキスパートシステム", 宇宙用人工知能/ロボット/オートメーションシンポジウム('87)
- (室井 88)、黒崎、宮本、西野、藤森、米原、上田、岩崎: "宇宙用環境制御装置故障診断エキスパートシステムその2", 宇宙用人工知能/ロボット/オートメーションシンポジウム('88)
- (Lapp 77)、G.J.Powers: "Computer-aided Synthesis of Fault-trees", IEEE Transactions on Reliability, ('77-4)