

NAIST-IS-DT0061029

博士論文

心身状態を考慮したオペレータモデルの開発

金 銀花

2003年3月24日

奈良先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科 情報システム学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に  
博士(工学)授与の要件として提出した博士論文である。

金 銀花

審査委員： 西谷 紘一 教授  
松本 健一 教授  
山下 裕 助教授  
黒岡 武俊 助教授

# 心身状態を考慮したオペレータモデルの開発\*

金 銀花

## 内容梗概

プラント運転において、コンピュータと自動制御技術の進歩によって、人間が行っていた多くの作業を機械が代行して行うようになってきた。しかし高度な判断が必要な局面や柔軟な対応を必要とする局面では、依然として人間が監視操作を行っている。オペレータは CRT 画面上でプラントの状態を常時監視し、何らかの異常を発見した場合は、異常原因を突き止め、適切な対応処置を取らなければならない。システムが巨大化した現在では、事故が起こるとその被害と損失は測れきれないほど大きい。本研究では、異常時に発生しやすいヒューマンエラーのメカニズムを、プラント運転を行うオペレータモデルを用いて考察する。

オペレータモデルは人間のある限られた特性を形式的に表現したものであって、使用目的によって多様なモデルが提案されている。本研究では、Card らの単純な人間情報処理モデルを基本として、オペレータの行動をシミュレーションできる認知情報処理モデルを構築した。まず、オペレータの情報処理モデルを知覚、思考、運動の三つのプロセッサと作業記憶、長期記憶から構成した。このオペレータ情報処理モデルを PC 上に実装したあと、運転訓練用ボイラープラントシミュレータと結合してプラントシミュレータに発生する標準的な異常に対応できることを確かめた。また、人間オペレータの時間特性が本オペレータモデルによって再現できることも確認した。

オペレータの思考や行動、オペレータの心理状態、プラントの状態は互いに複雑に影響を及ぼしあう。それゆえプラント運転におけるヒューマンファクターの問題を考えるうえで、これらの要素を個別に解析するだけでなく、時々刻々と変わる状況の中で各々の要素がどのように影響を及ぼしあうかを解析することが必要である。これまで得られているオペレータの行動に関する知見をシミュレーションするため、オペレータの情報処理モデルにオペレータの心理状態、注視点と視野を追加して、心身状態を考慮したオ

\* 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 博士論文, NAIST-IS-DT0061029, 2003年3月24日.

オペレータモデルを開発した。特に、ヒューマンエラー発生メカニズムをシミュレーションによって考察するため、各プロセッサや記憶のパフォーマンスを表すパラメータを導入した。作成したモデルをPC上に実装し、ボイラープラントシミュレータと結合して、いろいろな状況で起こるヒューマンエラーのシミュレーションを行い、ヒューマンエラー発生メカニズムを考察した。特定の要素が直接エラーを引き起こす場合はもちろんのこと、いろいろな要素が複合してエラーが発生するメカニズムを解析した。本研究では、現場で共有されている定性的な知見を、モデルを用いたリアルタイムシミュレーションで再現することを目標としている。

論文は7章から構成されている。第1章では、いくつかの典型的なオペレータモデルを紹介した後、異常対応訓練において観察されたオペレータの行動の特徴をまとめ、本研究の目的を明らかにする。第2章では、プラント運転におけるヒューマンエラーの発生要因とヒューマンエラーの事例をまとめる。第3章では、本研究のため構築したプラントオペレーションのシミュレーション環境を説明する。第4章では、最初に作成したオペレータの情報処理モデルの構成と、このモデルがボイラープラントシミュレータに起こった標準的な異常にリアルタイムで対応できたことを述べる。第5章では、心身状態を考慮したオペレータモデルのモデリングと、このモデルが4章と同じ標準的な異常に対応できたことを述べる。第6章では、本研究で作成したオペレータモデルを使って、ヒューマンエラー発生シミュレーションを行い、ヒューマンエラー発生メカニズムを考察する。第7章では、本研究の結論と今後の課題をまとめる。

## キーワード

CRT オペレーション、オペレータモデル、心理状態、注視点と視野、ヒューマンエラー、リアルタイムシミュレーション、HMIモデル、プラントシミュレータ

# A Cognitive Information Processing Model Incorporating Mind and Body States\*

YINHUA JIN

## Abstract

Owing to the recent progress in instrument and control technologies, many plant operator tasks have been automated. However, plant operators usually monitor plant states through CRT monitors and have to make appropriate decisions when an abnormal situation is predicted or detected. Plant operators tend to be inattentive if nothing occurs, so they may fail to notice warning signs on the panels. Some operators tend to be nervous in the face of an emergency, so they may fail to judge the situation correctly. Plant operators are prone to make various types of human errors in actual plant operations, and as systems become larger, losses and damage can be great, if an accident occurs. To combat this problem, we have developed a cognitive information processing model to simulate a plant operator's behavior under abnormal situations and have applied this model to analyze the human error mechanism.

Our operator model represents the limited characteristics of humans in plant operations, we can visualize various models for specific purposes. In this study, the operator model was built with reference to Card's information processing model. The model consists of a perceptual processor, a cognitive processor, a motor processor, in addition to a working memory and a long-term memory. We evaluated the operator model by a simulation study using an industrial boiler plant training simulator. The results showed that the developed model can handle eight malfunctions in the training course. Human operator's characteristic of time was realized by the operator model.

The operator's behavior, mental state, and the plant situation influence each other in a complex manner. Therefore, it is necessary to analyze the influence of the dynamic

---

\* Doctoral Thesis, Department of Information Systems, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-DT0061029, March 24, 2003.

environment on human factors. So we added the mental state, fixation point and cognizable field to the previous model to develop a cognitive information processing model incorporating mind and body states. The performance of each processor and memory depends on the parameter. This operator model is used to analyze various types of human errors and to study how to cope with these human errors. The human error mechanism is analyzed not only when the human error is caused by a specific factor, but also when various complex factors affect it.

This thesis consists of seven chapters. Chapter 1 introduces a few typical operator models, describes the characteristics of human operators' behaviors observed during simulator training for emergency operation, and the purpose of this study. Chapter 2 considers human errors based on the causes, events and consequences. Chapter 3 describes the simulated plant operation environment for this study. Chapter 4 describes the construction of the information processing model developed for the first time in this study, and also includes results of the model's simulation experiment. Chapter 5 describes the cognitive information processing model incorporating mind and body states, and the movement history of this model recorded for proving its appropriateness. Chapter 6 analyzes the mechanism of operators' human errors using the developed operator model. Chapter 7 presents concluding remarks and outlines future development of this study.

**Keywords:**

CRT operation, operator model, mental state, fixation point and cognizable field, human error, real time simulation, HMI model, plant simulator

# 目次

<b>第1章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 はじめに	1
1.2 オペレータモデル	3
1.2.1 SRK モデル	3
1.2.2 人間情報処理モデル	5
1.2.3 人工知能的モデル	7
1.3 オペレータモデルとエキスパートシステム	8
1.4 オペレータの行動の特徴	9
1.4.1 プロトコル分析	10
1.4.2 異常対応操作の表現	10
1.5 まとめ	13
<b>第2章 プラント運転におけるヒューマンエラー</b>	<b>14</b>
2.1 ヒューマンエラーの発生要因	14
2.2 ヒューマンエラーの分類	17
2.2.1 包括的エラーシステム (GEMS)	17
2.2.2 人間の情報処理プロセスによる分類	19
2.3 ヒューマンエラーの事例	20
2.4 まとめ	22
<b>第3章 プラント運転のリアルタイムシミュレーション環境</b>	<b>23</b>
3.1 プラントシミュレータ	23
3.2 ヒューマンマシンインタフェースモデル	29
3.3 まとめ	30

第 4 章	オペレータの認知情報処理モデルとリアルタイムシミュレーション	31
4.1	知覚プロセッサ	31
4.2	思考プロセッサ	33
4.3	運動プロセッサ	33
4.4	記憶	33
4.4.1	作業記憶	34
4.4.2	長期記憶	34
4.5	オペレータモデルの動作確認実験	35
4.5.1	実験シナリオ	35
4.5.2	実験結果と考察	46
4.6	まとめ	50
第 5 章	心身状態を考慮したオペレータモデル	51
5.1	オペレータの心身状態	51
5.1.1	オペレータの心理状態	51
5.1.2	オペレータの注視点の位置と視野	54
5.2	知覚プロセッサ	55
5.3	思考プロセッサ	57
5.4	運動プロセッサ	61
5.5	記憶	63
5.5.1	作業記憶	64
5.5.2	長期記憶	66
5.6	オペレータモデルの動作確認実験	66
5.6.1	実験シナリオ	66
5.6.2	実験結果と考察	67
5.7	まとめ	72
第 6 章	ヒューマンエラー発生のシミュレーションと発生メカニズムの解析	73
6.1	知覚系エラーのシミュレーション	73
6.1.1	実験シナリオ	73
6.1.2	実験結果と考察	76
6.2	記憶系エラーのシミュレーション	82



6.2.1	実験シナリオ	83
6.2.2	実験結果と考察	83
6.3	思考系エラーのシミュレーション	90
6.3.1	実験シナリオ	90
6.3.2	実験結果と考察	90
6.4	運動系エラーのシミュレーション	94
6.4.1	実験シナリオ	94
6.4.2	実験結果と考察	94
6.5	複合エラーのシミュレーション	98
6.5.1	実験シナリオ	98
6.5.2	実験結果と考察	98
6.6	まとめ	101
<b>第7章</b>	<b>結論と今後の課題</b>	<b>102</b>
	謝辞	104
	参考文献	105
	付録	110
A	ボイラーシミュレータの各系統の状態変数	110
B	プラントシミュレータの画面要素	112

# 目次

1.1	計器盤から構成されたプロセス制御室 <sup>[12]</sup> . . . . .	2
1.2	コンピュータ化されたプロセス制御室 <sup>[12]</sup> . . . . .	2
1.3	Rasumussen の SRK モデル <sup>[42]</sup> . . . . .	3
1.4	意志決定の梯子モデル <sup>[11]</sup> . . . . .	4
1.5	Card らの人間情報モデル <sup>[3]</sup> . . . . .	6
1.6	人間情報処理モデル <sup>[11]</sup> . . . . .	6
1.7	認知環境シミュレーション (CES) モデル <sup>[11]</sup> . . . . .	7
1.8	データ収録の様子 . . . . .	9
1.9	オペレータの異常対応処置のフローチャート表現 <sup>[48]</sup> . . . . .	11
1.10	マルファンクションに対するイベントツリー <sup>[48]</sup> . . . . .	12
2.1	エラー同定モデル (GEMS) <sup>[45]</sup> . . . . .	18
3.1	プラント運転のシミュレーション環境 . . . . .	24
3.2	ボイラシミュレータのプロセスフロー図 . . . . .	25
3.3	オーバービュー画面 . . . . .	28
3.4	バーナ点火画面 . . . . .	28
3.5	HMI モデルの構造 . . . . .	29
4.1	オペレータの情報処理モデルの構成 . . . . .	31
4.2	オペレータコンソール上の画面要素 . . . . .	32
4.3	長期記憶の区分 . . . . .	35
4.4	燃料ポンプ故障時の現象と対応操作手順 . . . . .	36
4.5	燃料ポンプ故障時の模範オペレーション . . . . .	37
4.6	全バーナ失火時の現象と対応操作手順 . . . . .	38
4.7	全バーナ失火時の模範オペレーション . . . . .	38

4.8	給水ポンプ (BFP1) トリップ時の現象と対応操作手順 . . . . .	39
4.9	BFP1 トリップ時の模範オペレーション . . . . .	40
4.10	水管リーク時の現象と対応操作手順 . . . . .	40
4.11	水管リーク時の対応操作の模範オペレーション . . . . .	41
4.12	O <sub>2</sub> 計故障時の現象と対応操作手順 . . . . .	42
4.13	O <sub>2</sub> 計故障時の模範オペレーション . . . . .	42
4.14	押し込み通風機 (FDF) 能力ダウン時の現象と対応操作手順 . . . . .	43
4.15	押し込み通風機 (FDF) 能力ダウン時の模範オペレーション . . . . .	43
4.16	誘引通風機 (IDF) 能力ダウン時の現象と対応操作手順 . . . . .	44
4.17	誘引通風機 (IDF) 能力ダウン時の模範オペレーション . . . . .	44
4.18	タービン負荷激減時の現象と対応操作手順 . . . . .	45
4.19	タービン負荷激減時の模範オペレーション . . . . .	46
4.20	監視画面パラメータテーブル (実例) . . . . .	47
4.21	オペレータモデルの異常対応操作履歴 . . . . .	48
4.22	オペレータモデルの異常対応操作履歴 . . . . .	49
5.1	心身状態を考慮したオペレータモデルの構成 . . . . .	52
5.2	オペレータの運転状況の遷移 . . . . .	54
5.3	オペレータの注視点 . . . . .	54
5.4	知覚プロセッサの機能 . . . . .	55
5.5	Lab 表色系 <sup>[18]</sup> . . . . .	57
5.6	思考プロセッサの機能 . . . . .	58
5.7	異常原因の探索と対応操作 . . . . .	59
5.8	連想状態変数に基づいた異常診断手順 . . . . .	60
5.9	系統と主要状態変数 . . . . .	60
5.10	運動プロセッサの機能 . . . . .	62
5.11	記憶の 3 段階 . . . . .	63
5.12	異常対応操作時のオペレータモデルの操作履歴 . . . . .	68
5.13	異常対応操作時のオペレータモデルの操作履歴 . . . . .	69
5.14	異常対応操作時のオペレータモデルの操作履歴 . . . . .	70
5.15	異常対応操作時のオペレータモデルの操作履歴 . . . . .	71

6.1	給水ポンプ (BFP1) を見る時の視野	74
6.2	誘引通風機 (IDF) を見る時の視野	74
6.3	オーバービュー画面 1 上での監視	75
6.4	オーバービュー画面 2 上での監視	75
6.5	オペレータの心理状態と知覚率	78
6.6	オペレータの心理状態と知覚率	79
6.7	オペレータの心理状態と知覚率	80
6.8	オペレータの心理状態と知覚率	81
6.9	監視の最初、途中、最後の時の注視点と視野	83
6.10	S での作業記憶の中味	84
6.11	M での作業記憶の中味	85
6.12	E での作業記憶の中味	85
6.13	S での作業記憶の中味	87
6.14	M での作業記憶の中味	87
6.15	E での作業記憶の中味	88
6.16	M での各過程の作業記憶 (モード C)	89
6.17	E での各過程の作業記憶 (モード C)	89
6.18	燃料ポンプ故障時のオペレータの思考・行動	92
6.19	酸素計故障時のオペレータの思考・行動	93
6.20	運動プロセッサの異常対応操作の履歴	97
6.21	運動プロセッサの異常対応操作の履歴	97
6.22	モード C の時の知覚結果	100

# 表 目 次

2.1	スリップ・ラプス・ミステークの特徴 . . . . .	19
3.1	ボイラープラントの仕様 . . . . .	26
3.2	HMI モデルの入出力情報 . . . . .	30
3.3	画面パラメーターテーブルの例 . . . . .	30
4.1	FOP1トリップ時の予備燃料ポンプ起動手順 . . . . .	36
4.2	プラント運転を停止する対応操作手順 . . . . .	37
4.3	BFP1トリップ時の予備給水ポンプ起動手順 . . . . .	39
4.4	O <sub>2</sub> 計故障時の対応操作手順 . . . . .	41
4.5	押し込み通風機 (FDF) 能力ダウン時の対応操作手順 . . . . .	43
4.6	タービン負荷激減時の対応操作手順 . . . . .	45
5.1	心理状態の変化 . . . . .	53
5.2	運動パラメーター . . . . .	63
6.1	給水ポンプ (BFP1) を見る場合の知覚結果 . . . . .	76
6.2	給水ポンプ (BFP1) を見る場合の知覚結果 . . . . .	76
6.3	誘引通風機 (IDF) を見る場合の知覚結果 . . . . .	77
6.4	誘引通風機 (IDF) を見る場合の知覚結果 . . . . .	77
6.5	オーバービュー画面 1 の知覚結果 ( X=7cm、 Y=7cm) . . . . .	78
6.6	オーバービュー画面 1 の知覚結果 ( X=5cm、 Y=5cm) . . . . .	79
6.7	オーバービュー画面 2 の知覚結果 ( X=7cm、 Y=7cm) . . . . .	80
6.8	オーバービュー画面 2 の知覚結果 ( X=5cm、 Y=5cm) . . . . .	81
6.9	作業記憶の情報数 . . . . .	85
6.10	作業記憶の情報数 . . . . .	88

6.11	燃料ポンプ故障時の異常原因判定の結果 . . . . .	91
6.12	酸素計故障の異常原因判定の結果 . . . . .	93
6.13	運動プロセッサの異常対応操作の結果 . . . . .	96
6.14	運動プロセッサの異常対応操作の結果 . . . . .	96
6.15	燃料ポンプ故障時の異常原因判定の結果 . . . . .	99
6.16	酸素計故障の異常原因判定の結果 . . . . .	100

# 第1章 序論

## 1.1 はじめに

プラント運転において、コンピュータと自動制御技術の進歩によって、人間が行っていた多くの作業を機械が代行して行うようになってきた。しかし、高度な判断が必要な局面や柔軟な対応を必要とする局面では、依然として人間が監視操作を行っている。図 1.1<sup>[12]</sup> は計器盤をならべた古いタイプのプロセス制御室である。オペレータは直立した計器盤にならんだメーターやスイッチを歩いて監視しながらプラントの運転を行っていた。システムが巨大化し複雑になるに従って、オペレータの負荷が増加するとともに、ヒューマンエラーによる事故も増えた。事故は一旦発生すると、多くの死傷者が出るだけでなく、周辺住民や他国民にも大きな影響を及ぼすことがある。スリーマイルアイランド (TMI) 原子力発電所事故 (1979 年 3 月 28 日) はその一例である。この事故を契機に行った人間と機械の接点に注目したマン・マシン・インタフェースに関する研究が、実際のプラントに反映されはじめた。

プラントの設備とオペレータ自身の安全および、周辺住民と環境安全のために設計されたプラント制御室の一例が、図 1.2<sup>[12]</sup> に示すような現代のコンピュータ化したプロセス制御室である。プラントの機器やプロセスパラメータは CRT 画面上に表示され、オペレータは CRT 画面上でプラントの状態を常時監視する。異常が発生した場合は、異常原因を突き止め適切な対応処置を取らなければならない。ヒューマンエラーを防ぐためいろいろな対策を実施し、オペレータについてもいろいろ運転支援システムを採用しているにも関わらず、ヒューマンエラーは発生する。特にプラントのどこかに異常が発生した場合、緊急時という状況がオペレータを緊張させる結果、オペレータは状況把握や判断といった論理思考をうまく行うことができず、対応行動に失敗することがある。システムが巨大化した現在では、事故が起こると、その被害と損失は測れきれないほど大きい。

本研究の目的は、リアルタイムのダイナミックシミュレーションが可能なオペレータモデルを開発し、このモデルを使ってヒューマンエラー発生のシミュレーションを行い、ヒューマンエラー発生のメカニズムを考察することである。

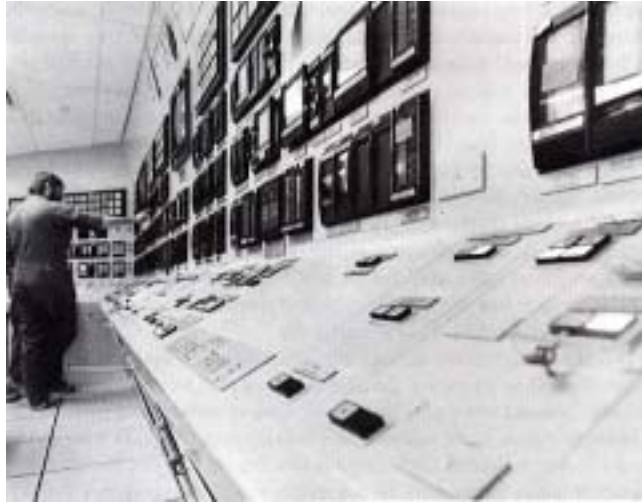


図 1.1 計器盤から構成されたプロセス制御室 [12]



図 1.2 コンピュータ化されたプロセス制御室 [12]



## 1.2 オペレータモデル

プラント運転を対象としたオペレータモデルは人間のある限られた特性を表現したものであって、使用目的によって多様なオペレータモデルが提案されている。ここでは Rasmussen の SRK モデル<sup>[42]</sup>、Card らの人間情報処理モデル<sup>[3]</sup>、Woods らの認知環境シミュレーション CES (Cognitive Environment Simulation)<sup>[11]</sup> をとりあげて考察する。

### 1.2.1 SRK モデル

Rasmussen は人間の行動を 3 つの認知的階層に支配されているものとしてとらえた。すなわち、図 1.3 に示すように、人間行動がスキルベース (Skill)、ルールベース (Rule)、知識ベース (Knowledge) の三つのレベルの認知活動によって実現されるという SRK モデル<sup>[42]</sup> を提唱した。

スキルベース行動は、データ駆動型システムのパフォーマンスに類似していて、感覚運動系の自動化された制御による行動や非常に熟練した定型作業における無意識でなめらかな行動を表す。スキルベース行動の初期段階では、感覚系を通して刺激の特徴 (サイン) 抽出が必要である。しかし最終段階では刺激と行為が直接的に結びつくようになる。その刺激はシグナルと呼ばれる。

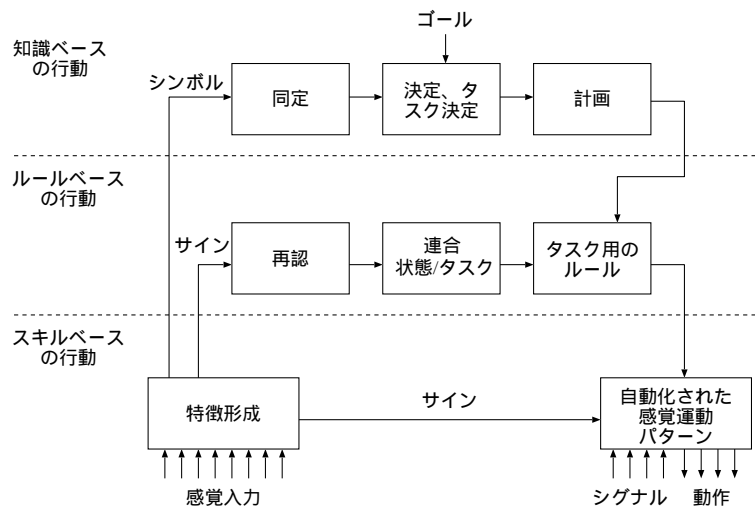


図 1.3 Rasmussen の SRK モデル<sup>[42]</sup>

ルールベース行動は、過去に経験や学習によって獲得した規則や手順を意識的に適用する行動である。ルールベース行為には、まず眼前の状態が、かつて遭遇した状態と同じであることの再認が必要となる。続いて、状態とそこで要求されている課題(タスク)とが連合し、それを解決するために必要な規則が長期記憶から引き出される。そして、最終的に、規則群によって逐次的にコントロールされた行為が実行される。ルールベース行動における感覚情報は、サインとして知覚されるが、サインは予め決定されている動作や操作を活性化したり制御したりする。ルールベースの行為の特徴は次の二点にある。

- 行為を意識的にコントロールすることができる。
- 反復することによって次第にスキルベース化される。

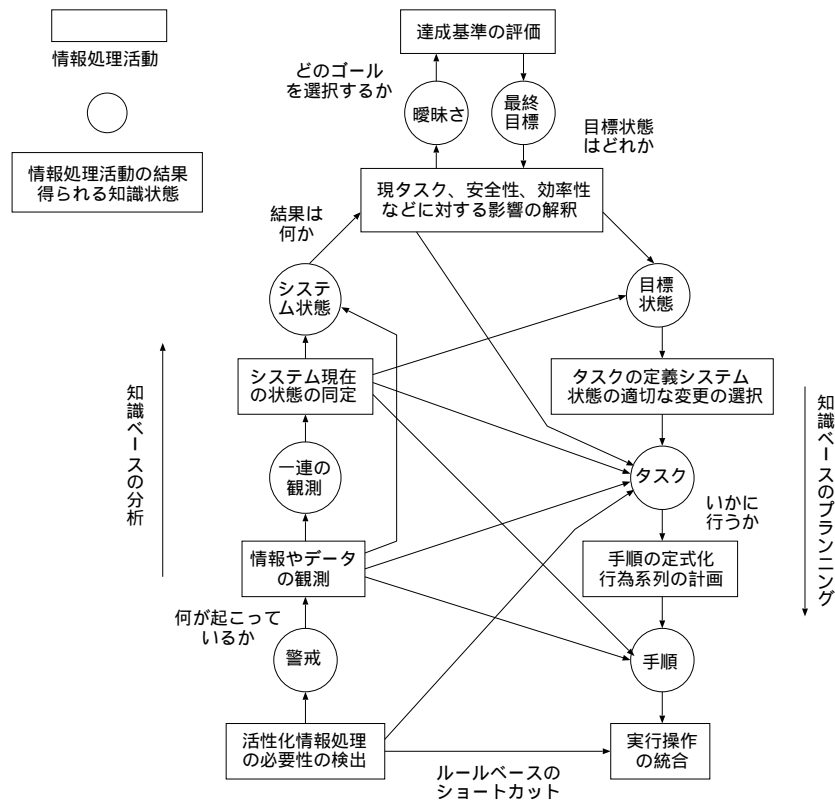


図 1.4 意志決定の梯子モデル [11]

未知あるいは不慣れな状況においては、経験から獲得した手順や経験則は適用できない。このような場合には、より高次の概念的レベルにおいて目標駆動的行動が決定される。これが知識ベース行動である。まず、対象システムのメンタルモデルによって表された知識を用いて、システムの機能的レベルでの状態を認識する。つぎに、認識された状態と目標との目標手段解析によって、目標達成に必要な行動が計画され実行される。計画はその実行結果からのフィードバックに基づいて修正されることもある。知識ベース行動においては、感覚情報はシステムの機能的特性に対応づけられたシンボルとして知覚され、システム状態の認識や予測のための推論やプランニングに用いられる。

SRK モデルに加えて、Rasmussen はプラントオペレータの行動分析から、図 1.4 に示すような意志決定の梯子モデル<sup>[11]</sup>を提案した。この梯子の左側は下から上に向かって状態分析の過程を示しており、右側は上から下に向かって行動計画の過程を示している。このモデルは情報の流れに着目した意思決定プロセスを示す枠組である。従って入力した刺激から行動までの認知過程をこのモデルを使って定性的に検討することができるが、人間の情報処理の各過程の詳しい解析に利用するにはさらなる詳細化が必要となる。

### 1.2.2 人間情報処理モデル

Card ら<sup>[3]</sup>はユーザである人間の情報処理過程について、とくにその時間特性と容量特性に注目して、人間の情報処理の各過程を概念的箱として表現する図 1.5 に示す情報処理モデル<sup>[3]</sup>を提案した。このモデルを使って、ユーザの時間と容量特性に関して定量的な分析や評価が可能になった。

この人間情報処理モデルは、知覚プロセッサ、認知プロセッサ、運動プロセッサの三つのサブプロセッサで構成され、そのうち知覚プロセッサは感覚器官(目、耳)からなる。認知プロセッサは作業記憶から記号化された情報を受け取り、長期記憶から関連する意味情報を検索し、次にどのような行動をとるべきかを決定する。運動プロセッサは作業記憶からの動作指示に基づいて運動器官(手)を動かすように命令する。このように人間の認知行動を定性的に説明するのに使える。このモデルの記憶の特性を表現する  $\mu$  は保持している情報の量を表す。 $\delta$  は保持される情報の減衰時間を表す。 $\kappa$  は情報のコード種別を表す。 $\tau$  はサブプロセッサおよび記憶における情報処理に要する時間を表す。しかしこのモデルでは連続的な人間行動のダイナミックなシミュレーションはできない。

人の情報処理過程が何段階で構成され、各段階がどのような処理をするかを検討するため、図 1.6 のような人間情報処理システムのモデル<sup>[11]</sup>も提案されている。人間の情報

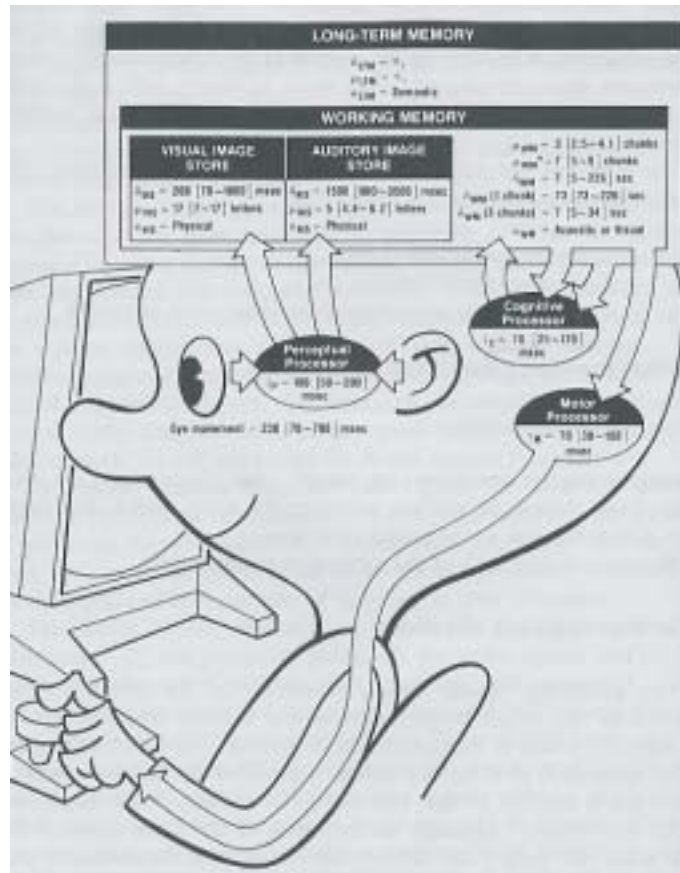


図 1.5 Card らの人間情報モデル [3]

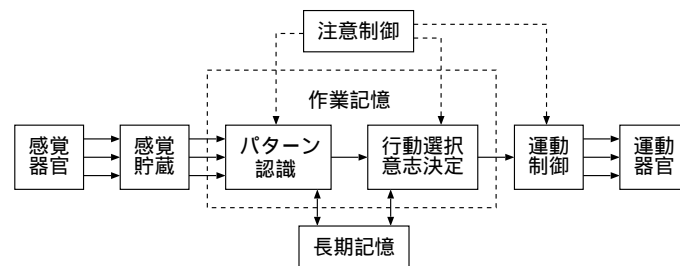


図 1.6 人間情報処理モデル [11]

処理システムは図 1.6 のように完全に独立したモジュールで構成されているわけではなく、モジュールの間はかなり曖昧で重なり合っていて、処理内容もモジュール間で連続的に変化する。

### 1.2.3 人工知能的モデル

人工知能 (AI) 技術の発展にともない、これを用いて人の認知過程をモデル化しようという試みが行われている。Woods らは米国原子力規制委員会の委託を受けて、プラント状態の観測から運転員が意図形成に至る過程をシミュレーションするためのシステムとして、図 1.7 に示すような認知環境シミュレーション CES (Cognitive Environment Simulation)<sup>[11]</sup> モデルを開発した。

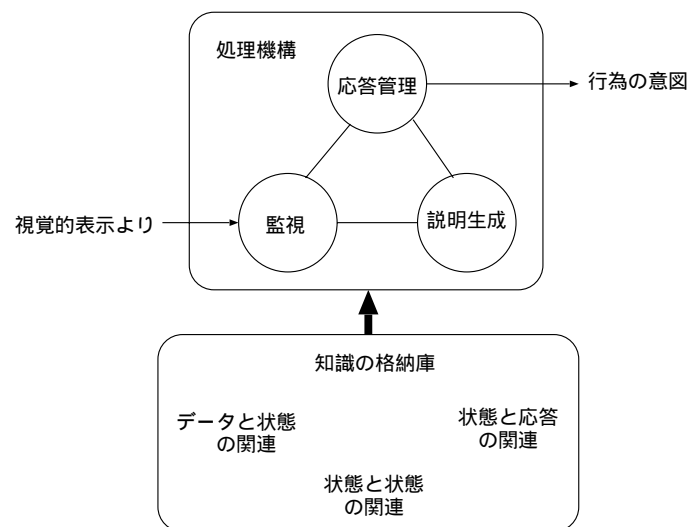


図 1.7 認知環境シミュレーション (CES) モデル<sup>[11]</sup>

CES は監視、説明生成、応答管理の三つの基本プロセスが並列に実行される分散協調型問題解決システムである。監視プロセスは、仮想表示盤の特定部分の変化を追跡してプラント状態が正常か異常か、あるいは予想どおりか否かを判定する。説明生成プロセスは事象の進展に対して説明を生成するとともに予想と異なる発見に対して説明を修正する。応答管理プロセスは、適切な行動を選択するとともに、選択された行動計画が正常に実行されているかどうかを監視する。システムの知識ベースにはプラントの構造と

機能、安全運転のための目標、異常を示す徴候、異常に対する対応措置やそれらの間の関係など、運転員のプラントに関する知識が整理して格納されており、それに基づいて三つのプロセスが実行される。CESの三つの基本プロセスが並列に情報を処理する点は人間の情報処理と同じであるが、CESを用いて情報処理の各過程の解析を行うことは難しい。

本研究では、ヒューマンエラーを、人間情報処理の各過程をダイナミックに表現したモデルを用いて分析する。このため Card らの人間情報処理モデルをもとにオペレータの情報処理モデルを構成し、知覚した情報に対して対応行動をとるまでの認知過程をダイナミックにシミュレーションできるようにする。

### 1.3 オペレータモデルとエキスパートシステム

ここで、本研究で開発するオペレータモデルとエキスパートシステムとの違いについて述べる。エキスパートシステムは、その領域の専門家から獲得された専門知識を用いて推論を行い、専門的に高度な現実の問題を、専門家と同等のレベルで解決する知的システムを言う<sup>[59]</sup>。エキスパートシステムは、専門家レベルの能力をもつコンピュータプログラムであり、専門家の知識をコンピュータで活用するところに特徴があり、次の二つの目的に使われている。

1. 知識と推論手続きを用いて問題を解く、知的なコンピュータプログラムである。人間の代わりにコンピュータをより一層人間のように振舞わせる技術でもある。プラント運転のためのエキスパートシステムは、オペレータの代わりにプラントを運転する。
2. エキスパートシステムは専門家に代わって非専門家の仕事を支援したり、専門家自身の仕事を支援するために活用されるコンピュータ化されたコンサルタントと考えられる。プラント運転においては、プロセスを監視したり、問題が起こった場合に問題解決の方法をオペレータに教えるエキスパートシステム等が考えられる。

本研究で開発したオペレータモデルは、人間オペレータのようにプラントの状態を監視して、異常を発見した場合は異常原因を突き止め、適切な対応操作を行うところではエキスパートシステムの目的の1.を満足する。開発したオペレータモデルとエキスパートシステムの違いは、オペレータモデルにヒューマンエラーのモデリングが含まれてい

ることである。これにより、オペレータモデルを使って、プラント運転におけるオペレータのヒューマンエラー発生のシミュレーションを行い、エラーメカニズムを解析する。

## 1.4 オペレータの行動の特徴

プラント運転を行うオペレータモデルを作成するにあたり、人間オペレータの行動を把握する必要がある。しかし、まれにしか起こらない機器の故障やプロセス異常時における人間の行動を実作業で収集することは極めて難しい。これにかわるものとして、トレーニング・シミュレータを用いた訓練データを収集して解析することが考えられる。坂田らは<sup>[47][48]</sup>、人間の弱点を教育訓練やヒューマンインタフェースで補うことを目的に、システムと人間のかかわり方に注目して、プロトコル分析を用いて異常対応訓練におけるオペレータの挙動の解析を行い、この解析結果からプラントオペレータの行動の特徴を抽出した。ここではその研究結果を簡単に紹介する。

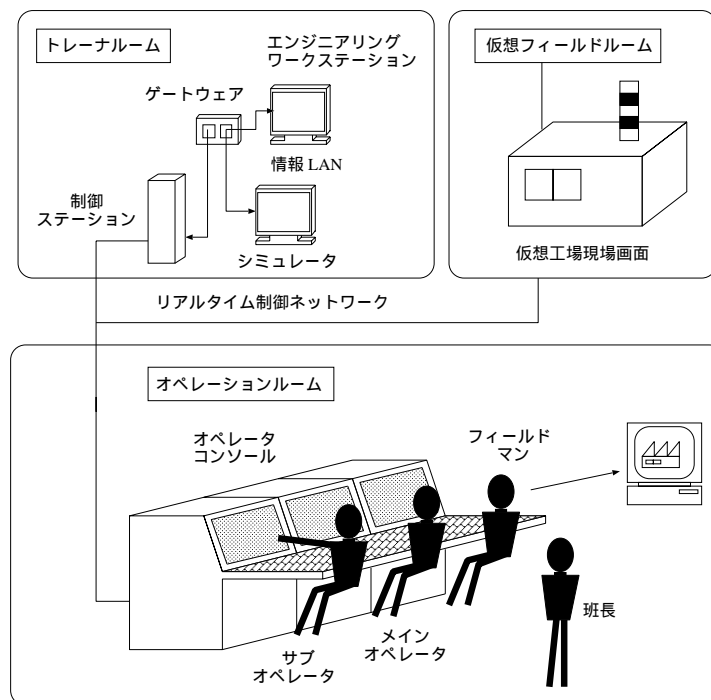


図 1.8 データ収録の様子

### 1.4.1 プロトコル分析

シミュレータ・トレーニング現場での調査では、異常対応訓練の様子を複数のビデオカメラで収録して、音声データからプロトコルデータを取り出し、オペレータの挙動の解析を行った<sup>[47][48]</sup>。図 1.8 にデータ収録の様子を示す。

解析結果を見ると、異常原因が画面上で直接見える、対応操作手順も決まっている異常に対しては比較的うまく対応できた。異常原因が画面上で直接見えなくても経験したことがある異常に対してはうまく対応できた。しかし初めて遭遇する異常に対しては、異常原因の特定がうまくできず、対応に失敗するケースが多かった。

観察された異常対応を行うオペレータ行動を図 1.3 に示した Rasmussen の SRK モデルに対応づけて示すと、図 1.9<sup>[48]</sup> のようになった。異常原因が明らかな場合は、一般にスキルベースでの対応がとられる。異常原因が明らかでなく原因を絞り込むためには、ルールベースの対応が必要となる。制御不能と判断されるまで異常原因の追求が繰り返される。

オペレータの行動パターンをナレッジベースからルールベースへ、そしてスキルベースへ変えていくことが教育・訓練の大きな目的と考えられる。本研究では人間オペレータの行動の特徴を再現できるオペレータモデルを開発する。

### 1.4.2 異常対応操作の表現

プラントに異常が発生した時、オペレータは発生した異常の特徴からその影響を判断して、状況にあった正しい対応操作を取らなければならない。異常対応の難しさは、異常が進行する中でリアルタイムで意思決定および対応操作をしなければならないことである。原因を追求する時間的余裕がない緊急事態もありえる。

各異常に対してはオペレータの模範的な対応はあるものの、オペレータが異常に気づくタイミングや予測する影響の深刻さ程度によって対応が異なってくる。典型的な症状が現われて容易に異常原因が分かり、時間的にも余裕をもって対応措置が取れる場合はまれである。様子を見ている内に異常が進行し、対応が一步おくれてしまうことも多い。このような背景の中で、オペレータにはいくつかの段階にわたっての補償行為が期待されている。これを表現し解析する方法として ETA (Event Tree Analysis)<sup>[48]</sup> がある。ETA では、ある異常の発生に対して行う多段の補償行為をツリー状グラフ (イベントツリー) で表現する。例としてボイラープラントの事例を取り上げて説明する。



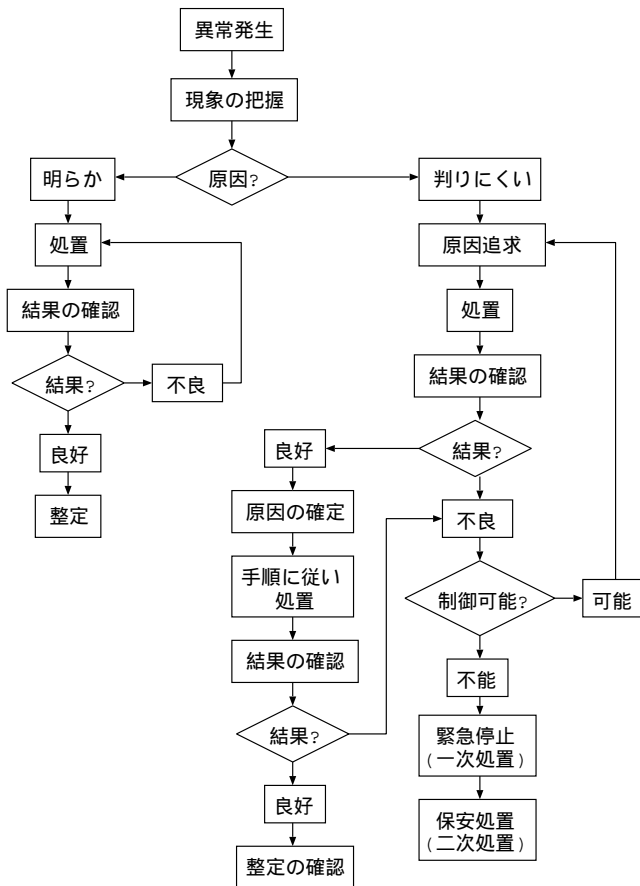


図 1.9 オペレータの異常対応処置のフローチャート表現 [48]

図 1.10 に示したボイラープラントの異常では、通常副生スチームを工場に供給しているプラントが急に停止して、大きな外乱（負荷増加）が発生した場合の対応がまとめられている。急激なボイラー負荷上昇によって主蒸気圧力が低下するが、基本制御系の働きだけではスチームの生成が追いつかず、燃焼系および給水系が不安定になる。何らかの監視情報からこの大きな負荷上昇の発生に気づけば、予備バーナーの点火を行ってボイラーの負荷上昇に備えたり、工場送気量を制限してプラント能力に見合うように負荷を減らすことによって、ボイラーの状態を整定させることができる。もし負荷変動に気づかずに対応処置をとらなかった場合は、バーナー油圧の上昇、燃焼空気量の増加、排ガス酸素濃度の低下や一酸化炭素濃度の上昇などの複雑な症状が現われる。これらの状況から蒸気不足に気づいて、その時点でボイラーの能力を考慮した上で工場送気量を制限すれば、ボイラー負荷を整定できる。もし、さらに負荷変動に気づかず、対応措置をとらなかった場合は、ボイラーの燃焼制御がかなり不安定になる。ボイラー制御が不安定のまま燃焼制御が不可能になれば、ボイラーの緊急停止を余儀なくされる。しかし、不安定な挙動を避けるため燃焼制御ループを手動にして工場送気量を制限すれば、ボイラー負荷の整定がはかれる。

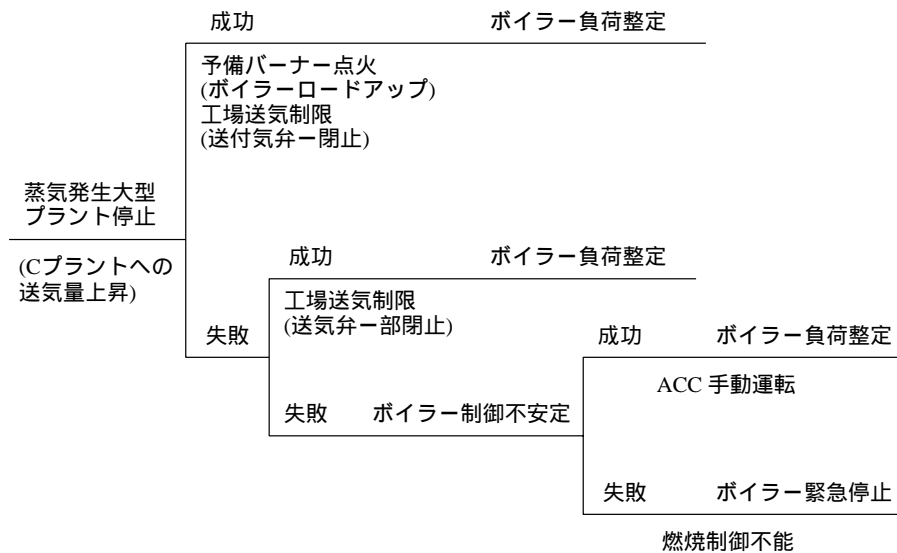


図 1.10 マルフアンクションに対するイベントツリー [48]

ここで説明したように、イベントツリーは対応の遅れた場合の何段階かの処置を表すことができる。異常の早期発見は余裕のある対応を可能にする。オペレータがプラントに発生した異常に早く気づき、異常原因を追求して適切な対応操作を行うことはプラント運転の重要な課題である。

## 1.5 まとめ

オペレータモデルについて使用目的によって多様なモデルが提案されている。本章では、いくつかの典型的なオペレータモデルを取り上げて考察した。続いて本研究で作成するオペレータモデルとエキスパートシステムの相違点について述べた。さらに、プロトコル分析によって得られたプラント運転における人間オペレータの行動の特徴について述べた。本研究では、現場で共有されているオペレータ行動に関する知見を、モデルを用いたリアルタイムシミュレーションで再現することによって、ヒューマンエラーの発生メカニズムを考察することを目標としている。

## 第2章 プラント運転におけるヒューマンエラー

科学技術の成熟に従って、技術的要素の信頼性が高められ、人間のエラーがクローズアップされている。ハイテクを背景としてシステムが巨体化した現在では、事故が起こると、その被害、損失は測りきれないほど大きい。スリーマイルアイランド原子力発電所事故(1979年3月28日)、日航ジャンボジェット機の墜落事故(1985年8月12日)、ロシア船籍ナホトカ号重油流出事故(1997年1月2日)等に代表される大事故は大きな経済的な損失をもたらしただけでなく、人、社会および環境に大きな損害を与えた。これらの事故・災害の発生には何らかの形でヒューマンエラーが関わっていた。

計画された知的または物理的な活動過程で、意図した結果が得られなかった時、これらの失敗が他の出来事によるものではなく人間が起こした過ちの時、ヒューマンエラーと呼ぶ<sup>[46]</sup>。プラント運転において、ヒューマンエラーは何故起こるのか、またどこで、どんな状況で起こるのかについて以下の報告がされている。

Swain<sup>[46]</sup>はプラント運転において対象作業、場所および関連作業員などに係わるエラー誘発要因が存在すると人的信頼性が低下し、エラー確率が高まると報告している。Rasmussen<sup>[46]</sup>は何らかの原因や因子が外部および人間の内部から「人間の情報処理過程」に影響し、エラーが発生するような状態が形成され、やがてエラー行為に至る状態が高まると報告している。

Norman<sup>[46]</sup>は人間がエラーを起こすには何らかの「エラー発生のためのキッカケとなる要因」が存在すると報告している。

### 2.1 ヒューマンエラーの発生要因

ヒューマンエラーの未然防止の視点から、電力中央研究所の吉野<sup>[67]</sup>はプラント運転・保守作業におけるヒューマンエラー誘発要因をマン・マシンインタフェース(MMI)の要

因、オペレータの内的要因、作業特性の要因、組織体制の要因、外的要因の5つに分け、各要因の具体例をまとめた。

(1) MMIの要因

- 装置の表示や指針が見にくい
- 音声による指針が聞き取りにくい
- ハンドル・レバー・スイッチ等の操作器具が扱いにくい
- 作業する時に必要な情報がすぐに見られない
- たくさんの情報が同時に与えられる
- 作業した時の結果が知らされなかったり、遅れて知らされる
- 工具や器具類が作業の現場に適していない
- マニュアルや手順書が不備である
- 誤った操作をした時にすぐに訂正したり、簡単に中断できない

(2) 人間の内的要因

- 以前のやり方にこだわり、新しい状況に対応しにくい作業者がいる
- 作業に含まれる危険性を正しく判断できない作業者がいる
- 作業に対する経験が足りない作業者がいる
- 個々の作業に対する訓練や教育が不足している作業者がいる
- 個々の作業経験があっても、装置の原理や仕組みについて十分な知識のない作業者がいる
- 操作や手順の全体の流れや目的が分っていない作業者がいる
- 精神的・肉体的な健康の状態が悪い作業者がいる
- 作業に対して積極的に努力する姿勢に欠ける作業者がいる
- 年齢が高い作業者がいる
- 協調性がない作業者がいる
- 落ち着きがなく、せっかちな性格の作業者がいる
- のんびりしている性格の作業者がいる
- 大胆で、思い切りが良い作業者がいる
- 身体が疲れている作業者がいる
- 結果を重大視して、失敗することを過度に恐れる作業者がいる

(3) 作業特性の要因

- めったに起こらない事態で、その対応がたまにしかない作業である
- 時間に追われて急いでやらなければならない作業である

- それまでの操作や状態の記録が不完全であっても、行わなくてはならない作業である
- 具体的な手順や作業基準や作業目的がはっきりしていない作業である
- 指示や命令を直接伝えられず、人伝にしなければならない作業である
- 作業の過程を客感的にチェックすることができない作業である
- 作業の過程を確認する方法が一通りしかなく、他の方法で確認できない作業である
- 作業者の経験や理解力を越えた判断が要求される作業である
- 作業の進み具合や手順を確認する方法がない作業である
- 身体的に無理な動作や姿勢が要求される作業である
- 保護具などが作業の邪魔になる作業である

#### (4) 組織体制の要因

- 安全を軽視する風潮がある
- 単調な作業に対して気分転換をする機会が与えられていない
- 役割分担や責任の所在がはっきりしていない
- 長時間に渡って単調な仕事だけをやらされる
- 作業中に他の用事はいって仕事の流れが中断される
- 作業量に比べて人が多すぎる
- 作業量に比べて人が足りない
- これまでの経験から指示や命令を直接伝えにくい人がいる

#### (5) 外的要因

- 作業場の温度や湿度が高い
- 作業場が寒い
- 作業場の騒音や振動が大きい
- 作業場が暗い
- 作業場所や足場所が狭く、不安定である
- 勤務・作業が開始されて間もない頃である
- 勤務・作業の中頃である
- 勤務・作業の終わり頃である
- 深夜や早朝の作業である。

これらの単一の原因から事故が発生することはまれである。事故はさまざまな小さな原因が発見・対処されることなく長期間に渡ってシステムに存在し、それらが多重に備えられた安全保護システムを何かのきっかけで一気に無力化した場合に発生すると考えられる。

## 2.2 ヒューマンエラーの分類

### 2.2.1 包括的エラーシステム (GEMS)

ヒューマンエラーが人の認知過程のどこで発生したかをつきとめ、発生原因の同定にまで進むために、Reason は Rasmussen の SRK モデルに基づいて図 2.1 に示すエラーモデリングシステム (GEMS: A Generic Error-Modelling System)<sup>[45]</sup> を提案し、次のようなエラータイプの分類を行った。

- (1) スリップとラプス：行為の意図は正しいが実行段階で意図と異なる行為を実行してしまうようなエラーで、SRK モデルにおけるスキルベース (SB) のレベルで発生する。多くの場合は、このようなエラーの原因は行動計画の実行時における注意の欠如である。逆に過剰な注意がエラーを引き起こすこともある。
- (2) ルールベースのミステイク：ルールベース (RB) のレベルで判断を誤り、誤った意図の下に行動してしまうエラーで、このエラーはさらに正しいルールの誤った適用と、誤ったルールの適用の二つに分類される。前者は多くの場合、頻繁に使われる一般的ルールを例外条件を見落として適用してしまう時に起こる。また、誤ったルールの適用は、ルールの作成がうまくできなかつたり、アクション部の失敗によって発生する。ルールの適用判断のための前提に欠陥を含む場合と、ルールの実行内容に欠陥を含む場合がある。
- (3) 知識ベースのミステイク：知識ベース (KB) のレベルで判断を誤り、誤った意図の下に行動してしまうようなエラーである。人の情報処理システムの処理能力には限界があり、また知識や得られる情報も完全に正確であるとは限らない。このため、人は合理性の点では不完全であっても、多くの場合にうまく行く簡便な思考をとる傾向がある。メンタルモデルもこの一つである。このような思考法が見込み違いや思考偏向を生み、知識ベースレベルの誤判断につながっていくものと考えられる。

GEMS のスキルベースは、慣れた環境下で実施される高度にルーチン化されたアクティビティに関するものである。作業進行中、計画と条件部のずれが見つかった時に、ルールベースが使用される。ずれが小さく、適当な修正だけで当てはまるルールが見つかったら、スキルベースに戻る。ルールベースに問題解決策がない時に知識ベースへと移行

スキルベースのレベル  
(スリップとラプス)

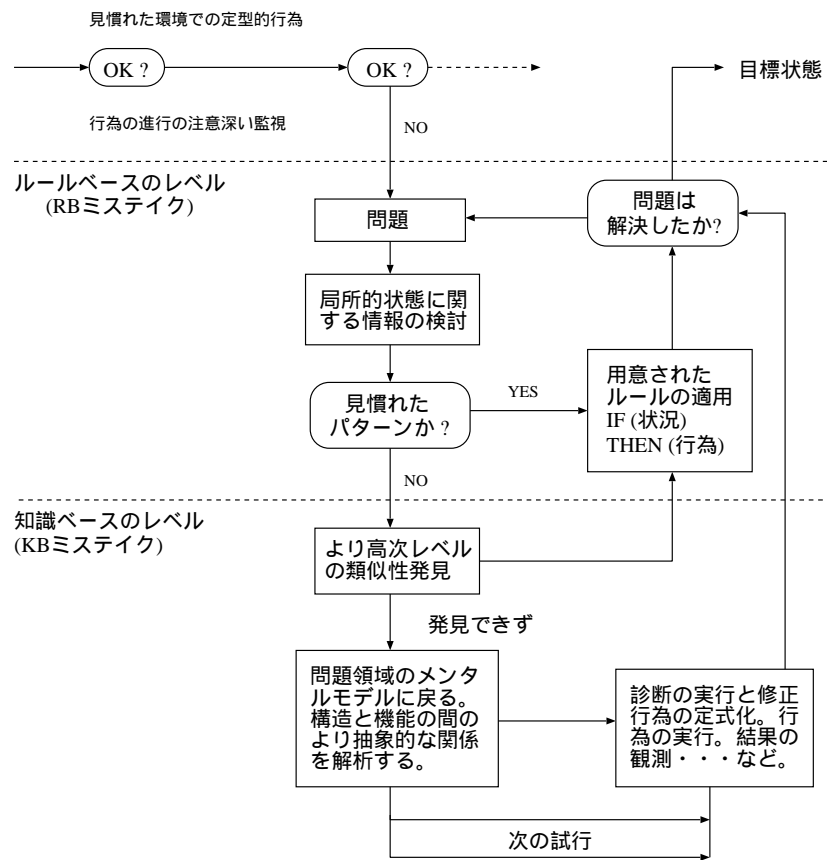


図 2.1 エラー同定モデル (GEMS)<sup>[45]</sup>



する。同時によく行う行動のルールを使えるように補正もする。効果的な類推では、この類推が期待できるかぎり、アクティビティの焦点をルールベースに戻そうとする。ルールベースと知識ベースレベル間のサイクルは、種々の類似性を探索するまで数回繰り返す。知識ベースレベルのアクティビティは、適切な解決策が得られるまで継続される。解決策が発見されると、新しいスキルベースルーチンに新しいパターンが作られる。パフォーマンスが慣れた軌道に戻るまで知識ベースとルールベース間の移行が頻繁に発生する。これらの三つのアクティビティにおけるエラーの特徴を表 2.1<sup>[19]</sup> にまとめる。GEMS は機能レベルでヒューマンエラーを分析するのに用いられる。

表 2.1 スリップ・ラプス・ミステークの特徴

エラー形式	スリップ	ラプス	ミステーク	
エラー発生の認知段階	実行段階	記憶段階	計画段階	
パフォーマンス・レベル	スキルベース		ルールベース	知識ベース
行動タイプ	ルーチン行動		問題解決行動	
注意の集中	タスク以外のどこかに		解決中の問題に関連する事項に	
処理の制御モード	主として自動的処理 (スキーマにより) (ルールにより)			制限された 意識的処理
エラー・タイプの 予測性	予測可能 (強い強烈的なエラー) (行動エラー) (ルール・エラー)			さまざま
エラー頻度	絶対数は多いが、 機会割合では少ない		絶対数は少ないが、 機会割合では多い	
外部原因の影響	それほど大きくない (内部要因に影響)		大きい	
エラー発見の容易さ	通常では素早く、 効果的に発見可能		発見困難；時として 外部からの助けにより可能	

### 2.2.2 人間の情報処理プロセスによる分類

人間もコンピュータと同じように、一つの情報処理システムとして捉えることができる。そして、タスク実行過程で行われる機能を明らかにし、そこで分かった処理特性やプロセスを解析や工学的な応用に利用しようとするのが認知工学のアプローチである。ヒューマンエラーを人間の認知情報処理モデルを用いて分類すると、知覚系エラー、思考系エラー、運動系エラーと記憶系エラーに分けられる。本研究では構成したオペレータモデル上でヒューマンエラーを分析する。

- (1) 知覚系エラー：知覚プロセッサはタスクに必要な外部からの情報を眼や耳などの感覚器を通じて、後の思考プロセッサで利用できるように取り込む。情報獲得、物・行為・できごとの同定や状況の認識などが、このプロセッサに含まれる。知覚系のエラーとしては見落す、聞き逃すなどがある。これはオペレータが気が散ったり、夢中になったりして、注意が他に行っている時、よく発生する。
- (2) 思考系エラー：思考プロセッサは外部から取り込んだ情報や記憶内の知識を利用して、照合、推論、問題解決・意思決定、知識・ノウハウの形成などの処理を行う。思考系エラーとしては確認の間違い、判断の間違いなどがある。これは情報の不足による判断の間違いと異常判断ルール自体の間違いに分けられる。
- (3) 運動系エラー：運動プロセッサは思考プロセッサで行った意思決定に対して、人間の運動器官を通じて実際に機器・制御装置の操作を行う。運動系エラーとしては、必要な行為を実行しなかった、または行為は実行されたが必要ではない行為を実行した、行為の実行順序を間違えた、行為実行のタイミングが適切でなかった、行為の対象、方向などの選択を間違えた、行為の強度、実行時間などが適切でなかったなどがある。
- (4) 記憶系エラー：記憶プロセッサは永続的な情報・知識・トピックスを長期記憶に情報を保存する機能、長期記憶に格納されている情報を認知情報処理を行うために一時的な記憶に引っ張り出す機能、および記憶の呼び起こし・検索などの機能を持つ。記憶系エラーとしては忘れ、覚え間違いなどがある。

## 2.3 ヒューマンエラーの事例

まれにしか起こらない機器の故障やプロセス異常時における、人間の行動やヒューマンエラーに関するデータを実作業で収集することは極めて難しい。坂田ら<sup>[47][48]</sup>はトレーニング・シミュレータを用いた異常対応訓練データを収集して緊急時のオペレータの行動を解析した。ここではヒューマンエラーに関するいくつかのデータを取り出して考察する。

1. 自動制御システムの守備範囲外の蒸気使用量の大きな外乱が発生した場合、急激なボイラー負荷上昇によって主蒸気圧力が低下して、基本制御系の働きだけではス

チームの生成が追いつかず、燃焼系および給水系が不安定になる。何らかの監視情報からこの大きな負荷変動の発生に気づけば、予備バーナーの点火を行ってボイラー負荷上昇に備えたり、工場送気量を制限してプラント能力に見合うように負荷を減らしてボイラーの状態を整定させることができる。しかし、負荷変動に気づかず対応処置を取らなかったため、本来避けられるタービン停止を行ってしまった事例がある。情報の見落としは状況の判断をくるわせ、致命的な結果を与える場合が多い。

2. バーナーが失火した場合は、燃料の不完全燃焼により、排ガス中の一酸化炭素の濃度が増加し、ファーンレス圧力、主蒸気圧力が低下する。これはグラフィック画面上でバーナーアイコンの色の変化によって気づくマルファンクションであるが、ある運転チームは最初でアラームに捕らわれて、対応に遅れ、ボイラーを緊急停止した。排ガス中の一酸化炭素濃度の High アラームから、不完全燃焼を疑うべきであるが、ある運転チームはアラームの異常原因究明の間違いから、必要としないストレーナの切り替えを行った。
3. 炉内水管漏れが起こった場合は、炉内に水が噴出し、ドラムレベルが低下する。水の流量はドラムの水位が一定になるように自動的に供給されるため、給水量は蒸気量と漏れた水量を足し合わせた量になり、給水量と蒸気量のバランスが崩れる。また漏れた水が炉内で蒸発すると、炉内圧力が上がり、排ガス中の酸素濃度が低下する。ある運転チームは給水量と発生蒸気量の間で毎時 30 トンの差があることに気づいたが、水管漏れを疑わなかった。またある運転チームは給水量と蒸気量のアンバランスから漏れに気づいたが、その場所を特定できなかった。
4. 蒸気発生大型プラント停止と給水調節弁の固着の 2 つの異常が同時に発生した場合は、蒸気を供給していたプラントが停止したため生成すべき蒸気量が増加するが、給水弁の固着のため必要な給水量が得られない。給水不足により、ドラムレベルが低下する。ボイラーのロードアップを計るため固着バルブをバイパスさせて給水する方法もある。ある運転チームは蒸気供給プラントの負荷調整を行ったが給水調節弁の固着の検証ができなかった。またある運転チームは異常原因の特定ができずプラントを緊急停止した。
5. 予備ポンプを起動してから出口バルブを開くべきだが、ボタンを押す順序を間違えて出口バルブを開いてから予備ポンプを起動した結果、予備ポンプがトリップした。また予備ポンプが完全に起動していない内に出口バルブを開いてしまい、タイ

ミングの不適切により起動した予備ポンプがトリップした。

6. バーナー点火過程中、燃料遮断用バルブ SV02 を開こうとしたが、画面上でバルブ SV02 の近くにある燃料遮断用バルブ SV03 を開いた。操作を続けて、バルブ SV03 を開く番になった時、やっと操作の間違いに気づいた。
7. 水管漏れの異常原因は特定できたが、対応操作手順を覚えていなかった、または完全に覚えていなかった。普段あまり発生しない異常に対しては、訓練直後は覚えているが時間が経つと忘れてしまうことがある。

上に記述したヒューマンエラーの事例を人間の認知情報処理モデルを用いて分類すると、1は知覚系エラーに相当する。負荷の変動に気づけなかった。知覚できなかった情報は覚えられないし、さらにこの情報について論理判断を行うことはできない。2、3、4は思考系エラーに相当する。獲得した情報に基づいての論理判断が適切でなかった。人間は意図に基づいて行動することから、思考系のエラーは間違った行動を導く。5、6は運動系エラーに相当する。動作の手順を間違ったり、動作のタイミングが適切ではなかった。7は記憶系エラーに相当する。本研究ではプラント運転におけるヒューマンエラーをオペレータモデルを使って再現して、その発生メカニズムについて詳しく考察する。

## 2.4 まとめ

CRT オペレーションにおいては、ヒューマンエラーについていろいろな事前対策を取り、オペレータについてもいろいろな運転支援システムを採用しているにも関わらずヒューマンエラーは発生する。本章ではプラント運転におけるヒューマンエラーの発生要因、分析方法と事例をまとめた。本研究では、現場で共有されているヒューマンエラーに関する知見を認知情報処理モデルを用いたリアルタイムシミュレーションで再現することによって、エラー発生のメカニズムを解析し、より適切な対応策を考える。

## 第3章 プラント運転のリアルタイムシミュレーション環境

CRT オペレーションでは、オペレータはコンソールの画面上に表示される画面情報(視覚情報)とアラーム音情報(聴覚情報)に基づいてプラントを運転する。図 3.1 に本研究のため構築したプラントオペレーションのシミュレーション環境を示す。オペレータモデルは個々のオペレータの挙動を実現するためのものであり、HMI (Human Machine Interface) モデルはオペレータのコンソールに相当する。OPC サーバを介して、プラントシミュレータの各種データにアクセスすることができる。Exaopc は Windows NT 上で動作する OPC サーバであり、Data Access (DA) 機能、Alarms & Events (A&E) 機能、Historical Data Access (HDA) 機能を提供する。DA 機能は、アイテム ID を識別子とするプロセスデータの読み込み・書き込みを行う。A&E 機能は、非同期に発生するプラントからのアラームおよびイベントの通知を行う。OPC クライアントは HDA 機能と接続することにより、プラントシミュレータのデータをヒストリカルにアクセスすることができる。また、Exaopc の独自機能として、DA が収集する瞬時値データを自動的に HDA のヒストリカルデータベースに保管する。プラントシミュレータは制御ステーションにより行われる自動制御およびオペレータの介入操作により起こるプラントの状態変化をシミュレーションする。

### 3.1 プラントシミュレータ

近年のプラントシステムは大規模で高度に自動化している。そのためプラントオペレータはプラントシステムに対する高度な技術や知識が必要になったと同時に、万一のあらゆる事態に対応する操作も習得しておくことが必要になった。しかし実プラントシステム上でこれらの知識や操作を習得するためには、長期間の経験が必要である。またこれらの操作には危険を伴う場合もある。このため実機感覚でいつでも行えるプラント運転制御システムのシミュレーションによる訓練が実施されている。訓練システムでは、実機

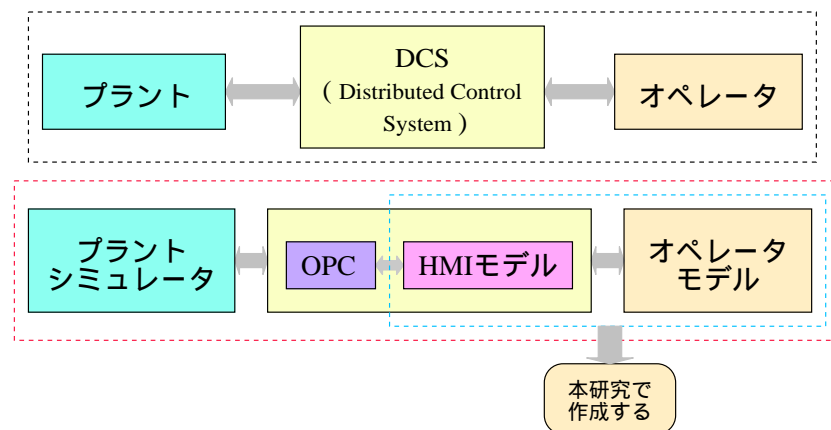


図 3.1 プラント運転のシミュレーション環境

では実施できない異常状態も簡単に模擬することが可能であり、それを利用することで短時間にプラントオペレータのスキルの向上を図ることができる。本研究で用いたボイラープラントシミュレータは DCS (Distributed Control System) の操作およびボイラープラントの特性と異常対応操作を体得することを目的に開発されたプラント運転シミュレータで、多能型オペレータの育成および解析能力の向上をねらいとして開発されたものである<sup>[65]</sup>。オペレータモデルが運転するプラントの挙動をシミュレーションするのがプラントシミュレータである。フィールドコントロールステーション上に実装された運転訓練用ボイラーシミュレータのプロセスフローを図 3.2 に示す。水は給水ポンプにより水タンクからドラムに送られる。燃料は燃料ポンプにより燃料タンクから炉に送られる。空気は送風ファンにより炉に送られる。燃料が炉で燃焼され、発生した燃焼熱によってドラム内で蒸気が発生する。発生した蒸気がタービンに送られ、発電が行われる。燃焼の排ガスは吸引用ファンにより吸い出され、スタックから排出される。シミュレータとして実現されたボイラープラントの仕様を表 3.1 にまとめた。

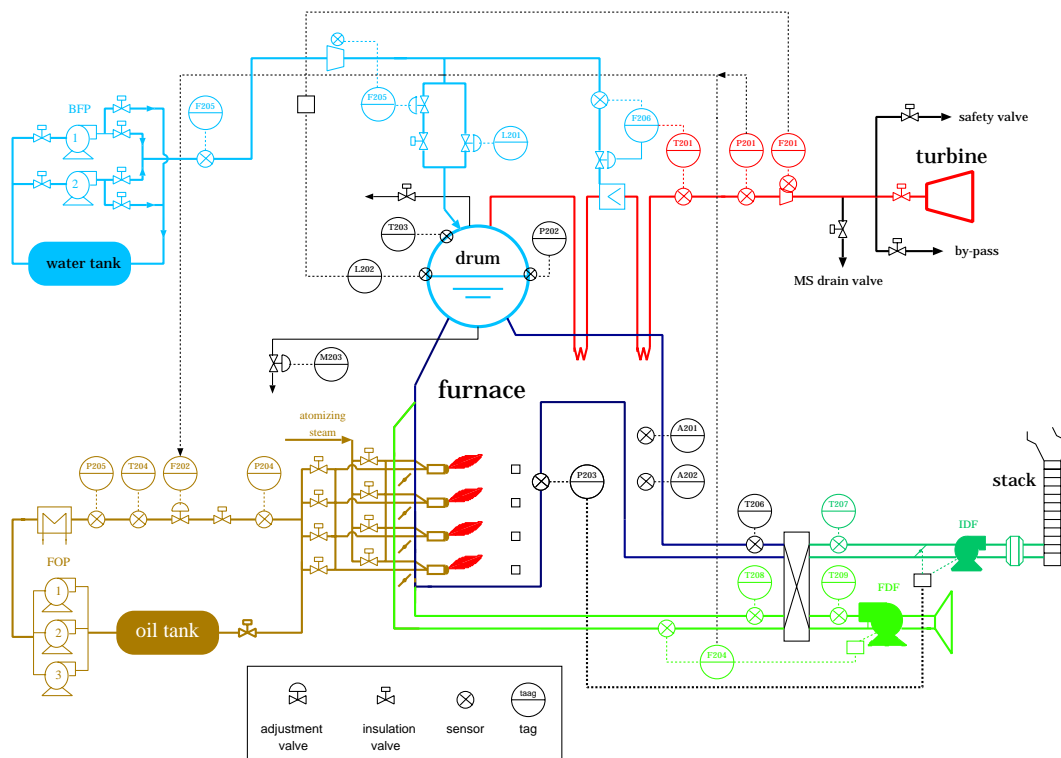


図 3.2 ボイラーシミュレータのプロセスフロー図

表 3.1 ボイラープラントの仕様

項目	仕様
1) ボイラー型式	ドラム型循環方式
2) 通風	平衡通風方式 (重油専焼では押し込み通風方式が普通ですが、本モデルは教育目的のため平衡通風方式とします)
3) 主蒸気温度	485 °C (スーパーヒータ 出口)
4) 蒸発量	80t/h (MCR)
5) 主蒸気圧力	80kg/cm <sup>2</sup> G
6) 燃料	C 重油専焼
7) 燃焼方式	蒸気噴霧式バーナー (4 本手動切換)
8) 主要補器	FDF 2130m <sup>3</sup> /min * 1, 315mmH <sub>2</sub> O IDF 2840m <sup>3</sup> /min * 1, 140mmH <sub>2</sub> O BFP 96kg/cm <sup>2</sup> G * 90t/h * 2 台 燃料ポンプ 50% 能力 * 3 台
9) タービン	10,000kW タービン (タービン、発電機はモデリングされていません)
10) 工場送気	3.5kg/cm <sup>2</sup> G 80t/h 170 °C(23 °C SH)
11) 安全弁	動作圧力 95kg/cm <sup>2</sup> G

このシミュレータのマルファンクション設定画面から、次の 8 つのマルファンクションが設定できる。これらのマルファンクションに対しては標準対応操作手順が決まっている。

1. 燃料ポンプ (FOP)1 台故障
2. 全バーナ失火
3. 給水ポンプ (BFP)1 台トリップ
4. 水管リーク
5. O<sub>2</sub> 計故障
6. 押し込み通風機 (FDF) 能力ダウン
7. 誘引通風機 (IDF) 能力ダウン
8. タービン負荷激減



プラント運転に使われる監視操作画面として以下の画面が用意されている。

1. プラントオーバービュー画面：プロセス全体の運転状態を把握するための監視画面で、この画面から機器及び計器を操作することはできない。
2. ドラム給水操作画面：給水関連機器やドラムレベルの維持、発生水蒸気の状態の監視操作を行うための画面である。
3. バーナ点火画面：燃料のバーナへの供給、バーナの点火、バーナへの空気の送り込みと排気の監視操作を行う画面で、燃料ポンプの起動及び停止はこの画面で行う。
4. ドラフト系統画面：誘引通風機 (IDF) 及び押し込み通風機 (FDF) の監視操作を行う画面である。
5. 燃焼制御 (ACC) 画面：燃焼をつかさどる自動制御システムの制御ループ図がまとめられている。
6. トレンド画面：蒸気系統、燃料系統、給水系統などの主要な状態量の時間変化をグラフ表示する画面で、特定のプロセス変数の変化傾向や変数間の因果関係の崩れから異常原因をみつけたり、応答を見ながら徐々に操作する場合に用いる。
7. アナシエータ画面：警告表示画面で、状態量が設定値の上限や下限に達した時に、時刻、異常箇処、現在値が表示される。設定値の許容範囲内の状態量変化は表示されない。

図 3.3 はプラントオーバービュー画面で、図 3.4 はバーナ点火画面である。シミュレータ・トレーニングでは、限界を越えて運転条件を設定できる、発生頻度の少ない異常を起こすことができるなど、実プラントでは実現できないような条件を模擬的に発生させて、プラントオペレーションの訓練を行うことができる。また、異常状態や運転状態を短時間で設定でき、異常状態を容易に再現できることから、同じ状況について反復して教育訓練効果を上げることができる。さらに異常への対応過程の動作履歴やプロセスデータを容易に記録できることからオペレータの挙動の分析や評価に役立てることができる。しかしこれらのデータはオペレータの行った操作結果や、そのため起こったプロセス状態の変化結果を記録したもので、なぜそのような判断や操作をしたのかに関する情報はふくまれていない。この情報を補うためには、オペレータのふるまいを観察するとともに、心理状態を推測して認知情報処理プロセスをたどって見るしかないのが実情である。



### 3.2 ヒューマンマシンインタフェースモデル

オペレータコンソールに相当する HMI モデルは、オペレータモデルとプラントモデルのインタフェース機能を実現する部分である。HMI モデルの入出力関係を図 3.5 に、入出力情報を表 3.2 にまとめた。HMI モデルは次の機能をもつ。

- プラントシミュレータの状態変化を反映した CRT 上監視画面情報の更新
- see による監視画面情報のオペレータモデルへの提示
- get によるプラント状態に関する情報の獲得とオペレータモデルへの提示
- put によるプラントシミュレータに対する操作
- アラーム音情報のオペレータモデルへの伝達

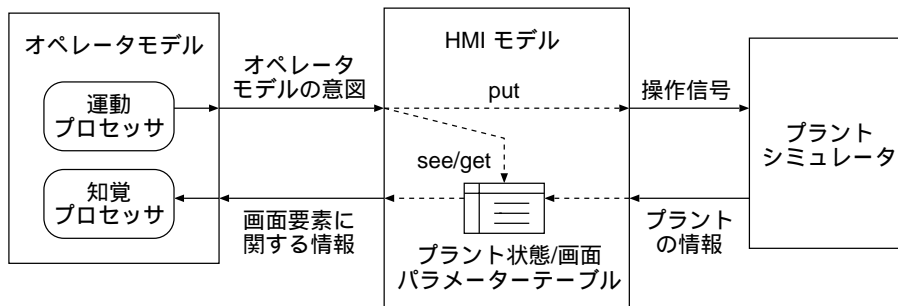


図 3.5 HMI モデルの構造

HMI モデルは、プラントシミュレータから獲得するプラントの情報 (流量、圧力、温度、機器のステータスなどの値) と、監視画面上に表示される全画面要素の情報の管理を行う。そのため監視画面パラメーターテーブルとよぶ管理表を用いた。表 3.3 に例を示す。HMI モデルは、全画面要素の現在状態 (数値、記号、文字列) とアラーム音情報を随時プラントシミュレータから取り込み、テーブルに記入して管理する。テーブルの視覚情報の第 1 列には画面要素名、第 2 列には画面要素の形態 (アイコン、数値とメータ)、第 3 列には画面要素の大きさ (表示面積  $cm^2$ )、第 4 列には画面要素の色 (色はプラントの状態により変わる)、第 5、6 列には画面要素の位置 (X 軸と Y 軸)、第 7 列にはアイコンのみ存在する点滅形態、第 8 列には画面要素の現在のステータスまたは値を示している。

表 3.2 HMI モデルの入出力情報

情報	情報の流れ	内容
(1) オペレータモデルの意図	オペレータモデル → HMI モデル	オペレータモデルで生成される意図
(2) 操作信号	HMI モデル → プラントモデル	プラントモデルへの操作信号 (プラントモデル上の各変数への値設定)
(3) プラントの情報	プラントモデル → HMI モデル	プラントの状態を示す情報
(4) 画面要素に関する情報	HMI モデル → オペレータモデル	監視操作画面上に表示されている画面要素に関する情報 (形態、大きさ、座標、色、点滅、数値など)

表 3.3 画面パラメーターテーブルの例

	画面要素名	情報形態	大きさ	色	X 軸	Y 軸	点滅	現在状態
視覚情報	BFP1	アイコン	1.2	水色	7	5.7	OFF	ON
	FOP3	アイコン	1.32	青色	3.8	25.2	OFF	OFF
	SV13	アイコン	0.7	青色	7.0	8.5	—	OFF
	F207.PV	数値	0.9	白	14.5	10.8	—	80.0
	P203.PV	数値	0.85	白	28	19.3	—	-10.0
	L202.PV	メーター	0.65	白	17.5	14.0	—	0.0
視覚情報	アナンシエータ							
聴覚情報	アラームのオン、オフ							

### 3.3 まとめ

本章では本研究で用いるプラント運転のリアルタイムシミュレーション環境について述べた。オペレータモデルが運転するボイラープラントシミュレータの機能や監視操作画面について説明した後、オペレータモデルとプラントモデルのインタフェース機能を実現する HMI モデルの機能と HMI モデルの情報管理について説明した。

## 第4章 オペレータの認知情報処理モデルとリアルタイムシミュレーション

先行研究<sup>[3][28][54]</sup>を参考にして、図4.1に示すようにオペレータの認知情報処理モデルを構成した。本モデルは知覚、思考、運動の三つのプロセッサと作業記憶と長期記憶2つの記憶領域からなる。図中の矢印は情報の流れを表す。

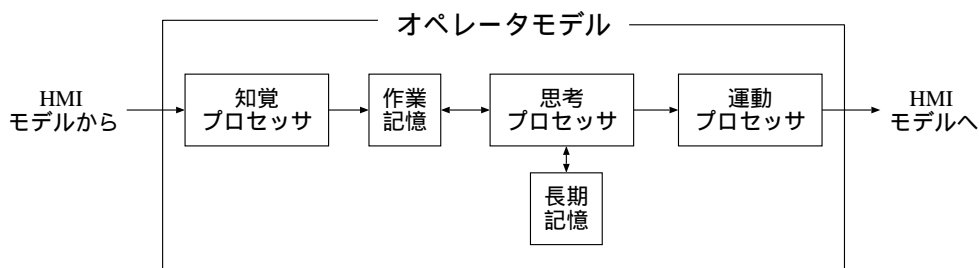


図 4.1 オペレータの情報処理モデルの構成

### 4.1 知覚プロセッサ

感覚器官を通して得た感覚 (sensation) をもとに自分を取り巻く外界の事物や出来事、あるいは自分の身体の状態を認知する機能を知覚 (perception) という。心理学によれば感覚と知覚は各々次のように定義されている<sup>[51]</sup>。

感覚：感覚受容器に固有の刺激が与えられたときに生じる受容過程であり、主体的体験を言う。すなわち、光や音の存在が分かる程度の、これ以上単純化できない要素的なレベルを言う。具体的な例としては、明るさを感じるとか、音が聞こえるといった例がこれに該当する。

知覚：対象物 (パターン) の形態や大きさ、音色など明確な対象の構造が分かるレベル

を言う。視覚においては図形の形や色が把握できるか否かを問題とする。この場合、図形は一般的には背景の存在によって形が違って見え、色が異なって見える。すなわち、物理量と知覚量とは 1:1 に対応しないところに注意が必要である。

感覚の種類には、視覚、聴覚、触覚、嗅覚、味覚の五感と呼ばれる基本的な 5 種類の感覚をはじめ、身体内部の諸器官の状態を認知する内蔵感覚や、運動感覚、平衡感覚などがある。人間と動物は、少なくとも 9 つの感覚をもっているといわれている。しかし、人が得る全情報量を 100 としたとき、視覚から得る情報はその 70 % ほどを、聴覚から得る情報はその 20 % ほどを占める。他の全ての感覚で得る情報で残りの 10 % になっていると言われる [51]。

本オペレータモデルの知覚プロセッサは HMI モデルから監視画面情報 (視覚情報) とアラーム音情報 (聴覚情報) を取り込むとともに、それらの情報を作業記憶を介して思考プロセッサに伝達する。監視画面情報は、オペレータコンソール上の画面要素の情報で、図 4.2 は画面要素の例を示す。

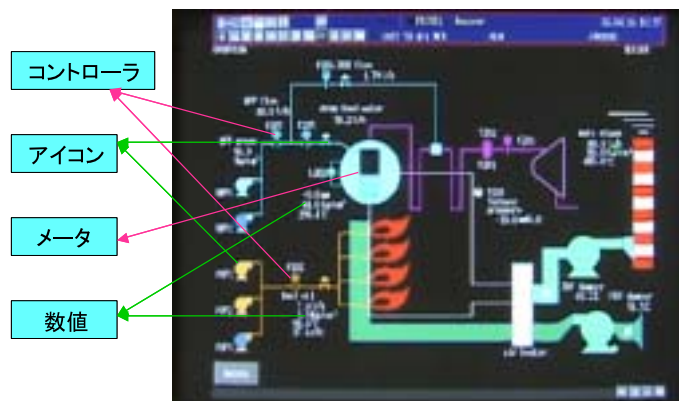


図 4.2 オペレータコンソール上の画面要素

各画面要素は次の属性を用いる。

- 形態：表示の形態
- 大きさ：表示の大きさ
- 座標：監視操作画面上での座標

- 色：表示の色
- 点滅：点滅の有無
- 数値：表示されている数値

## 4.2 思考プロセッサ

思考プロセッサは、オペレータモデルの行動を決定する部分である。作業記憶と長期記憶の情報に基づいて、論理判断によって異常原因の判断を行う。

思考プロセッサが異常発生の有無を監視している状態を「状態監視モード」、異常検出後の対応操作プログラムを実行する状態を「緊急対応モード」と呼ぶ。「状態監視モード」ではオペレータモデルは監視画面上の各要素の情報を順次チェックして異常発生の有無を調べる。異常原因が分かった場合は長期記憶にある緊急対応操作プログラムを実行する。異常原因が特定できず、しかもプラントが制御不可能な場合はプラント運転を停止する。

## 4.3 運動プロセッサ

運動プロセッサは、思考プロセッサで作られる動作コマンド（情報獲得、パラメータ設定等）に従って HMI モデルに対して実行命令を出す。画面上の要素状態の提示は `see` というコマンドを用いて、調整したいパラメータ（画面要素）名、値（ON/OFF、数値、モード等）は `put` というコマンドを用いて、画面上にない情報を獲得したい画面要素名は `get` というコマンドを用いて HMI モデルに伝達する。オペレータモデルの時間特性はヒューマンオペレータの操作に要する時間を考慮して運動プロセッサにおいて調整する。例えば、状態監視モードでは 0.15 秒ごとに監視画面要素をスキャンする。

## 4.4 記憶

記憶は記憶容量と記憶時間により表される。記憶容量はチャンクと言うまとまりの単位で表す。例えば 1945197820022037 という数字は数字の列として記憶すると 16 チャンクになるが、西暦の年号とすると 1945、1978、2002、2037 の 4 チャンクになる。

#### 4.4.1 作業記憶

作業記憶は一時的な記憶の一種で、ある活動や課題の遂行に必要な情報を必要な期間、能動的に保持するメカニズムと定義される<sup>[51]</sup>。作業記憶はある認知活動中に使われる記憶情報として用いられ、活動中に活性化され、意識される記憶情報として用いられ、認知活動の結果の記憶場所として用いられる。作業記憶は次のような特徴<sup>[1]</sup>がある

- 作業記憶は積極的な認知活動と関わり合う。
- 記憶容量は限界があるものの貯蔵できる容量は短期記憶 ( $7\pm 2$ ) より大きい。
- 記憶時間は数秒から数分の間で能動的である。

本章におけるオペレータモデルでの作業記憶は知覚プロセッサを通過した情報の一時的な保持と、プラントを運転するための長期記憶情報の一時的な保持を行う。

#### 4.4.2 長期記憶

長期記憶は、必要な場合に検索可能で永続的な情報の貯蔵庫であり、多くの情報が蓄えられている。長期記憶にはエピソード記憶、意味記憶、手続き記憶の3つのタイプの記憶がある。図 4.3 に長期記憶の区分<sup>[52]</sup>を示す。

- エピソード記憶：個人的な知識で、ある時、ある場所で起こったできごとの記憶である。
- 意味記憶：世界に関する知識、規則、言語、概念のような一般的な知識として蓄えている。
- 手続き記憶：意識にはのぼらないが反復により次第に習熟するような技能などがある。

エピソード記憶と意味記憶についての区別は明らかではない。こうしたことからエピソード記憶と意味記憶をまとめて宣言的記憶と読んで区別する場合もある。その場合、宣言的記憶とは「何か」(knowing what)に関する記憶であり、手続き的記憶は「いかに」(knowing how)に関する記憶であると言われる<sup>[52]</sup>。

本章におけるオペレータ認知情報処理モデルでの長期記憶には、状態監視モードで使われる監視画面情報の正常値 (宣言的記憶) や緊急対応モードで使われる異常対応操作プログラム (手続き記憶) が格納されている。



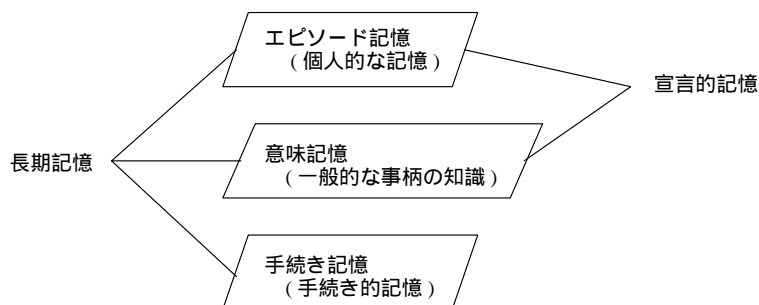


図 4.3 長期記憶の区分

## 4.5 オペレータモデルの動作確認実験

実験の目的は、計算機上に実装したオペレータモデルがリアルタイムでボイラープラントシミュレータを運転できるか、すなわちヒューマンオペレータの状況判断や対応操作がオペレータモデルにより実現できるか、ヒューマンオペレータの時間特性がオペレータモデルに反映されるかを確認することである。このためボイラープラントシミュレータに異常を発生させ、オペレータモデルの異常対応操作の動作履歴を調べた。

### 4.5.1 実験シナリオ

#### シナリオ 1

オペレータモデルが状態監視モードにある時、燃料ポンプ一台 (FOP1) を故障させた。この故障は画面上で異常原因が直接見える故障である。燃料ポンプが故障した場合は、オペレータは空燃比を一時的に上げ、予備ポンプを速やかに起動しなければならない。この後は状態にあわせて空燃比を徐々に戻す。空燃比を増やしてから予備の燃料ポンプ FOP3 を起動することで、燃料流量の急激な増加を抑え、黒煙発生を防ぐことができる。予備燃料ポンプの起動手順を表 4.1 にまとめた。図 4.4 に燃料ポンプ故障時の現象と対応操作手順<sup>[65]</sup>を示し、図 4.5 に燃料ポンプ故障時の対応行動の模範オペレーションをグラフで示した。

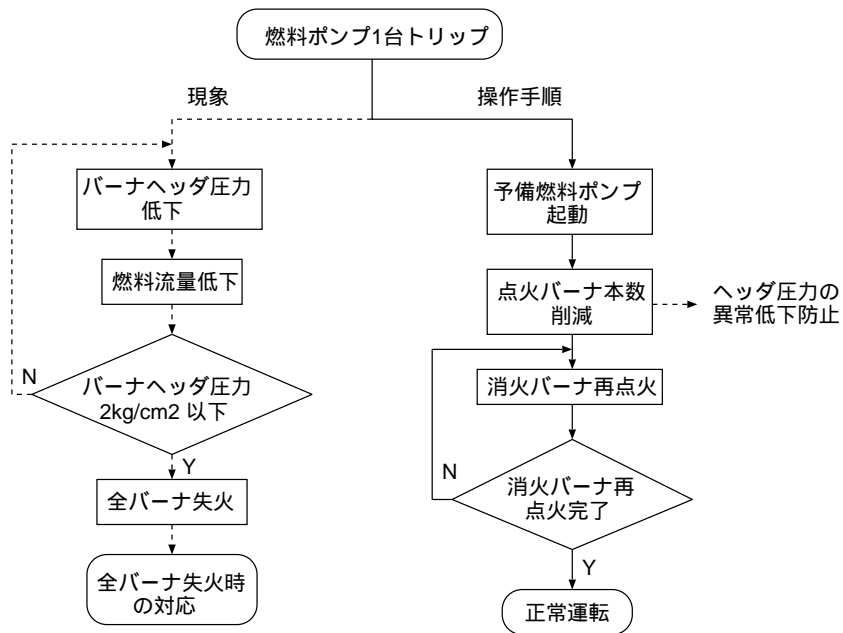


図 4.4 燃料ポンプ故障時の現象と対応操作手順

表 4.1 FOP1 トリップ時の予備燃料ポンプ起動手順

対応行動	操作
空燃比を増やす	空燃比を 1.10 から 1.20 に上げる
予備燃料ポンプ起動	FOP3 を off 状態から on する
空燃比を戻す	空燃比を 1.20 から 1.15 にする 空燃比を 1.15 から 1.12 にする 空燃比を 1.12 から 1.10 にする

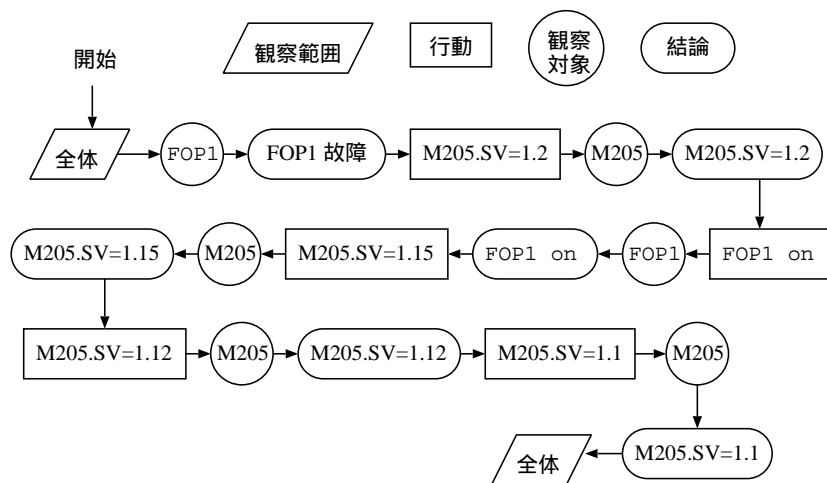


図 4.5 燃料ポンプ故障時の模範オペレーション

## シナリオ 2

全バーナ失火の異常は画面上で異常原因が直接見える異常である。全バーナが失火した場合はオペレータはすぐプラント運転を停止して、燃料を遮断しなければならない。プラント運転停止の手順を表 4.2 にまとめた。図 4.6 に全バーナ失火時の現象と対応操作手順<sup>[65]</sup>を示し、図 4.7 に全バーナ失火時の対応行動の模範オペレーションをグラフとして示した。

表 4.2 プラント運転を停止する対応操作手順

対応行動	操作
MFT(Master Fuel Trip) 全バーナ元弁とアトマイジング スチーム弁を閉、燃料循環弁開	SV01～SV04 を on から off にする。 SV05～SV08 を on から off にする。 SV09 を off から on にする。
負荷をゼロ	SV13 を off から on にする。 M201 値(負荷)を徐々に下げ、0 にする。 SV22 を off から on にする。 SV20 を on から off にする。

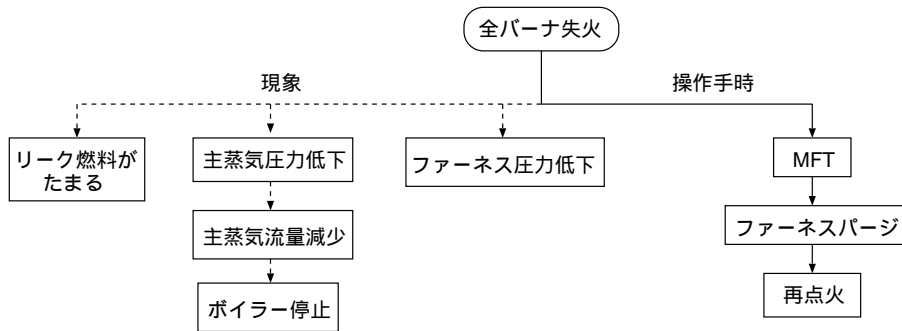


図 4.6 全バーナ失火時の現象と対応操作手順

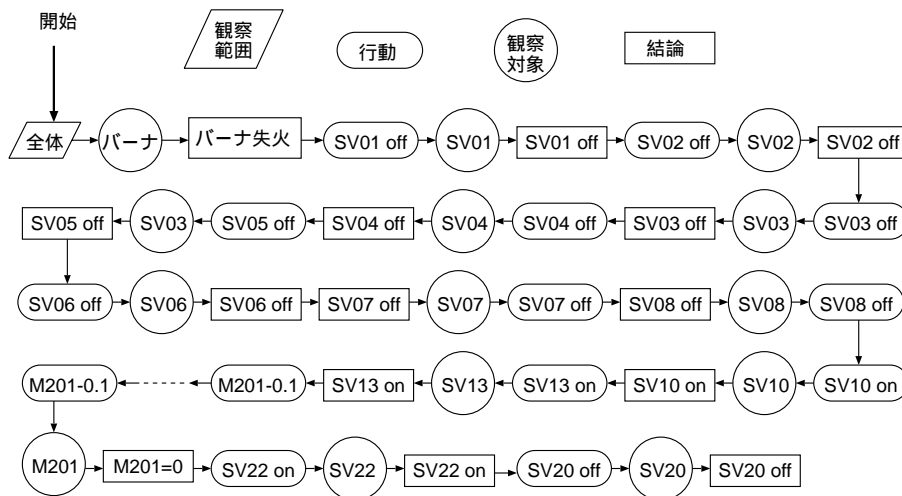


図 4.7 全バーナ失火時の模範オペレーション

### シナリオ 3

オペレータモデルが状態監視モードにある時、給水ポンプ (BFP1) をトリップさせた。この時オペレータは表 4.3 に示す手順で予備ポンプを速やかに起動して、ドラムレベルの低下をできるだけ抑えなければならない。図 4.8 に給水ポンプ (BFP1) トリップ時の現象と対応操作手順<sup>[65]</sup>を示し、図 4.9 に異常対応行動の模範オペレーションを示した。

表 4.3 BFP1トリップ時の予備給水ポンプ起動手順

対応行動	操作
予備ポンプ起動	SV15 を off から on にする。 SV16 を off から on にする。 SV14 が off か確認。 BFP2 を off から on にする。 SV14 を off から on にする。
BFP1 を停止	BFP1 を on から off にする。 SV11 を on から off にする。 SV12 を on から off にする。

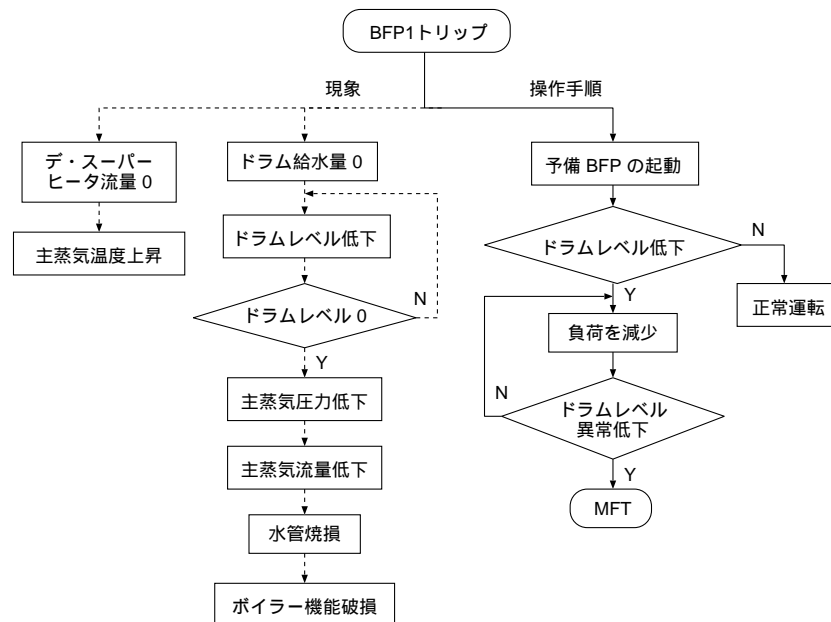


図 4.8 給水ポンプ (BFP1) トリップ時の現象と対応操作手順

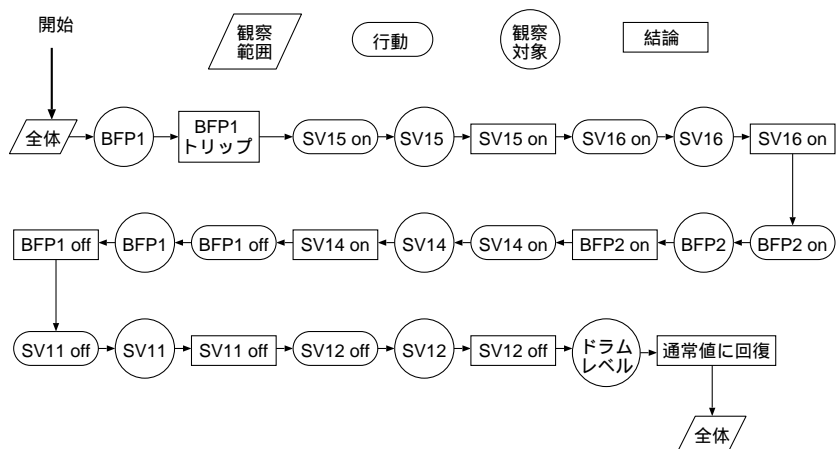


図 4.9 BFP1 トリップ時の模範オペレーション

#### シナリオ 4

水管リークの異常が発生すると、水が炉内で蒸発するため、給水量は蒸気量ともれた水量を足し合わせた量になり、給水量が増加する。その他に、もれた水が炉内で蒸発するため炉内圧力が上がり、排ガス中の酸素濃度が低下する。この異常は原因が直接画面上で見えないため、オペレータは給水量、負荷、炉内圧力と排ガス酸素濃度から水管リークを見つけなければならない。図 4.10 に水管リーク時の現象と対応操作手順<sup>[65]</sup>を示す。リーク量が多い場合は燃料遮断操作手順を実行する。図 4.11 に異常対応の模範オペレーションをグラフで示した。

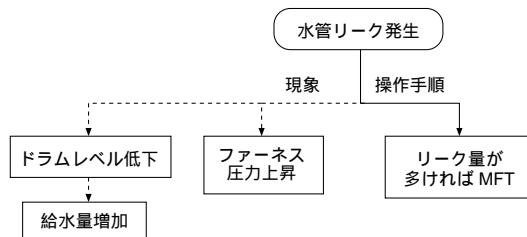


図 4.10 水管リーク時の現象と対応操作手順

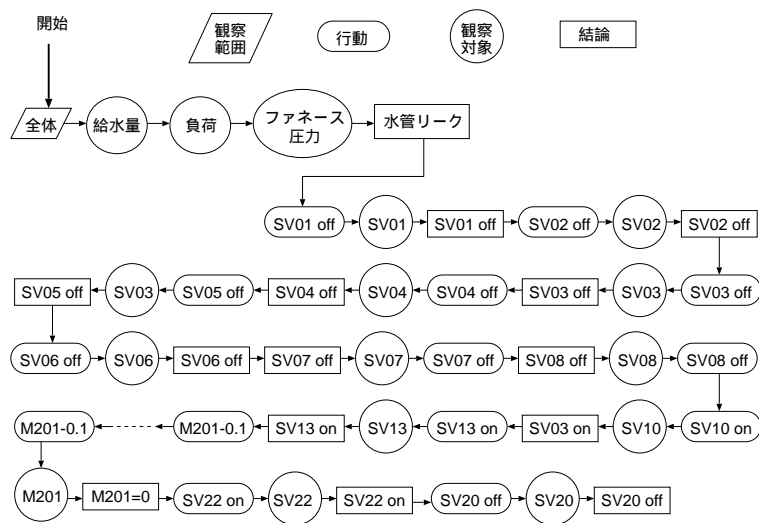


図 4.11 水管リーク時の対応操作の模範オペレーション

## シナリオ 5

オペレータモデルが状態監視モードにある時、排ガス中の酸素濃度ををはかる  $O_2$  計故障を発生させた。 $O_2$  計が故障すると、正常にもかかわらず排気中の酸素濃度が大きく表示されるとともにその値が制御システムに入力され、送風量が減少する。その結果、空気不足により燃料が不完全燃焼して、排気中の一酸化炭素濃度が増加する。またファーンレス圧力は減少する。これは異常原因が直接画面上で見えない異常であるため、オペレータは排ガス酸素濃度、送風量、排ガス一酸化炭素濃度とファーンレス圧力から  $O_2$  計故障を見つけなければならない。 $O_2$  計故障が分かった場合は、表 4.4 に示す手順を取らなければならない。図 4.12 に  $O_2$  計故障時の現象と対応操作手順<sup>[65]</sup>を示し、図 4.13 に  $O_2$  計故障時の模範オペレーションをグラフで示した。

表 4.4  $O_2$  計故障時の対応操作手順

対応行動	操作
空燃比補正ループ (C208) を切る	C208 のモードを AUT から MAN にする
	C208.MV を 40 % から 50 % にする

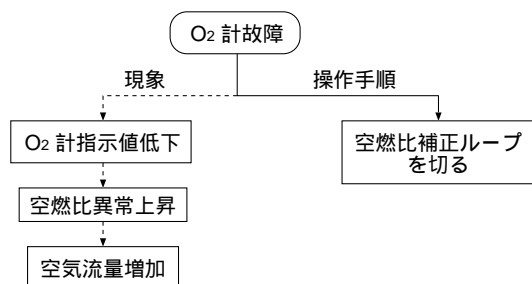


図 4.12 O<sub>2</sub> 計故障時の現象と対応操作手順

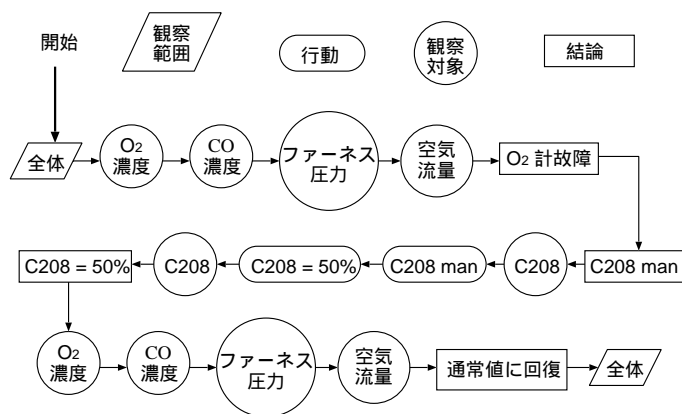


図 4.13 O<sub>2</sub> 計故障時の模範オペレーション

## シナリオ 6

オペレータが監視を行っている時、押し込み通風機 (FDF) 能力ダウンの異常を起こした。この異常は画面上で異常原因が明らかである。この異常が発生するとオペレータは負荷を速やかに減少させて主蒸気圧力の低下をできるだけ抑えなければならない。表 4.5 に異常対応操作の手順を示し、図 4.14 に押し込み通風機 (FDF) 能力ダウン時の現象と対応操作手順<sup>[65]</sup>を示した。図 4.15 に押し込み通風機能力ダウン時の模範オペレーションをグラフで示した。



表 4.5 押し込み通風機 (FDF) 能力ダウン時の対応操作手順

対応行動	操作
ボイラースタを下げる No.4 パーナを消す	SV04 を on から off にする。 SV08 を on から off にする。 M201 値 (負荷) を徐々に下げ、60 にする。
No.3 パーナを消す	SV03 を on から off にする。 SV07 を on から off にする。 M201 値 (負荷) を徐々に下げ、40 にする。

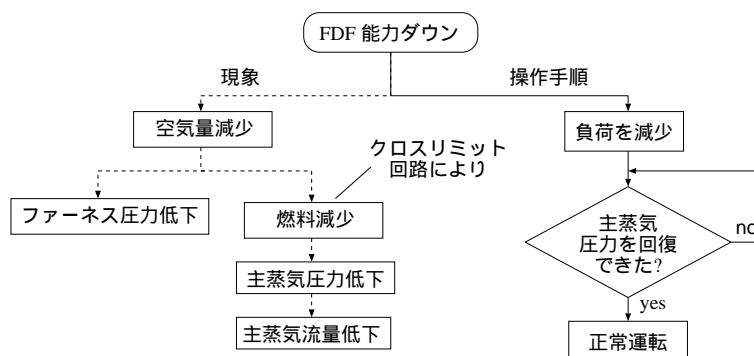


図 4.14 押し込み通風機 (FDF) 能力ダウン時の現象と対応操作手順

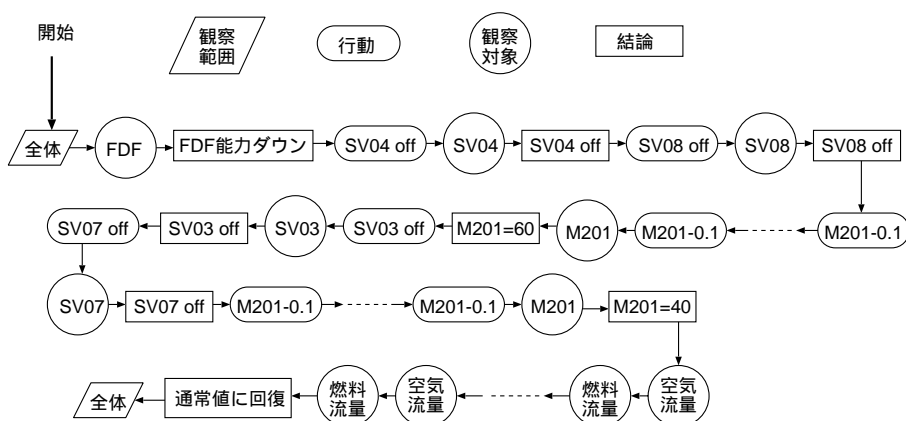


図 4.15 押し込み通風機 (FDF) 能力ダウン時の模範オペレーション

## シナリオ 7

オペレータが監視を行っている時、誘引通風機 (IDF) 能力ダウンの異常を発生させた。この異常は原因が画面上で明らかである。誘引通風機能力ダウンが発生した場合、オペレータはファーンレス圧力の異常上昇または黒煙発生が起こる前にプラント運転を停止しなければならない。図 4.16 に誘引通風機 (IDF) 能力ダウン時の現象と対応操作手順<sup>[65]</sup>を示し、図 4.17 に誘引通風機能力ダウン時の模範オペレーションをグラフで示した。

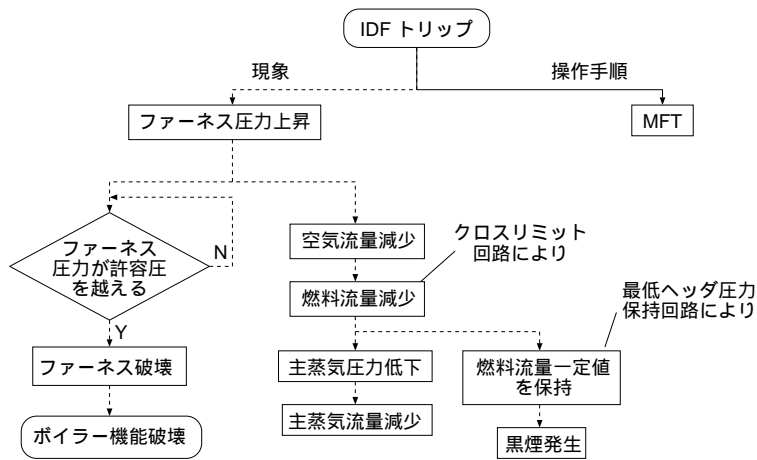


図 4.16 誘引通風機 (IDF) 能力ダウン時の現象と対応操作手順

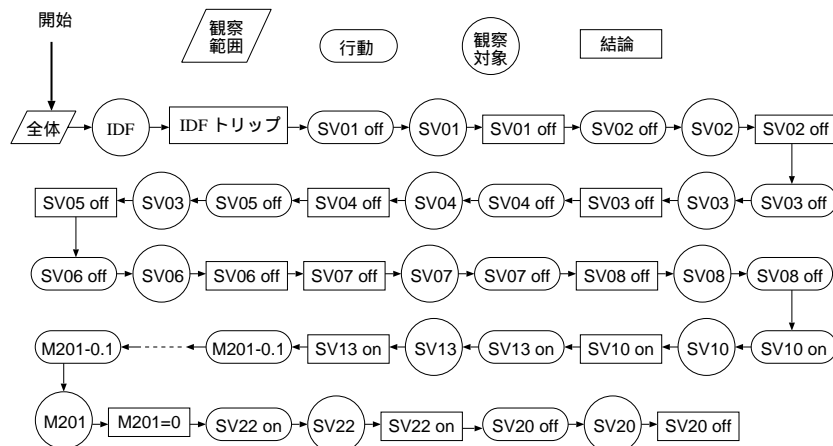


図 4.17 誘引通風機 (IDF) 能力ダウン時の模範オペレーション

## シナリオ 8

プラントにタービン負荷激減の異常を起こした。この異常は画面上で異常原因が明らかでないため、オペレータはプラントの負荷、蒸気流量、燃料流量、空気流量など複数の画面情報から異常原因を判定しなければならない。異常原因が判定した後は、タービンバイパス弁を全開にして主蒸気圧力の急上昇を抑え、安全弁を動作させないようにする。次にユーティリティスチームが供給できる程度までボイラーマスターの設定値を下げる。表 4.6 にタービン負荷激減時の異常対応操作の手順を示し、図 4.18 にタービン負荷激減時の現象と対応操作手順<sup>[65]</sup>を示した。図 4.19 にタービン負荷激減時の模範オペレーションをグラフで示した。

表 4.6 タービン負荷激減時の対応操作手順

対応行動	操作
タービンバイパス弁を開	SV21 を off から on にする。
No.4、8 パーナを消す ボイラーマスタを下げる	SV04 を on から off にする。 SV08 を on から off にする。 M201 値 (負荷) を徐々に下げ、60 にする。
No.3、7 パーナを消す ボイラーマスタを下げる	SV03 を on から off にする。 SV07 を on から off にする。 M201 値 (負荷) を徐々に下げ、40 にする。

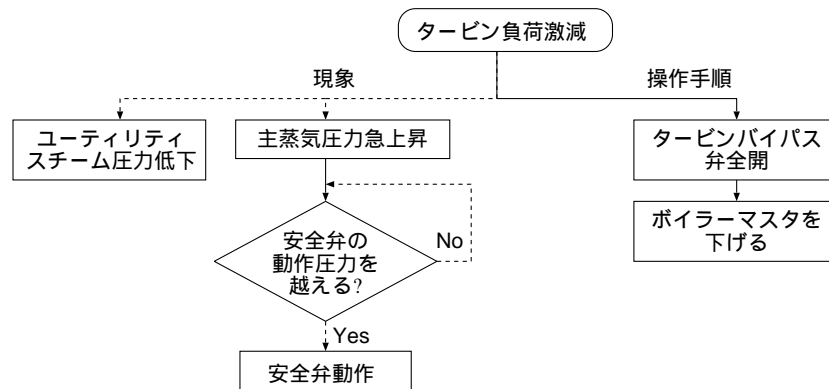


図 4.18 タービン負荷激減時の現象と対応操作手順

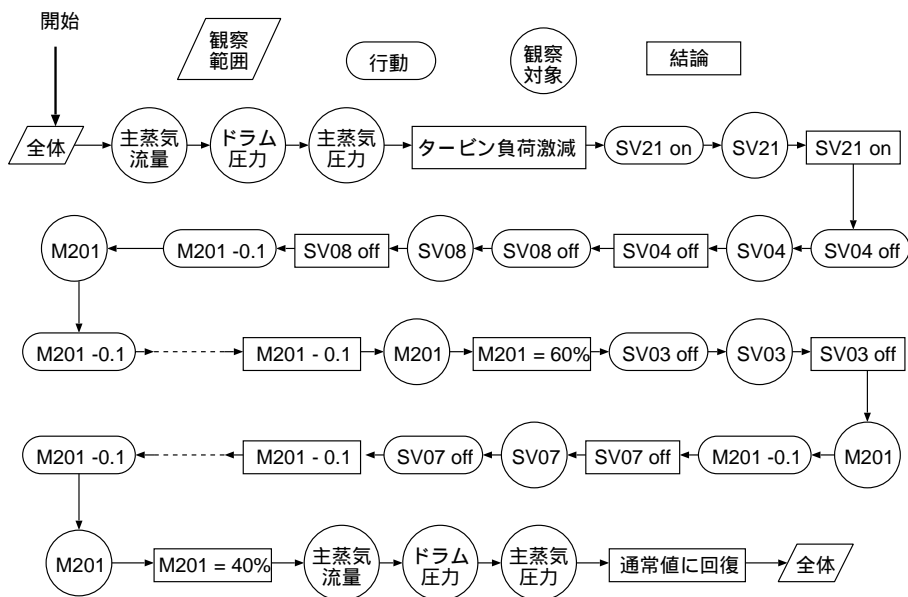


図 4.19 タービン負荷激減時の模範オペレーション

#### 4.5.2 実験結果と考察

本研究では Visual Basic 言語を利用して HMI モデルとオペレータモデルを作成した。監視操作の中心であるグラフィック画面情報は Microsoft Access を用いてデータベースとして表現した。

図 4.20 に状態監視モードでプラント全体の運転状況を把握するために使われるオーバービュー画面のデータベースの一部分を示す。HMI モデルは、全画面要素の現在状態(数値、記号、文字列)とアラーム音情報を周期的にプラントモデルから取り込み、テーブルに記入して管理する。テーブルの第 1 列は画面要素の番号、第 2 列はプラントシミュレータ側のタグ名、第 3 列は画面要素名、第 4 列は画面要素の形態(アイコン、数値とメータ)、第 5 列は画面要素の大きさ(表示面積  $cm^2$ )、第 6 列は画面要素の色(色はプラントの状態により変わる)、第 7、8 列は画面要素の位置(X 軸と Y 軸)、第 9 列はアラーム音情報の有無、第 10 列はアイコンのみ存在する点滅形態、第 11 列は故障を示すアイコンのステータス、第 12 列は画面要素の現在のステータスまたは値を示す。

Item No.	Item Name	Unit	Value	Alarm	Unit	Value	Alarm	Unit	Value	Alarm
1	11000 PV	11000	11000	OK	11000	11000	OK	11000	11000	OK
2	11001 PV	11001	11001	OK	11001	11001	OK	11001	11001	OK
3	11002 PV	11002	11002	OK	11002	11002	OK	11002	11002	OK
4	11003 PV	11003	11003	OK	11003	11003	OK	11003	11003	OK
5	11004 PV	11004	11004	OK	11004	11004	OK	11004	11004	OK
6	11005 PV	11005	11005	OK	11005	11005	OK	11005	11005	OK
7	11006 PV	11006	11006	OK	11006	11006	OK	11006	11006	OK
8	11007 PV	11007	11007	OK	11007	11007	OK	11007	11007	OK
9	11008 PV	11008	11008	OK	11008	11008	OK	11008	11008	OK
10	11009 PV	11009	11009	OK	11009	11009	OK	11009	11009	OK
11	11010 PV	11010	11010	OK	11010	11010	OK	11010	11010	OK
12	11011 PV	11011	11011	OK	11011	11011	OK	11011	11011	OK
13	11012 PV	11012	11012	OK	11012	11012	OK	11012	11012	OK
14	11013 PV	11013	11013	OK	11013	11013	OK	11013	11013	OK
15	11014 PV	11014	11014	OK	11014	11014	OK	11014	11014	OK
16	11015 PV	11015	11015	OK	11015	11015	OK	11015	11015	OK
17	11016 PV	11016	11016	OK	11016	11016	OK	11016	11016	OK
18	11017 PV	11017	11017	OK	11017	11017	OK	11017	11017	OK
19	11018 PV	11018	11018	OK	11018	11018	OK	11018	11018	OK
20	11019 PV	11019	11019	OK	11019	11019	OK	11019	11019	OK
21	11020 PV	11020	11020	OK	11020	11020	OK	11020	11020	OK
22	11021 PV	11021	11021	OK	11021	11021	OK	11021	11021	OK
23	11022 PV	11022	11022	OK	11022	11022	OK	11022	11022	OK
24	11023 PV	11023	11023	OK	11023	11023	OK	11023	11023	OK
25	11024 PV	11024	11024	OK	11024	11024	OK	11024	11024	OK
26	11025 PV	11025	11025	OK	11025	11025	OK	11025	11025	OK
27	11026 PV	11026	11026	OK	11026	11026	OK	11026	11026	OK
28	11027 PV	11027	11027	OK	11027	11027	OK	11027	11027	OK
29	11028 PV	11028	11028	OK	11028	11028	OK	11028	11028	OK
30	11029 PV	11029	11029	OK	11029	11029	OK	11029	11029	OK
31	11030 PV	11030	11030	OK	11030	11030	OK	11030	11030	OK
32	11031 PV	11031	11031	OK	11031	11031	OK	11031	11031	OK
33	11032 PV	11032	11032	OK	11032	11032	OK	11032	11032	OK
34	11033 PV	11033	11033	OK	11033	11033	OK	11033	11033	OK
35	11034 PV	11034	11034	OK	11034	11034	OK	11034	11034	OK
36	11035 PV	11035	11035	OK	11035	11035	OK	11035	11035	OK
37	11036 PV	11036	11036	OK	11036	11036	OK	11036	11036	OK
38	11037 PV	11037	11037	OK	11037	11037	OK	11037	11037	OK
39	11038 PV	11038	11038	OK	11038	11038	OK	11038	11038	OK
40	11039 PV	11039	11039	OK	11039	11039	OK	11039	11039	OK
41	11040 PV	11040	11040	OK	11040	11040	OK	11040	11040	OK
42	11041 PV	11041	11041	OK	11041	11041	OK	11041	11041	OK
43	11042 PV	11042	11042	OK	11042	11042	OK	11042	11042	OK
44	11043 PV	11043	11043	OK	11043	11043	OK	11043	11043	OK
45	11044 PV	11044	11044	OK	11044	11044	OK	11044	11044	OK
46	11045 PV	11045	11045	OK	11045	11045	OK	11045	11045	OK
47	11046 PV	11046	11046	OK	11046	11046	OK	11046	11046	OK
48	11047 PV	11047	11047	OK	11047	11047	OK	11047	11047	OK
49	11048 PV	11048	11048	OK	11048	11048	OK	11048	11048	OK
50	11049 PV	11049	11049	OK	11049	11049	OK	11049	11049	OK
51	11050 PV	11050	11050	OK	11050	11050	OK	11050	11050	OK

図 4.20 監視画面パラメータテーブル (実例)

オペレータモデルの動作は画面上で確認することができる。作成したオペレータモデルは、人間のオペレータのように、異常原因が画面上で直接見える異常である、燃料ポンプ (FOP1) 一台故障、全バーナ失火、給水ポンプ (BFP1) 一台トリップ、押し込み通風機 (FDF) 能力ダウン、誘引通風機 (IDF) 能力ダウンに対しては、直ちに長期記憶から緊急対応手順プログラムを取り出しこれを実行した。異常原因が画面上で直接見えない異常である、水管リーク、 $O_2$  計故障、タービン負荷激減に対しても、複数の画面データの変化から異常原因を特定し、緊急対応手順プログラムを取り出し、リアルタイムで異常に対応した。人間オペレータの時間特性が本オペレータモデルにより実現できることも確認した。図 4.21 に、燃料ポンプ (FOP1) 故障、全バーナ失火、給水ポンプ (BFP1) トリップ、水管リーク時のオペレータモデルの異常対応操作の履歴を示した。図 4.22 に、 $O_2$  計故障、押し込み通風機 (FDF) 能力ダウン、誘引通風機 (IDF) 能力ダウン、タービン負荷激減時のオペレータモデルの異常対応操作の履歴を示した。作成したオペレータモデルがボイラープラントシミュレータに発生した 8 つの異常に対して異常対応操作の模範オペレーション通りに動作することを確認した。

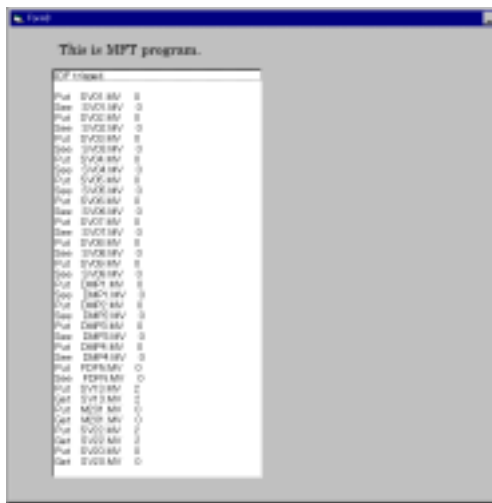




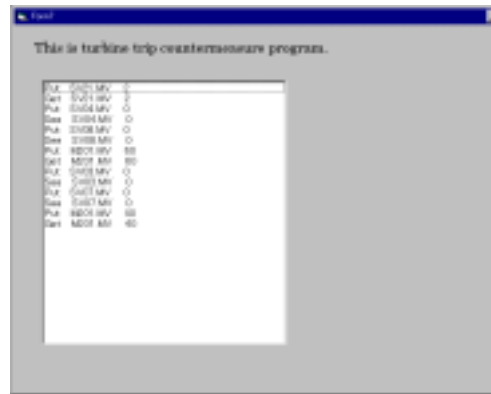
(e) O<sub>2</sub> 計故障



(f) 押し込み通風機 (FDF) 能力ダウン



(g) 誘引通風機 (IDF) 能力ダウン



(h) タービン負荷激減

図 4.22 オペレータモデルの異常対応操作履歴

## 4.6 まとめ

Visual Basic 言語を使って、HMIモデルとオペレータの情報処理モデルを作成し、プラントシミュレータと結合した後、リアルタイムシミュレーションを行った。HMIモデルは、オペレータモデルの意図通りにプラントシミュレータの情報をオペレータモデルに伝達するとともに、プラントシミュレータに対して設定操作を実行することができた。作成したオペレータモデルを使ってボイラープラントシミュレータの運転を行った結果、人間オペレータのように、プラントの状態を監視することができた。また異常を発見した場合は異常原因を判定して、緊急対応操作プログラムを長期記憶から取り出し、リアルタイムで異常に対応することができた。作成したオペレータモデルは、人間のオペレータのように、異常原因が画面上で直接見える異常に対しては、直ちに定型の対応操作を実行し、異常原因が画面上で直接見えない異常に対しては複数の画面情報から異常原因をつきとめ、異常に対応することができた。また、人間オペレータの時間特性が本オペレータモデルによって再現できることも確認できた。

プラント運転において、プラントの状況、オペレータの思考と行動、オペレータの心理状態は互いに複雑に影響を及ぼしあう。プラントの状況は人間の思考・行動の影響を受け、思考・行動は心理状態およびプラントの状況の影響を受け、心理状態はプラントの状況および思考・行動の影響を受けて変動する。それゆえプラント運転における人間の行動を考えるうえで、これらの要素を個別に解析するだけでなく、時々刻々と変わる動的な状況の中で各々の要素がどのように影響を及ぼしあうかを解析することが必要である。このため次章では、オペレータの情報処理モデルに心理状態、注視点の位置と視野の情報を追加して、心身状態を含むオペレータモデルを開発する。



## 第5章 心身状態を考慮したオペレータモデル

図 5.1 に心身状態を考慮したオペレータモデルの構成を示す。オペレータの認知情報処理モデルは 4 章と同じように知覚、思考、運動の三つのプロセッサと作業記憶と長期記憶 2 つの記憶領域からなる。本章では新しくオペレータの認知情報処理モデルに心理状態、注視点の位置と視野の情報を追加して、心身状態を考慮したオペレータモデルを開発する。各プロセッサと記憶については 4 章よりさらに詳しくモデル化を行う。心理状態は知覚、思考、運動の三つのプロセッサ、作業記憶、視野に影響を与えるとともに、思考プロセッサの影響を受ける。注視点の位置は知覚プロセッサと運動プロセッサに影響を与えるとともに運動プロセッサの影響を受ける。

### 5.1 オペレータの心身状態

#### 5.1.1 オペレータの心理状態

緊急対応時のプラントオペレータが問題解決に向かって順調に論理的思考を行っているかどうかを判断することを目的に、思考状態を判定する研究が進められている<sup>[30]</sup>。本研究ではこの結果を用いて、オペレータの心理状態を三つのモード A、B、C で表す。

モード A (自信状態) : 比較的簡単に状況が判断でき、対応についても方針が立っていて、判断や問題解決に自信を持っている状態である。

モード B (推測状態) : 問題解決中で、不安はほとんどないが、状況判断や対応について結論を得るまでに至っていない。色々な可能性について推測中である。

モード C (混乱状態) : 状況が把握できずいたり、状況の解釈に矛盾があったりして、対応方針が立てられず、問題解決に不安がある。思考や行動に混乱が見られたりする状態である。この状態ではヒューマンエラーを起こし易い。

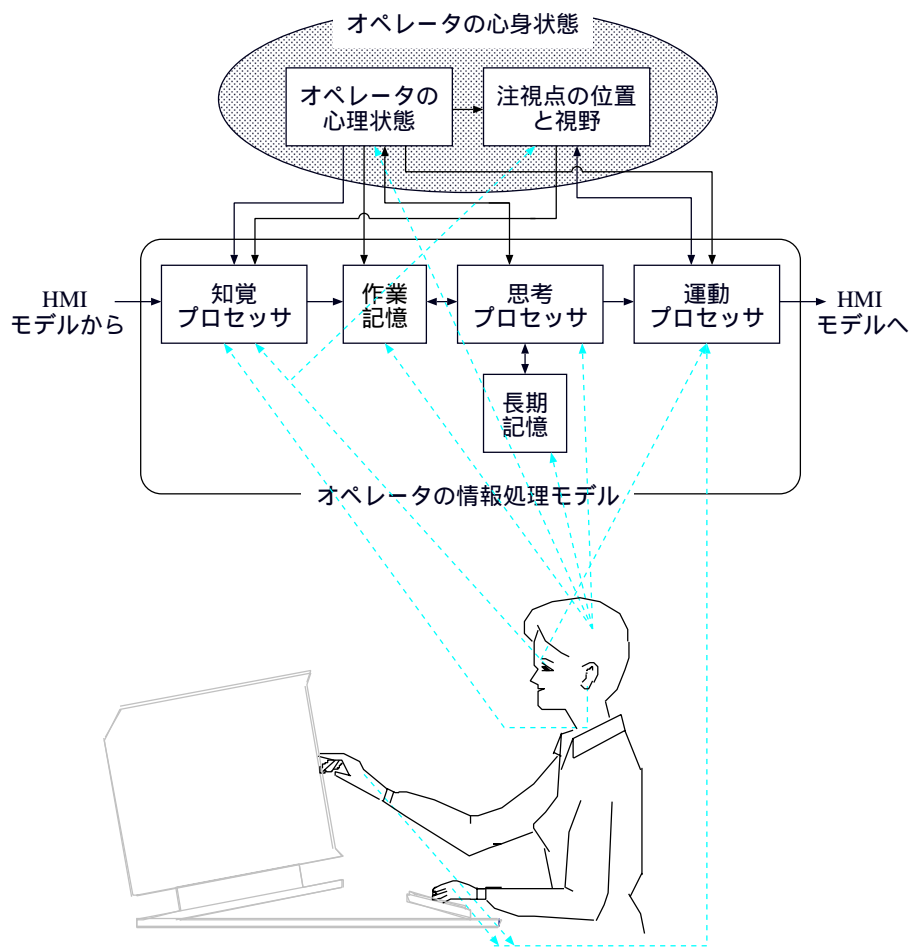


図 5.1 心身状態を考慮したオペレータモデルの構成

オペレータの心理状態、オペレータの思考・行動、プラントの状況は互いに複雑に影響を及ぼしあう。ここでは心理状態はオペレータの運転状況の変化により遷移するとした。オペレータの運転状況として次の5つの状態を定義した。①監視操作中、②画面情報の異常に気づいて連想状態変数を観察中、③トレンド画面観察中、④異常対応動作中、⑤異常原因が判定できない。図5.2に示した運転状況の変化が考えられる。心理状態の状態遷移を表5.1にまとめた。

表 5.1 心理状態の変化

元の心理状態	オペレータの運転状況の変化	変化後の心理状態
モード A	①監視操作 ①監視操作	モード A
モード A	①監視操作 ②連想状態変数を観察	モード B
モード A	①監視操作 ④異常対応操作	モード B
モード B	④異常対応操作 ①監視操作	モード A
モード B	①監視操作 ①監視操作	モード B
モード B	①監視操作 ④異常対応操作	モード B
モード B	①監視操作 ②連想状態変数を観察	モード B
モード B	②連想状態変数を観察 ④異常対応操作	モード B
モード B	②連想状態変数を観察 ③トレンド画面観察	モード B
モード B	③トレンド画面観察 ④異常対応操作	モード B
モード B	③トレンド画面観察 ⑤異常原因が判定できない	モード C
モード B	④異常対応操作 ①監視操作	モード A
モード B	⑤異常原因が判定できない ①監視操作	モード C
モード C	①監視操作 ①監視操作	モード C
モード C	①監視操作 ④異常対応操作	モード C
モード C	①監視操作 ②連想状態変数を観察	モード C
モード C	②連想状態変数を観察 ④異常対応操作	モード C
モード C	②連想状態変数を観察 ③トレンド画面観察	モード C
モード C	③トレンド画面観察 ④異常対応操作	モード C
モード C	③トレンド画面観察 ⑤異常原因が判定できない	モード C
モード C	④異常対応操作 ①監視操作	モード B
モード C	⑤異常原因が判定できない ①監視操作	モード C

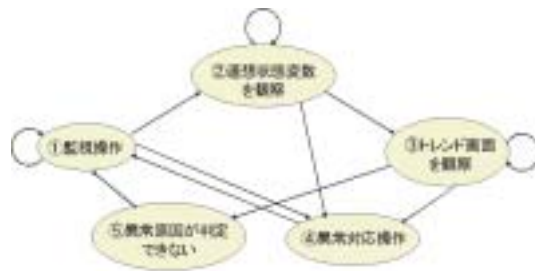


図 5.2 オペレータの運転状況の遷移

### 5.1.2 オペレータの注視点の位置と視野

プラント情報を収集する上で重要な役割を果たす目の動きを注視点座標の時間変位で表す。注視点を中心とする認識可能な領域 (視野) の広さにより、オペレータの画面情報に対する認識率が変わる。図 5.3 に注視点と視野を示す。視角 ( $\theta$ ) と視野直径 ( $D$ ) は式 (5.1) により計算する。

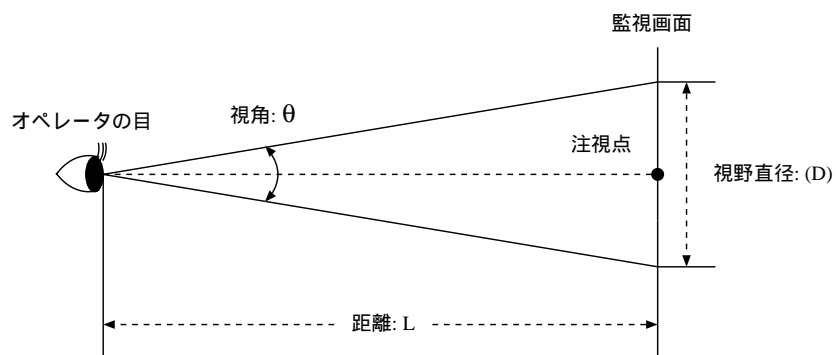


図 5.3 オペレータの注視点

$$\begin{aligned} \theta &= v - \delta \\ D &= 2L * \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \end{aligned} \tag{5.1}$$

ここで、 $v$  は  $2 \leq v \leq 10$  °間の定数で<sup>[8]</sup> 人によって異なる。 $\delta$  は心理状態により決まる値でモード A、B、C 順に大きくなる。つまり心理状態のモード A、B、C 順に従って、視角が小さくなり、視野の直径が小さくなる。 $L$  はオペレータと画面の距離である。

## 5.2 知覚プロセッサ

知覚プロセッサは、HMI モデルから監視画面情報 (視覚情報) とアラーム音情報 (聴覚情報) を取り込むとともに、それらの情報を作業記憶を介して思考プロセッサに伝達する役目をもつ。この時、作業記憶に取り込まれる情報は、オペレータの心身状態や情報の提示方法に応じて変わる。図 5.4 に知覚プロセッサの機能をブロック図で表現した。視覚について次のような関係が知られている。

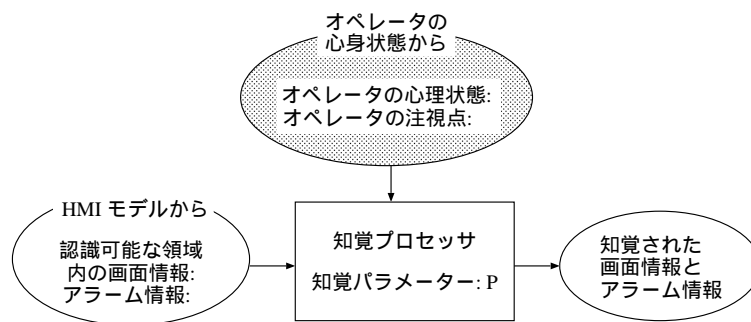


図 5.4 知覚プロセッサの機能

- ① オペレータは画面要素が大きいほど知覚し易い。
- ② オペレータは画面要素と背景の色差が大きいほど知覚し易い。
- ③ オペレータは視野内の画面要素の中心が注視点に近いほど知覚し易い。
- ④ オペレータの心理状態について、モード A の時が一番知覚でき、モード B、モード C 順に知覚できなくなる。

これらのことを考慮して、視覚結果を直接支配する知覚パラメーター (P) を画面要素の大きさ、画面要素と背景の色差、画面要素と注視点間の距離、オペレータの心理状態の関数として表現した。

$P = P(\text{画面要素の相対的な大きさ, 画面要素の色差, 画面要素と注視点間の距離, オペレータモデルの心理状態})$

画面要素と背景の色差については、色の3属性(彩度、明度、色相)によって表す。この3属性を数値で表現するために、CIE(国際照明委員会)が1976年に推奨したLab表色系<sup>[18]</sup>を用いる。これは知覚的にほぼ均等な歩度をもつ色空間表現の一つで、色差を表すのに多く用いられている。図5.5に示したLab表色系に基づいて色を定義する場合、Lは明度(黒から白)を表し、aは色相(赤または緑の度合い)を表し、bは彩度(黄または青の度合い)を表す。色差はこの色空間の中での2点間の直線距離を計算して求める。画面要素と背景の色差により、色の知覚性能を決める。色の指定はRGB(RED、GREEN、BLUE)モデルを使って、RRGGBBのように3要素の値を16進数(00(0)-FF(255))で指定する(例えば：赤ならFF0000、青なら0000FFと表わす)。RGBモデルからLab表色系への変換式として次式<sup>[18]</sup>を用いる。

$$\begin{cases} L = 116(Y/Y_0)^{1/3} - 16 \\ \quad (Y/Y_0) > 0.008856 \\ a = 500[(X/X_0)^{1/3} - (Y/Y_0)^{1/3}] \\ b = 200[(Y/Y_0)^{1/3} - (Z/Z_0)^{1/3}] \end{cases}$$

ここで

$$\begin{cases} X = 0.412391R + 0.357584G + 0.180481B \\ Y = 0.212639R + 0.715169G + 0.072192B \\ Z = 0.019331R + 0.119195G + 0.950532B \end{cases}$$

ここで使われる $X_0$ 、 $Y_0$ 、 $Z_0$ などはデバイスにより異なる。

知覚の成否を知覚パラメータのしきい値 $\rho_1$ 、 $\rho_2$ で判断する方式を導入した。知覚パラメータが $\rho_1$ より小さい画面情報は知覚できない。知覚パラメータが $\rho_1$ より大きく、 $\rho_2$ より小さくなるとオペレータモデルは画面上の色を知覚できるようになるが数値は知覚できない。知覚パラメータが増加して $\rho_2$ より大きくなると色と数値を知覚できるようになる。二つのしきい値は人間についての実測データを基に決める必要があるが、本研究では現場の定性的な知見に合うように調整した。一般に監視画面に習熟するに従って画面要素を知覚できる割合が増えることが分かっている。これは知覚パラメータのしきい値が小さくなることと解釈できる。

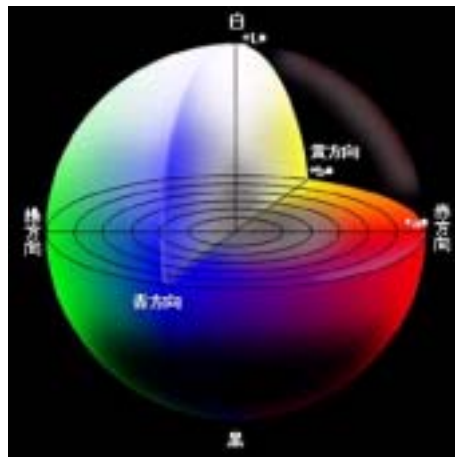


図 5.5 Lab 表色系<sup>[18]</sup>

### 5.3 思考プロセッサ

思考プロセッサは新しい情報が入る度に、作業記憶と長期記憶のデータに基づいて論理判断や推論を行い、異常発生判断および異常原因の判定を行う。図 5.6 に思考プロセッサの機能をブロック図で表現した。4 章と同じように思考プロセッサがプラントの状態、すなわち異常発生の有無を監視している状態を「異常監視モード」、異常検出後その原因を突き止め対応操作を行う状態を「緊急対応モード」と呼ぶことにする。「異常監視モード」では、注視点を移動して、監視画面上の各要素の状態変化を順次チェックして、異常発生の有無を調べ、異常が発生した場合は異常原因の診断を行う。異常原因が判明した場合は、「緊急対応モード」に移行する。

図 5.7 はオペレータの異常原因の探索と対応操作のフローチャートを示す。例えば、ポンプトリップなどでは、異常が発生すると画面上のアイコンが点滅する。このように画面上の視覚情報で異常原因が判明し対応動作も熟知している場合は、長期記憶にある異常対応プログラムを取り出しスキルベースで実行する。一方、画面上で異常原因が明らかでない場合は、とりあえずの対応操作をしながら異常原因を探索する。異常原因が判明すれば長期記憶にある異常対応プログラムを取り出し実行する。原因が判明しない場合は制御可能かどうかを判断して必要ならばプラント運転を停止する。

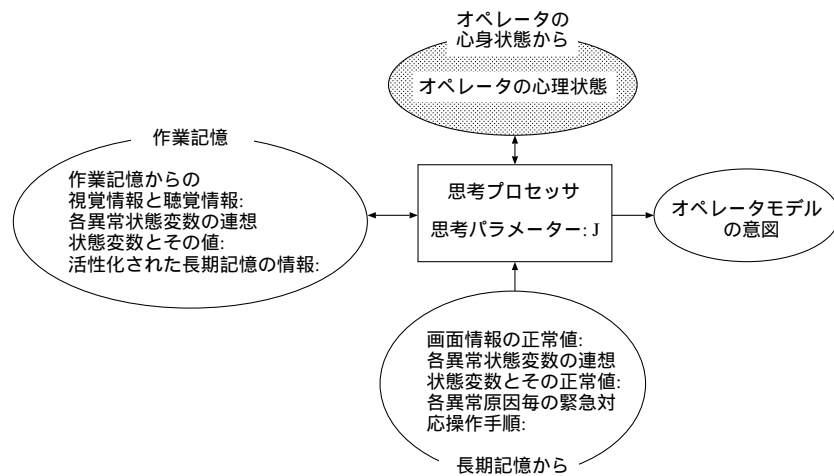


図 5.6 思考プロセッサの機能

「異常監視モード」において一つの状態変数の異常に気づいた時、オペレータはこの異常状態変数から連想できるすべての状態変数を次々と観察して各々についての異常の有無を調べる。連想状態変数の異常パターンに基づいて異常原因を判定する異常診断手順を図 5.8 に示した。異常状態変数から連想する状態変数はオペレータの知識量に依存する。例えば、異常状態変数の存在する系統の全状態変数や他の系統の主要状態変数などが考えられる。本研究で対象としたボイラープラントは、図 5.9 に示したように給水系統、給油系統、ドラム系統、負荷系統、ファーンズ系統、排気系統と送風系統の七つの系統に分類できる。図には各系統の主要状態変数も示した。付録 A に各系統の全状態変数をまとめて示す。連想状態変数を観察しても異常原因を特定できない場合は、画面を変えてトレンド画面を観察して、トレンド画面上の蒸気系統、燃料系統、給水系統などの主要状態変数に基づいて、さらに異常原因を追求する。



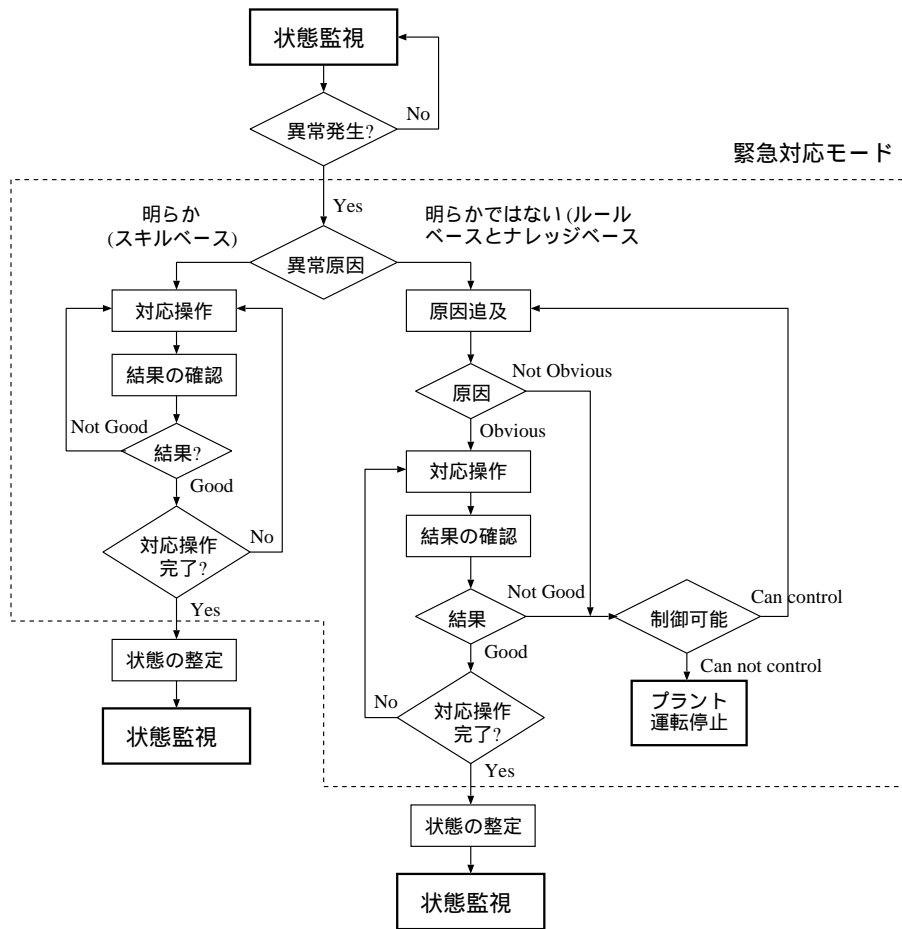


図 5.7 異常原因の探索と対応操作

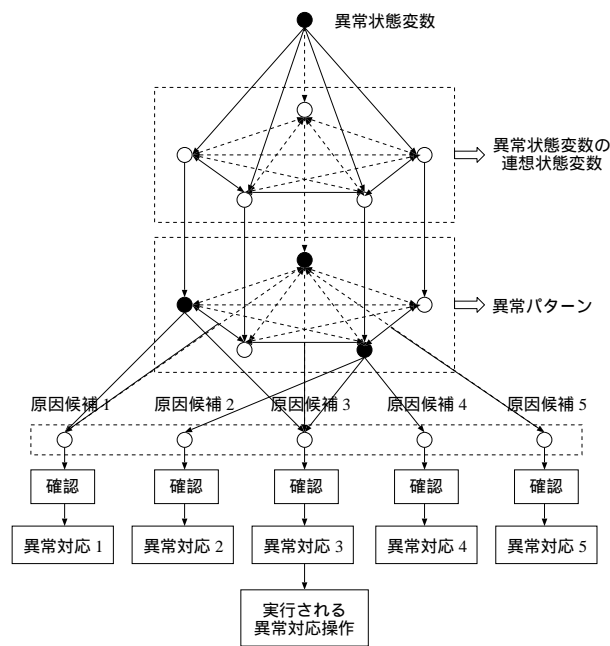


図 5.8 連想状態変数に基づいた異常診断手順

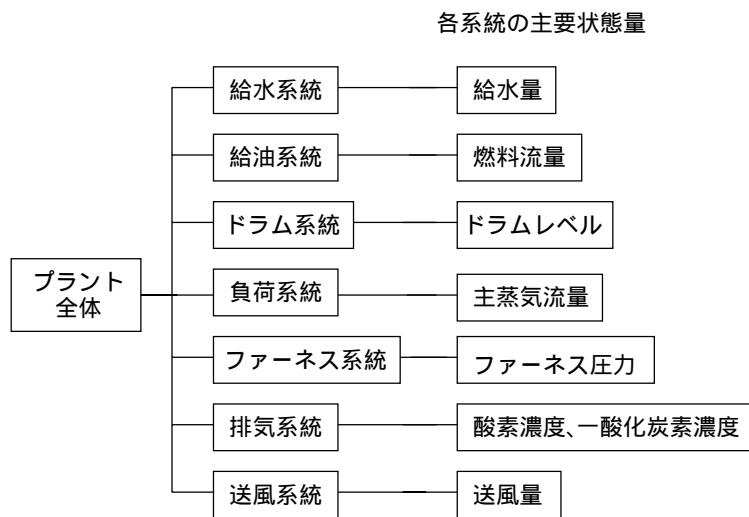


図 5.9 系統と主要状態変数

オペレータがプラントに発生する異常に対して常に正しい診断をするとはかぎらない。特に初めて遭遇する異常に対しては大局的な状況判断や異常原因の特定がうまく行かず、対応に失敗するケースが少ない<sup>[47]</sup>。このようなシミュレータトレーニングで得られた知見を模擬するため、思考プロセッサの異常診断の正しさは、異常判断や異常原因判定の複雑さとオペレータの心理状態に依存すると仮定して、次の思考パラメーター (J) を導入した。

$$J = J(\text{異常判断・判定の複雑さ, オペレータの心理状態})$$

ここで、異常判断や異常原因の判定の複雑さは、異常原因を特定するのに必要な状態変数の数に依存するとした。実際には、監視画面の構成に依存する画面の切り替え回数や画面設計に依存する状態変数の表示方法にも依存する。シミュレーションでは、パラメーター J の値が設定した値を越えるかどうかにより異常診断の成否を決めることにした。

対応行動命令は次の 4 つの意図の伝達により運動プロセッサに伝えられる。これらの意図はシーケンス制御プログラム中の動作命令に相当する。

- 監視意図 (see) : 監視中の画面上の情報を見る。
- 情報の獲得意図 (get) : 監視中の画面上にない情報を獲得する。
- 設定操作意図 (put) : 監視中または監視中でない画面上の要素に対してパラメーター等の設定操作を行う。
- 画面の切替え意図 (change) : 情報獲得や設定操作のため、画面を切替える。例えばプラントに異常が発生し、異常原因が判明した場合は、対応操作プログラムを実行できる操作画面に切替えなければならない。

## 5.4 運動プロセッサ

運動プロセッサは、思考プロセッサで作られたオペレータモデルの意図に従って、HMI モデルに対して実行命令を出す部分である。図 5.10 に運動プロセッサの入出力関係をブロック図で表現した。運動プロセッサには次の三つの機能がある。

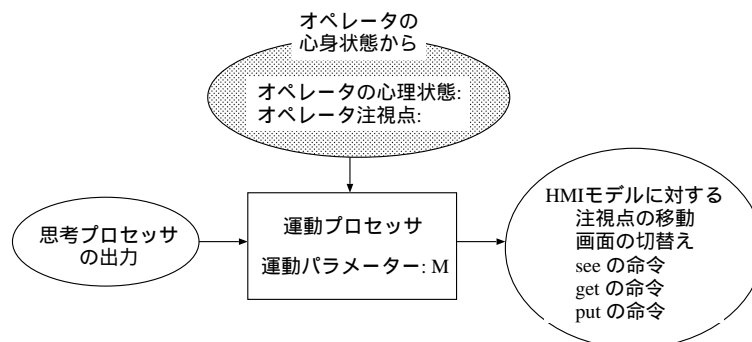


図 5.10 運動プロセッサの機能

- 意図の実行：思考プロセッサから伝達される“see”、“get”、“put”、“change”の4種類の意図に従い、プロセス装置のON/OFF、コントローラの設定値変更、センサー値及び装置のON/OFF値獲得、監視画面の切り替え等をHMIモデルを介して行う。
- 注視点座標の決定：その時点の行動意図と画面要素の表示位置に関する知識に基づき、オペレータモデルの注視点の座標を移動する。
- 時間特性の実行：設定操作等に要する時間に基づいて時間遅れを実現する。

プラント運転において、オペレータの全ての動作が意図通りに実行されるとは限らない。特にプラントに異常が発生して心理的に動揺すると、オペレータはやるべきことをやらなかったり、操作をやり間違ふことがある。運動プロセッサの動作の正しさを支配する運動パラメーター (M) を次式で表すことにした。

$$M = M(\text{動作時間の切迫度, オペレータの心理状態})$$

ここで、動作時間の切迫度は時間の切迫感が人間に及ぼす影響を表すために導入した要素であり、オペレータが動作を遂行するのに必要な最小時間をプラントの状況によって定まる許容可能な時間で割ることによって求める。表 5.2 にオペレータの心理状態と動作時間の切迫度により変わる運動パラメーターを示す。動作の成否は知覚プロセッサや思考プロセッサと同じようにしきい値判断により決める。

表 5.2 運動パラメーター

心理状態	動作時間の切迫度		
	0.5	1	2
モード A	1.6	0.8	0.4
モード B	1.2	0.6	0.3
モード C	0.8	0.4	0.2

## 5.5 記憶

記憶は経験等を記憶に獲得・形成する段階、これを維持・保存していく段階と、必要な時に記憶した内容を取り出す段階がある。この3段階をそれぞれ、書き込み(コード化)、保持、呼び出し(検索)段階と呼ぶ。図 5.11 に記憶の3段階<sup>[13]</sup>を示す。

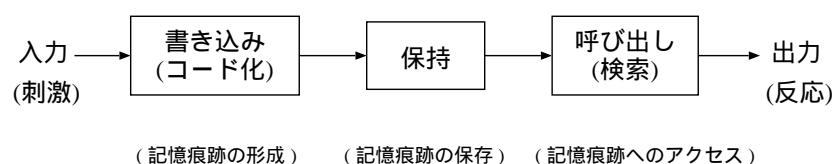


図 5.11 記憶の3段階

- 書き込み(コード化)とは、入力された感覚刺激を「意味」に変換し記憶表象として貯蔵するまでの一連の情報処理過程をさす。
- 入力された刺激は、コード化の過程によって、内的処理が可能な形式へ変換され、記憶表象として保持される。
- 検索は保持されている記憶表象を想起する過程である。記憶表象が時間の経過によって減衰してしまうか、あるいは何らかの理由でアクセス不可能になるために、検索できなくなる場合もある。

### 5.5.1 作業記憶

各時刻の認知活動に短時間だけ能動的に利用できる記憶が作業記憶である。作業記憶の容量は、チャンクと呼ばれる情報の一まとまりが入る領域の個数によって表される<sup>[13][52]</sup>。作業記憶は大きく分けて3種類の情報の一時的な記憶装置として用いた。

- 監視操作中に、感覚貯蔵庫が受け取った知覚プロセッサからの視覚(画面)情報と聴覚(アラーム音)情報
- 長期記憶の中の一時的に活性化された情報
- 認知活動の結果得られたオペレータの判断や状況の解釈などの情報

先に述べたように記憶は一般に「書き込み(コード化)」「保持」「呼び出し(検索)」の3つの過程に分けられ、過去の記憶が思い出せないのは、各過程のいずれかに問題があったものとして解釈される<sup>[13][52]</sup>。この特徴を表現するため、本研究では、各記憶表象の属性として、記憶強度 $\mu$ を式(5.2)で定義した。

$$\mu = \mu_0 \exp\left(-\frac{(t - t_0)}{q}\right) \quad (5.2)$$

ここで、 $t$ は現在の時刻で、 $t_0$ はその情報チャンクが書き込まれた時刻である。思考プロセッサによって作業記憶内の情報チャンクが呼び出された場合には、 $t_0$ の値は更新されるものとした。 $q$ は情報に対する注意度を示す正值パラメーターで、オペレータがその情報に強く注意をひかれる場合に大きな値をとるように情報の重要度ならびに情報提示の形態や色およびサイズなどにより決定する。 $q$ はオペレータのプラントに対する理解や個性に応じて決まる値でもある。 $\mu_0$  ( $0 \leq \mu_0 \leq 1$ )は記憶強度の初期値であり、 $q$ に依存する。 $\mu$ は作業記憶に書き込まれてから時間が経過するに従って漸近的に0に近づく。

各情報チャンクごとに計算した $\mu$ を用いて、記憶の3つの過程を次のようにモデル化した。

#### (1) 書き込み(コード化)の過程:

新しい情報が作業記憶に書き込まれるかどうかは、新しい情報の記憶強度 $\mu_{new}$ および全作業記憶領域に保持されている情報の平均記憶強度 $\bar{\mu}$ に依存すると考えられる。この特徴を表現するため、式(5.3)によって計算される $P_{r,new}$ の確率で、新しい情報が作業記

憶に書き込まれるものとした。

$$\begin{cases} P_{r,new} = \mu_{new}^{\alpha_1} (1 - \bar{\mu}^{\alpha_2}) \\ \text{ここで } \bar{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \mu_k \end{cases} \quad (5.3)$$

ここで、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  は正の値をとる調節パラメーターであり、心理状態に応じて変化するものとした。 $\mu_{new}$  は新しい情報に対して計算される記憶強度で、新しい情報に向けられる注意度が大きいほど、すなわち  $q$  が大きいほど  $\mu_{new}$  も大きくなり、作業記憶に書き込まれる確率が高くなる。 $N$  は作業記憶が保持できる最大の領域数であり、 $\mu_k$  は  $k$  番目の領域に保持されている情報の記憶強度の値である。情報が何もない領域の  $\mu_k$  の値は 0 とした。作業記憶に保持されている情報の記憶強度の平均値  $\bar{\mu}$  が大きいほど、 $(1 - \bar{\mu}^{\alpha_2})$  の値は小さくなり、新しい情報が作業記憶に書き込まれる確率が低くなる。書き込み時に、同じ種類の情報が既に作業記憶内に存在する時は、新しいデータがその領域に上書きされるとともに、変化分 (数値の増減など) が新しい情報として付加される。それ以外の時は、 $\mu_k$  の最も小さな値を持つ領域に上書きされる。

## (2) 保持の過程 :

作業記憶に保持されている情報は、その情報が利用されない限り、時間の経過とともに忘却されていく。この特徴を表現するため、式 (5.4) によって計算される確率  $P_{m,k}$  で、作業記憶内の第  $k$  領域 ( $k=1,2, \dots, N$ ) の情報が消滅するものとした。

$$P_{m,k} = 1 - \mu_k^\beta \quad (5.4)$$

ここで、 $\beta$  は正の値をとる調節パラメーターであり、心理状態に応じて変化するものとした。

## (3) 呼び出し (検索) の過程 :

作業記憶内に保持されている情報は、時間の経過とともに思い出すことが困難になっていく。またあせりなどの心理状態の影響で記憶内容を思いだせない場合もある。この特

徴を表現するため、作業記憶内の検索は記憶強度の大きい順に行われるものとして、式 (5.5) によって計算される確率  $P_{s,target}$  で情報の検索に成功するとした。

$$P_{s,target} = \mu_{target}^{\gamma} \quad (5.5)$$

ここで、target は探索対象となる記憶表象を表す。また  $\gamma$  は正の値をとる調節パラメータであり、心理状態に応じて変化するものとした。式 (5.2) ~ (5.5) における種々のパラメータは、実測データを基に決める必要があるが、本研究では定性的な特徴を再現するように調整する。

## 5.5.2 長期記憶

長期記憶は大きな容量を持った永続的な記憶装置である。長期記憶には、思考プロセッサの状態監視モードで使われる監視画面上の情報の正常値、異常対応モードで使用される緊急対応プログラム、プラントの各状態変数に異常が発生した時オペレータが思いつく全ての連想状態変数とその正常値が格納されている。

## 5.6 オペレータモデルの動作確認実験

実験の目的は、作成したオペレータモデルがボイラーシミュレータをリアルタイムで運転できるか、すなわち想定した緊急事態においてヒューマンオペレータの状況判断や対応操作がオペレータモデルにより実現できるか、ヒューマンオペレータの時間特性がオペレータモデルに反映されているかを確認することである。このためボイラーシミュレータに異常を発生させ、オペレータモデルの異常対応操作を調べた。動作確認のため、オペレータモデルの異常対応操作の動作履歴を分析した。

### 5.6.1 実験シナリオ

4.5.1 と同じマルファンクションを用いて、ボイラープラントシミュレータに異常を発生させて、異常対応操作を行う。



## 5.6.2 実験結果と考察

オペレータモデル中のパラメーターは人間についての実測値をもとに決める必要があるが、このためには膨大な実験が必要になる。本研究では、現場で共有されている定性的な知見をモデルを用いたシミュレーションで再現することを目標としていることから、試行錯誤によってパラメーターの調整を行った。以下の実験では、オペレータモデルの各プロセッサと記憶のパラメーターとして次の値を用いた。

知覚パラメータのしきい値： $\rho_1=0.1$ 、 $\rho_2=0.2$

思考パラメータのしきい値：0.1

運動パラメータのしきい値：0.1

作業記憶の記憶容量：21 チャンク

作業記憶の記憶時間：60 秒

作成したオペレータモデルは、人間のオペレータのように、異常原因が画面上で直接見える異常、燃料ポンプ (FOP1) 一台故障、全バーナ失火、給水ポンプ (BFP1) 一台トリップ、押し込み通風機 (FDF) 能力ダウン、誘引通風機 (IDF) 能力ダウンに対しては直ちに長期記憶から対応手順プログラムを取り出し対応操作を実行した。異常原因が画面上で直接見えない異常、水管リーク、 $O_2$  計故障、タービン負荷激減に対しては、連想状態変数やトレンド画面情報に基づいた異常診断によって、異常原因を判定して、リアルタイムで異常に対応した。図 5.12 に燃料ポンプ (FOP1) 故障、全バーナ失火時のオペレータモデルの異常対応操作履歴を示し、図 5.13 に給水ポンプ (BFP1) トリップ、水管リーク時のオペレータモデルの異常対応操作履歴を示し、図 5.14 に  $O_2$  計故障、押し込み通風機 (FDF) 能力ダウン時のオペレータモデルの異常対応操作履歴を示し、図 5.15 に誘引通風機 (IDF) 能力ダウンとタービン負荷激減時のオペレータモデルの異常対応操作履歴を示す。押し込み通風機 (FDF) 能力ダウンの異常は原因が画面上で直接見える異常であるが、プラントシミュレータの異常を示すタグの問題で本実験では複数の画面情報から異常原因を判定して、異常対応操作を行うことになった。また人間オペレータの時間特性も本オペレータモデルのパラメーターによって調整できることも確認した。

```

(1)
operation: kansu
mental state: A

FOP1 Failed.
Executing FOP1 failure countermeasure program.

put W205.SV 1.2 午後 12:00:15
see W205.SV 1.2 午後 12:00:21
put FOP3.MV 2 午後 12:00:22
see FOP3.MV 2 午後 12:00:27
put W205.SV 1.15 午後 12:00:33
see W205.SV 1.15 午後 12:00:38
put W205.SV 1.12 午後 12:00:34
see W205.SV 1.12 午後 12:00:38
put W205.SV 1.1 午後 12:00:40
see W205.SV 1.1 午後 12:00:45

```

(a) 燃料ポンプ (FOP1) 故障

```

(1)
operation: kansu
mental state: A

All burners are now fine.
Executing stop alert operation program.

put SV01.MV 0 午後 12:06:09
see SV01.MV 0 午後 12:06:14
put SV02.MV 0 午後 12:06:15
see SV02.MV 0 午後 12:06:20
put SV03.MV 0 午後 12:06:21
see SV03.MV 0 午後 12:06:26
put SV04.MV 0 午後 12:06:27
see SV04.MV 0 午後 12:06:32
put SV05.MV 0 午後 12:06:33
see SV05.MV 0 午後 12:06:38
put SV06.MV 0 午後 12:06:39
see SV06.MV 0 午後 12:06:44
put SV07.MV 0 午後 12:06:45
see SV07.MV 0 午後 12:06:50
put SV08.MV 0 午後 12:06:51
see SV08.MV 0 午後 12:06:56
put SV09.MV 0 午後 12:06:57
see SV09.MV 0 午後 12:07:02
put IMF1.MV 0 午後 12:07:03
see IMF1.MV 0 午後 12:07:08
put IMF2.MV 0 午後 12:07:09
see IMF2.MV 0 午後 12:07:14
put IMF3.MV 0 午後 12:07:15
see IMF3.MV 0 午後 12:07:20
put IMF4.MV 0 午後 12:07:21
see IMF4.MV 0 午後 12:07:26
put FFW.MV 0 午後 12:07:27
see FFW.MV 0 午後 12:07:32
put SV10.MV 2 午後 12:07:33
see SV10.MV 2 午後 12:07:38
put ND01.MV 80 午後 12:07:40
see ND01.MV 75 午後 12:07:45
put ND01.MV 70 午後 12:07:41
see ND01.MV 65 午後 12:07:46
put ND01.MV 60 午後 12:07:43
see ND01.MV 55 午後 12:07:48
put ND01.MV 50 午後 12:07:45
see ND01.MV 45 午後 12:07:49
put ND01.MV 40 午後 12:07:47
see ND01.MV 35 午後 12:07:51
put ND01.MV 30 午後 12:07:49
see ND01.MV 25 午後 12:07:53
put ND01.MV 20 午後 12:07:51
see ND01.MV 15 午後 12:07:55
put ND01.MV 10 午後 12:07:53
see ND01.MV 5 午後 12:07:54
put ND01.MV 0 午後 12:07:55
put SV22.MV 2 午後 12:07:57
see SV22.MV 2 午後 12:08:02
put SV20.MV 0 午後 12:08:03
see SV20.MV 0 午後 12:08:08

```

(b) 全バーナ失火

図 5.12 異常対応操作時のオペレータモデルの操作履歴

```

operation: kans1
mental state: A

BFP1 tripped.
Executing BFP1 trip countermeasure program.

put SW15.MV 2 午後 12:12:12
see SW15.MV 1 午後 12:12:17
put SW16.MV 2 午後 12:12:18
see SW16.MV 1 午後 12:12:20
see SW14.MV 0 午後 12:12:24
put BFP2.MV 2 午後 12:12:25
see BFP2.MV 1 午後 12:12:28
put SW14.MV 2 午後 12:12:31
see SW14.MV 1 午後 12:12:36
put BFP1.MV 2 午後 12:12:37
see BFP1.MV 1 午後 12:12:42
put SW11.MV 0 午後 12:12:43
see SW11.MV 0 午後 12:12:48
put SW12.MV 0 午後 12:12:48
see SW12.MV 0 午後 12:12:54

```

(c) 給水ポンプ (BFP1) トリップ

```

operation: kans1
mental state: A

operation: renou3
mental state: B

BFP1.MV
BFP2.MV
FOP1.MV
FOP2.MV
FOP3.MV
Fire1
Fire2
Fire3
Fire4
FDPM.MV
IDFM.MV
M211.MV

Water tube leaked.
Executing stop plant operation program.

put SW01.MV 0 午前 11:43:06
see SW01.MV 0 午前 11:43:13
put SW02.MV 0 午前 11:43:14
see SW02.MV 0 午前 11:43:19
put SW03.MV 0 午前 11:43:20
see SW03.MV 0 午前 11:43:25
put SW04.MV 0 午前 11:43:26
see SW04.MV 0 午前 11:43:31
put SW05.MV 0 午前 11:43:32
see SW05.MV 0 午前 11:43:37
put SW06.MV 0 午前 11:43:38
see SW06.MV 0 午前 11:43:43
put SW07.MV 0 午前 11:43:44
see SW07.MV 0 午前 11:43:49
put SW08.MV 0 午前 11:43:50
see SW08.MV 0 午前 11:43:55
put SW09.MV 0 午前 11:43:56
see SW09.MV 0 午前 11:44:01
put SWP1.MV 0 午前 11:44:02
see SWP1.MV 0 午前 11:44:07
put SWP2.MV 0 午前 11:44:08
see SWP2.MV 0 午前 11:44:13
put SWP3.MV 0 午前 11:44:14
see SWP3.MV 0 午前 11:44:19
put SWP4.MV 0 午前 11:44:20
see SWP4.MV 0 午前 11:44:25
put FDFM.MV 0 午前 11:44:26
see FDFM.MV 0 午前 11:44:31
put SW13.MV 2 午前 11:44:32
see SW13.MV 2 午前 11:44:37
see M201.MV 80 午前 11:44:38
put M201.MV 75 午前 11:44:38
put M201.MV 70 午前 11:44:40
put M201.MV 65 午前 11:44:41
put M201.MV 60 午前 11:44:42
put M201.MV 55 午前 11:44:43
put M201.MV 50 午前 11:44:44
put M201.MV 45 午前 11:44:45
put M201.MV 40 午前 11:44:46
put M201.MV 35 午前 11:44:47
put M201.MV 30 午前 11:44:48
put M201.MV 25 午前 11:44:49
put M201.MV 20 午前 11:44:50
put M201.MV 15 午前 11:44:51
put M201.MV 10 午前 11:44:52
put M201.MV 5 午前 11:44:53
put M201.MV 0 午前 11:44:54
put SW22.MV 2 午前 11:44:56
see SW22.MV 2 午前 11:45:01
put SW20.MV 0 午前 11:45:02
see SW20.MV 0 午前 11:45:07

```

(d) 水管リーク

図 5.13 異常対応操作時のオペレータモデルの操作履歴

```

operation: kansu
mental state: A

operation: renoy
mental state: B

SFP1.MV
SFP2.MV
FDP1.MV
FDP2.MV
FDP3.MV
Fire1
Fire2
Fire3
Fire4
FRN.MV
IDFN.MV
M01.MV
F01.PV
F02.PV
F04.MV
R08.OPV
L02.PV
A01.PV
A02.PV
P02.PV
P03.PV

operation: trend
mental state: B

O2 sensor failed.
Executing O2 sensor failure countermeasure program.

out C08.MODE MAN 午後 12:04:57
see C08.MODE MAN 午後 12:05:02
out C08.MV 50 午後 12:05:03
see C08.MV 50 午後 12:05:08

```

(e) O<sub>2</sub> 計故障

```

operation: kansu
mental state: A

operation: renoy
mental state: B

SFP1.MV
SFP2.MV
FDP1.MV
FDP2.MV
FDP3.MV
Fire1
Fire2
Fire3
Fire4
FRN.MV
IDFN.MV
M01.MV
F01.PV
F02.PV
F04.MV
R08.OPV
L02.PV
A01.PV
A02.PV
P02.PV
P03.PV

operation: trend
mental state: B

FDF tripped.
Executing FDF trip countermeasure program.

out SW04.MV 0 午後 12:31:34
see SW04.MV 0 午後 12:31:38
out SW05.MV 0 午後 12:31:40
see SW05.MV 0 午後 12:31:45
see M01.MV 80 午後 12:31:47
put M01.MV 78 午後 12:31:47
put M01.MV 76 午後 12:31:48
put M01.MV 74 午後 12:31:48
put M01.MV 72 午後 12:31:50
put M01.MV 70 午後 12:31:51
put M01.MV 68 午後 12:31:52
put M01.MV 66 午後 12:31:53
put M01.MV 64 午後 12:31:54
put M01.MV 62 午後 12:31:55
put M01.MV 60 午後 12:31:56
out SW05.MV 0 午後 12:31:58
see SW05.MV 0 午後 12:32:03
out SW07.MV 0 午後 12:32:04
see SW07.MV 0 午後 12:32:09
see M01.MV 60 午後 12:32:11
put M01.MV 58 午後 12:32:11
put M01.MV 56 午後 12:32:12
put M01.MV 54 午後 12:32:13
put M01.MV 52 午後 12:32:14
put M01.MV 50 午後 12:32:15
put M01.MV 48 午後 12:32:16
put M01.MV 46 午後 12:32:17
put M01.MV 44 午後 12:32:18
put M01.MV 42 午後 12:32:19
put M01.MV 40 午後 12:32:20
see M01.MV 40 午後 12:32:21

```

(f) 押し込み通風機 (FDF) 能力ダウン

図 5.14 異常対応操作時のオペレータモデルの操作履歴

```

operation: kansai
manual state: A

operation: rensou
manual state: B

IDF1.MV
IDF2.MV
IDF3.MV
IDF4.MV
IDF5.MV
IDF6.MV
IDF7.MV
IDF8.MV
IDF9.MV
IDF10.MV

IDF tripped.
Executing stop plant operation program.

put 2V01.MV 0 午後 12:25:33
see 2V01.MV 0 午後 12:25:38
put 2V02.MV 0 午後 12:25:38
see 2V02.MV 0 午後 12:25:44
see 2V03.MV 0 午後 12:25:45
see 2V04.MV 0 午後 12:25:50
put 2V04.MV 0 午後 12:25:51
see 2V04.MV 0 午後 12:25:56
put 2V05.MV 0 午後 12:25:57
see 2V05.MV 0 午後 12:26:02
put 2V06.MV 0 午後 12:26:03
see 2V06.MV 0 午後 12:26:08
put 2V07.MV 0 午後 12:26:08
see 2V07.MV 0 午後 12:26:14
put 2V08.MV 0 午後 12:26:15
see 2V08.MV 0 午後 12:26:20
put 2V09.MV 0 午後 12:26:21
see 2V09.MV 0 午後 12:26:26
put 2MP1.MV 0 午後 12:26:27
see 2MP1.MV 0 午後 12:26:32
put 2MP2.MV 0 午後 12:26:33
see 2MP2.MV 0 午後 12:26:38
put 2MP3.MV 0 午後 12:26:39
see 2MP3.MV 0 午後 12:26:44
put 2MP4.MV 0 午後 12:26:45
see 2MP4.MV 0 午後 12:26:50
put 2DFN.MV 0 午後 12:26:51
see 2DFN.MV 0 午後 12:26:56
put 2V13.MV 2 午後 12:27:02
see 2V13.MV 2 午後 12:27:04
see 2V01.MV 80 午後 12:27:04
put 2V01.MV 75 午後 12:27:04
put 2V01.MV 70 午後 12:27:08
put 2V01.MV 65 午後 12:27:08
put 2V01.MV 60 午後 12:27:07
put 2V01.MV 55 午後 12:27:08
put 2V01.MV 50 午後 12:27:08
put 2V01.MV 45 午後 12:27:10
put 2V01.MV 40 午後 12:27:11
put 2V01.MV 35 午後 12:27:12
put 2V01.MV 30 午後 12:27:13
put 2V01.MV 25 午後 12:27:14
put 2V01.MV 20 午後 12:27:15
put 2V01.MV 15 午後 12:27:16
put 2V01.MV 10 午後 12:27:17
put 2V01.MV 5 午後 12:27:18
put 2V01.MV 0 午後 12:27:19
put 2V02.MV 2 午後 12:27:21
see 2V02.MV 2 午後 12:27:26
put 2V02.MV 0 午後 12:27:27
see 2V02.MV 0 午後 12:27:32

```

```

operation: kansai
manual state: A

operation: rensou
manual state: B

IDF1.MV
IDF2.MV
IDF3.MV
IDF4.MV
IDF5.MV
IDF6.MV
IDF7.MV
IDF8.MV
IDF9.MV
IDF10.MV
M201.MV
F201.PV
F202.PV
F203.PV
F204.PV
R201.OPV
L201.PV
L202.PV
A201.PV
A202.PV
F205.PV
F206.PV

operation: trend
manual state: B

Turbine tripped.
Executing turbine trip countermeasure program.

put 2V01.MV 2 午後 12:16:34
see 2V01.MV 2 午後 12:16:39
put 2V04.MV 8 午後 12:16:38
see 2V04.MV 8 午後 12:16:43
put 2V05.MV 8 午後 12:16:43
see 2V05.MV 8 午後 12:16:48
see 2V06.MV 8 午後 12:16:51
put 2V07.MV 79 午後 12:16:53
put 2V07.MV 76 午後 12:16:54
put 2V07.MV 74 午後 12:16:55
put 2V07.MV 72 午後 12:16:56
put 2V07.MV 70 午後 12:16:57
put 2V07.MV 68 午後 12:16:59
put 2V07.MV 66 午後 12:16:59
put 2V07.MV 64 午後 12:16:59
put 2V07.MV 62 午後 12:16:59
put 2V07.MV 60 午後 12:16:59
see 2V07.MV 8 午後 12:16:59
put 2V07.MV 8 午後 12:16:48
see 2V07.MV 8 午後 12:16:45
see 2V07.MV 8 午後 12:16:47
put 2V07.MV 59 午後 12:16:47
put 2V07.MV 58 午後 12:16:48
put 2V07.MV 56 午後 12:16:48
put 2V07.MV 54 午後 12:16:49
put 2V07.MV 52 午後 12:16:50
put 2V07.MV 50 午後 12:16:51
put 2V07.MV 48 午後 12:16:52
put 2V07.MV 46 午後 12:16:53
put 2V07.MV 44 午後 12:16:54
put 2V07.MV 42 午後 12:16:55
put 2V07.MV 40 午後 12:16:56
see 2V07.MV 40 午後 12:16:57

```

(g) 誘引通風機 (IDF) 能力ダウン (h) タービン負荷激減

図 5.15 異常対応操作時のオペレータモデルの操作履歴

## 5.7 まとめ

本章では、人間のオペレータと同じ対応操作を行うことができる心身状態を含むオペレータモデルを PC 上に作成した。ヒューマンエラーを再現するための準備としてオペレータモデルの各プロセッサと記憶の性能をパラメーターを用いてモデル化した。成否を判断する各パラメーターのしきい値は人間についての実測データをもとに調整する必要があるが、本研究では試行錯誤によってパラメーターの調整を行った。本章ではヒューマンエラーが起こらない条件下でシミュレーションを行い、モデルの検証を行った。このオペレータモデルは心理状態、注視点の位置と視野、各プロセッサと記憶のパラメーターを調整することによって、ヒューマンエラーの発生シミュレーションを行うことができる。次章ではヒューマンエラー発生のシミュレーションを行い、発生メカニズムの解析を行う。

## 第6章 ヒューマンエラー発生シミュレーションと発生メカニズムの解析

認知情報処理の立場から分類されたプラント運転におけるヒューマンエラーについて、構築した心身状態を考慮したオペレータモデルを用いたシミュレーションによって再現することを試みた。本オペレータモデルを用いることによってある特定の要素が直接エラーを起こす場合はもちろんのこと、いろいろな要素やパラメーターの変化が複合してエラーが発生するメカニズムを解析することができる。

### 6.1 知覚系エラーのシミュレーション

画面情報の見落とし、見過ごしのシミュレーションを行った。注視点を中心とする認識可能な領域(視野)の画面情報をどのように見落とし、どのように見過ごしたかを、オペレータの心理状態、注視点の位置と視野の大きさ、知覚パラメーターとそのしきい値の大きさをを用いて分析した。知覚パラメーターのしきい値と視野を決める  $v$ (5章の式(5.1))は人によって異なる。実験では知覚パラメーターのしきい値を一定にして  $v$  を変化させる場合と、 $v$  を一定にして知覚パラメーターのしきい値を変化させる場合について、知覚系エラーのシミュレーションを行った。

#### 6.1.1 実験シナリオ

- (1) 注視点を固定し、知覚パラメーターのしきい値を一定にして、人によって違う  $v$  と心理状態を変えて、視野の知覚結果を調べる。図 6.1 にドラム給水操作画面上で給水ポンプ (BFP1) を見る時の視野を示す。図 6.2 にバーナ点火画面上で誘引通風機 (IDF) を見る時の視野を示す。
- (2) 常時監視用に作られた 2 つのオーバービュー画面について、全画面上を注視点移動する時、 $v$  を一定 ( $10^\circ$ ) にして、心理状態と知覚パラメーターのしきい値を変え

て情報の見落としのシミュレーションを行う。オーバービュー画面1には多くの画面要素を含み、オーバービュー画面2には少ない画面要素が比較的大きく表示されている。図6.3にオーバービュー画面1と注視点の移動を示す。図6.4にオーバービュー画面2と注視点の移動を示す。注視点の移動は常時監視を考慮して規則的に等間隔で行った。

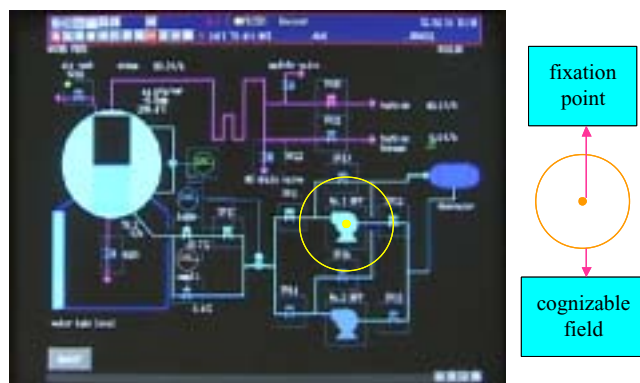


図 6.1 給水ポンプ (BFP1) を見る時の視野

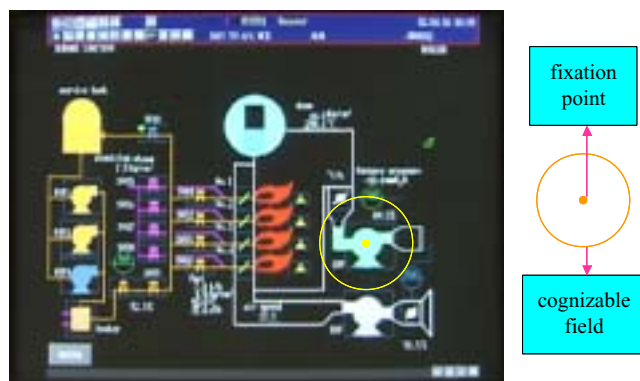


図 6.2 誘引通風機 (IDF) を見る時の視野



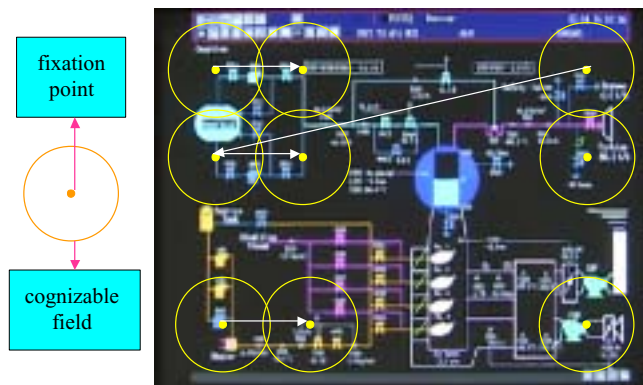


図 6.3 オーバービュー画面 1 上での監視

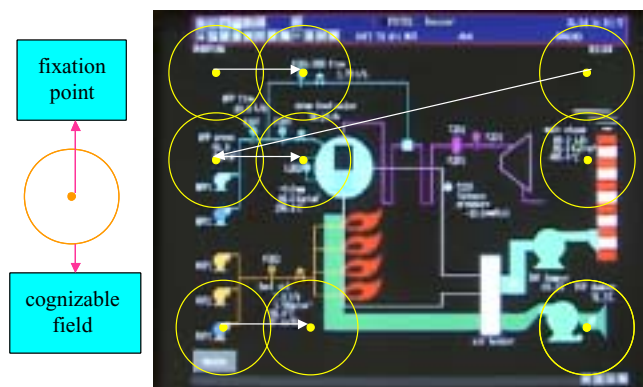


図 6.4 オーバービュー画面 2 上での監視

### 6.1.2 実験結果と考察

- (1) 表 6.1 に知覚パラメーターのしきい値が  $\rho_1=0.1(\rho_2=2\rho_1)$  の時、心理状態と人によって異なる  $v$  を変化した場合の、ドラム給水操作画面上の給水ポンプ (BFP1) を見る時の知覚結果を示す。表中に示された要素が知覚できた。表 6.2 に知覚パラメーターのしきい値が  $\rho_1=0.5(\rho_2=1.0)$  の時、心理状態と  $v$  を変化した場合のドラム給水操作画面上の給水ポンプ (BFP1) を見る時の知覚結果を示す。

表 6.3 に知覚パラメーターのしきい値が  $\rho_1=0.1(\rho_2=0.2)$  の時、心理状態と  $v$  を変化した場合のバーナ点火画面上の、誘引通風機 (IDF) を見る時の知覚結果を示す。表 6.4 に知覚パラメーターのしきい値が  $\rho_1=0.5(\rho_2=1.0)$  の時、心理状態と  $v$  を変化した場合のバーナ点火画面上の誘引通風機 (IDF) を見る時の知覚結果を示す。

表 6.1 給水ポンプ (BFP1) を見る場合の知覚結果  
(知覚パラメーターのしきい値  $\rho_1=0.1; \rho_2=0.2$ )

心理状態	$v$				
	10 °	9 °	8 °	7 °	6 °
モード A	BFP1, SV11 SV13, SV12 SV16	BFP1 SV12 SV13	BFP1 SV13	BFP1	BFP1
モード B	BFP1, SV13	BFP1	BFP1	BFP1	BFP1
モード C	BFP1	BFP1	BFP1	—	—

表 6.2 給水ポンプ (BFP1) を見る場合の知覚結果  
(知覚パラメーターのしきい値  $\rho_1=0.5; \rho_2=1.0$ )

心理状態	$v$				
	10 °	9 °	8 °	7 °	6 °
モード A	BFP1	BFP1	BFP1	BFP1	BFP1
モード B	BFP1	BFP1	BFP1	BFP1	BFP1
モード C	BFP1	BFP1	BFP1	—	—

表 6.3 誘引通風機 (IDF) を見る場合の知覚結果  
(知覚パラメーターのしきい値  $\rho_1=0.1$ ;  $\rho_2=0.2$ )

心理状態	$v$				
	10 °	9 °	8 °	7 °	6 °
モード A	IDF, F204	IDF, F204	IDF	IDF	IDF
モード B	IDF	IDF	IDF	IDF	IDF
モード C	IDF	IDF	IDF	—	—

表 6.4 誘引通風機 (IDF) を見る場合の知覚結果  
(知覚パラメーターのしきい値  $\rho_1=0.5$ ;  $\rho_2=1.0$ )

心理状態	$v$				
	10 °	9 °	8 °	7 °	6 °
モード A	IDF	IDF	IDF	IDF	IDF
モード B	IDF	IDF	IDF	IDF	IDF
モード C	IDF	IDF	IDF	—	—

表 6.1 ~ 6.4 を見ると、注視点を中心とする視野内の画面情報の知覚結果は、オペレータの心理状態、知覚パラメーターのしきい値と視野の大きさにより大きく影響を受けることがわかる。 $v$  が一定の場合の知覚結果は心理状態のモード A、モード B、モード C 順に少なくなった。心理状態が一定の場合の知覚結果は  $v$  の減少に従い少なくなった。表 6.1 ~ 6.4 から心理状態がモード C の時、 $v$  が 7 ° より小さくなると、オペレータは給水ポンプ (BFP1) と誘引通風機 (IDF) 両方とも知覚できなかったことがわかる。これはオペレータの視野が画面要素より小さくなると、オペレータは画面要素の形を認識できなくなって、画面情報を知覚できなくなることを意味する。

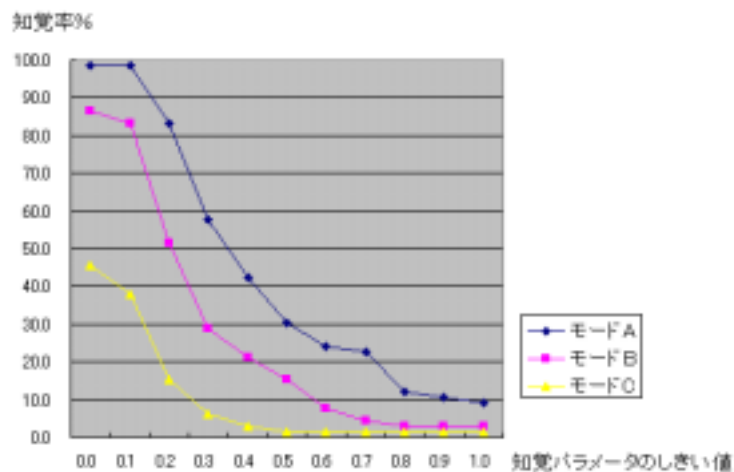
- (2) オーバービュー画面 1 について、0.3 秒毎に注視点を規則的に移動 ( $X=7\text{cm}$ 、 $Y=7\text{cm}$ ) し、心理状態と知覚パラメーター (P) のしきい値  $\rho_1$  および  $\rho_2$  を変化させた場合に知覚できた画面要素の数を表 6.5 に示した。この結果を全要素数 (66) で割って求めた知覚率を図 6.5 に図示した。また注視点の移動を  $X=5\text{cm}$ 、 $Y=5\text{cm}$  に

し、心理状態と知覚パラメータのしきい値  $\rho_1$  および  $\rho_2$  を変化した場合に知覚できた画面要素の数を表 6.6 に示し、知覚率を図 6.6 に示した。

オーバービュー画面 2 について、0.3 秒毎に注視点を移動 (  $X=7\text{cm}$ 、  $Y=7\text{cm}$  ) し、心理状態と知覚パラメータのしきい値  $\rho_1$  および  $\rho_2$  を変化させた時知覚できた画面要素の数を表 6.7 に示し、知覚率を図 6.7 に示す。注視点の移動を  $X=5\text{cm}$ 、 $Y=5\text{cm}$  にし、心理状態と知覚パラメータのしきい値  $\rho_1$  および  $\rho_2$  を変化させた場合に知覚できた画面要素の数を表 6.8 に、知覚率を図 6.8 に示す。

表 6.5 オーバービュー画面 1 の知覚結果 (  $X=7\text{cm}$ 、  $Y=7\text{cm}$  )

心理状態	知覚パラメータのしきい値 $\rho_1$ 、 $\rho_2=2\rho_1$										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
モード A	65	65	55	38	28	20	16	15	8	7	6
モード B	57	55	34	19	14	10	5	3	2	2	2
モード C	30	25	10	4	2	1	1	1	1	1	1

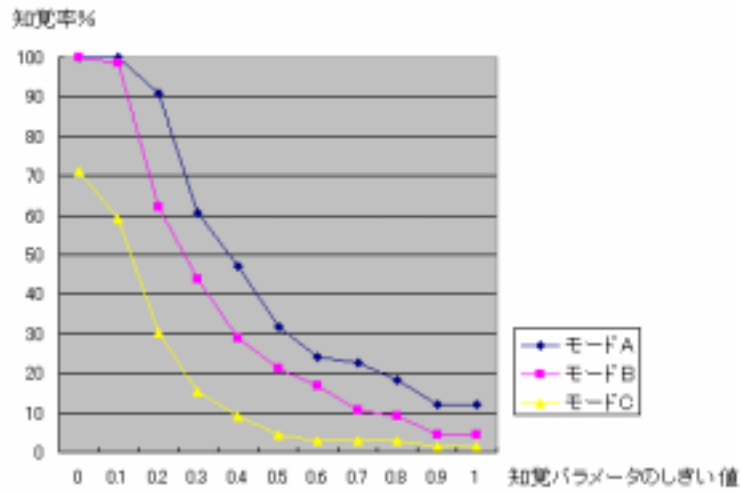


注視点の移動 (  $X=7\text{cm}$ 、  $Y=7\text{cm}$  )

図 6.5 オペレータの心理状態と知覚率

表 6.6 オーバービュー画面 1 の知覚結果 ( X=5cm、 Y=5cm)

心理状態	知覚パラメータのしきい値 $\rho_1$ 、 $\rho_2=2\rho_1$										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
モード A	66	66	60	40	31	21	16	15	12	8	8
モード B	66	65	41	29	19	14	11	7	6	3	3
モード C	47	39	20	10	6	3	2	2	2	1	1

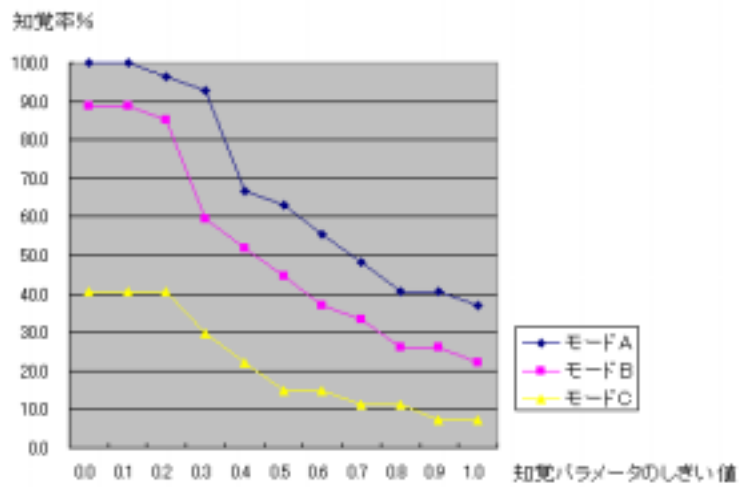


注視点の移動 ( X=5cm、 Y=5cm )

図 6.6 オペレータの心理状態と知覚率

表 6.7 オーバービュー画面 2 の知覚結果 ( X=7cm、 Y=7cm)

心理状態	知覚パラメータのしきい値 $\rho_1$ 、 $\rho_2=2\rho_1$										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
モード A	27	27	26	25	18	17	15	13	11	11	10
モード B	24	24	23	16	14	12	10	9	7	7	6
モード C	11	11	11	8	6	4	4	3	3	2	2

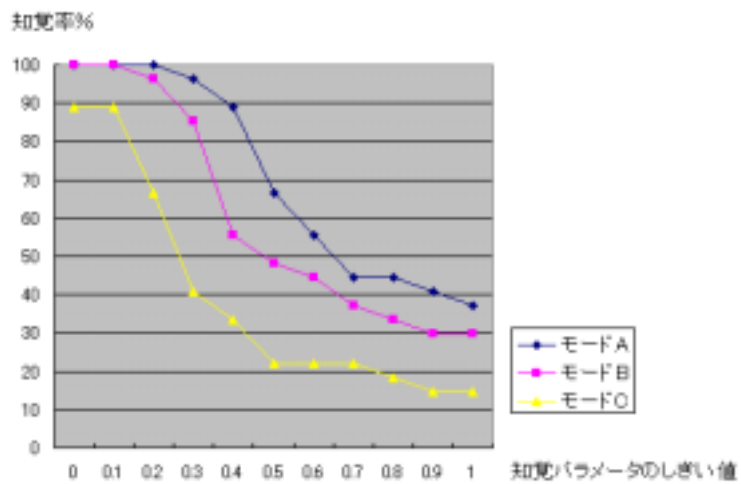


注視点の移動 ( X=7cm、 Y=7cm )

図 6.7 オペレータの心理状態と知覚率

表 6.8 オーバービュー画面 2 の知覚結果 ( X=5cm、 Y=5cm)

心理状態	知覚パラメータのしきい値 $\rho_1$ 、 $\rho_2=2\rho_1$										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
モード A	27	27	27	26	24	18	15	12	12	11	10
モード B	27	27	26	23	15	13	12	10	9	8	8
モード C	24	24	18	11	9	6	6	6	5	4	4



注視点の移動 ( X=5cm、 Y=5cm )

図 6.8 オペレータの心理状態と知覚率

表 6.5～6.8 から、両方のオーバービュー画面について、知覚パラメーターのしきい値を一定にした場合、オペレータの心理状態についてはモード A、モード B、モード C 順に知覚率は減少することがわかる。同じ画面について、オペレータの心理状態を一定にした場合、知覚パラメーターのしきい値が大きくなるに従い知覚率は減少している。同一人の知覚パラメーターのしきい値は画面に習熟することによって小さくなると考えられることから、習熟とともに知覚率は増加することが確認できる。同じ画面について、オペレータの心理状態、知覚パラメーターのしきい値を一定にした場合、表 6.5 と 6.6 の比較、表 6.7 と 6.8 の比較から、注視点の移動 ( X、Y ) を大きくした時知覚率は減少している。これは監視のあらさによる見過ごしを反映していると考えられる。

知覚率は監視画面のデザインにも関係している。画面上で情報をできるだけ大きく示す、注意をひく色を使ってオペレータに注目させることで知覚率をアップすることができる。図 6.5 と図 6.7 の比較、図 6.6 と図 6.8 の比較から、注視点の移動幅、オペレータの心理状態、知覚パラメーターのしきい値が同じ条件の下で、27 個の少ない画面要素を含むオーバービュー画面 2 に対する知覚率は、66 個の多くの画面要素を含むオーバービュー画面 1 に対する知覚率より高いことがわかる。しかし常時監視においてオーバービュー画面 2 の知覚率が高くても、プラント異常時に有効かどうかはわからない。異常原因判定に必要な情報がぬけていることもありえる。常時監視においてオーバービュー画面 1 の知覚率はオーバービュー画面 2 より低い、異常判断のために必要な情報が多く示されているため異常原因判定に有利になることも考えられる。監視画面の設計では常時監視における知覚率を高くするとともに、異常時に必要な情報を画面上に含めることも重要な課題である。

## 6.2 記憶系エラーのシミュレーション

作業記憶での情報の消失のシミュレーションを行った。知覚したはずの情報をどうして覚えていないかを、オペレータの心理状態と記憶容量および、作業記憶の書き込み (コード化)、保持、呼び出し (検索) の三つの過程で分析する。プラントシミュレータの情報は知覚プロセッサを通して、作業記憶に書き込まれる。実験では 0.3 秒毎に注視点を移動 ( X=5cm、 Y=5cm ) し、認識可能な領域 (視野) の視角  $\theta$  を固定 (10 °) し、知覚プロセッサで情報の見落とし、見過ごしが無い状態で作業記憶の中味を調べた。作業記憶



容量の最大値は人により異なるため、実験では二つの違う値を選んでシミュレーションを行う。また作業記憶の記憶容量は心理状態の影響をうけて変化する。

### 6.2.1 実験シナリオ

- (1) 作業記憶容量の最大値を 21 チャンクにして、心理状態をモード A、モード B、モード C に変えて、66 個の画面要素を含むオーバービュー画面 1 の左から右、上から下までスキャンを一回行う。作業記憶の情報は時々刻々変わるため、監視の最初、途中、最後の時の作業記憶の中味を調べる。図 6.9 に最初、途中、最後の時の注視点と視野を示す。
- (2) 作業記憶容量の最大値を 31 チャンクにして、心理状態をモード A、モード B、モード C に変えて、66 個の画面要素を含むオーバービュー画面 1 のスキャンを一回行い、監視の最初、途中、最後の時の作業記憶の中味を調べる。



図 6.9 監視の最初、途中、最後の時の注視点と視野

### 6.2.2 実験結果と考察

- (1) 作業記憶容量の最大値を 21 チャンクにしてオーバービュー画面 1 の全画面の監視を一回行った。図 6.10 に注視点がある時の作業記憶の中味を示す。図 6.11 に注視点がある時の作業記憶の中味を示す。図 6.12 に注視点がある時の作業記憶の中味を示す。第一列は作業記憶の ID 番

号で、第二列は情報名で、第三列は情報の記憶強度を示す。

結果は表 6.9 に示すように、注視点が  $S(x=5\text{cm}, y=5\text{cm})$  にある場合は心理状態のモード A、モード B、モード C とも 5 個の画面情報を記憶していた。表には、書き込み、保持、呼び出しの各過程の終了後の作業記憶の情報数が示されている。これは S では、視野内に 5 個の情報しかなかったからである。常時監視の途中注視点が M にある場合は、心理状態のモード A の場合は 19 個の画面情報を記憶し、心理状態のモード B の場合は 17 個の画面情報を記憶し、心理状態のモード C の場合は 15 個の画面情報を記憶していた。注視点が画面の一番右下の E にある場合は、心理状態のモード A の場合は 19 個の画面情報を記憶し、心理状態のモード B の場合は 17 個の画面情報を記憶し、心理状態のモード C の場合は 15 個の画面情報を記憶していた。作業記憶の情報数は心理状態の影響を受けてモード A、B、C 順に減少することがわかる。

オペレータモデルの各パラメーター

注視点の移動：  $X=5$ 、  $Y=5$

視角  $\theta$  :  $10^\circ$

知覚パラメーターのしきい値 ( $\rho_1$ ) : 0

作業記憶容量の最大値 : 21 チャンク

作業記憶の記憶時間 : 60 秒



(a) モード A

(b) モード B

(c) モード C

図 6.10 S での作業記憶の中味

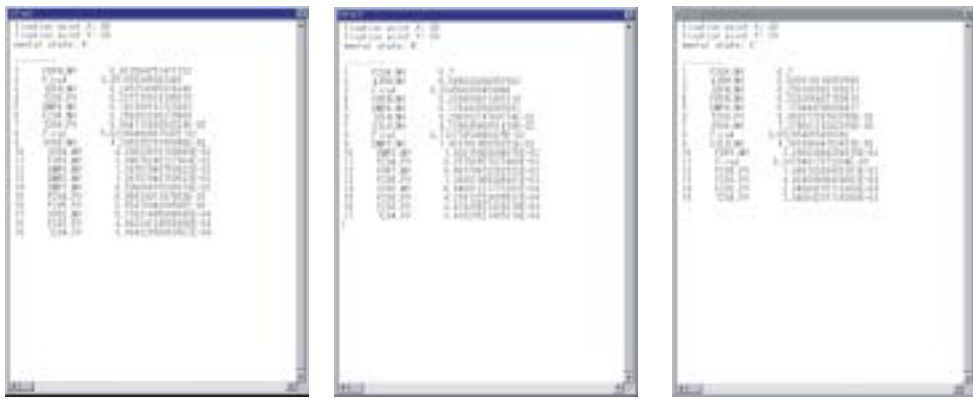


(a) モード A

(b) モード B

(c) モード C

図 6.11 M での作業記憶の中味



(a) モード A

(b) モード B

(c) モード C

図 6.12 E での作業記憶の中味

表 6.9 作業記憶の情報数

心理状態	監視の最初			監視の途中			監視の最後		
	write	keep	search	write	keep	search	write	keep	search
モード A	5	5	5	19	19	19	19	19	19
モード B	5	5	5	17	17	17	17	17	17
モード C	5	5	5	15	15	15	15	15	15

- (2) 作業記憶容量の最大値を 31 チャンクにしてオーバービュー画面 1 の全画面の監視を一回行った。図 6.13 に注視点が S にある時の作業記憶の中味を示す。図 6.14 に注視点が M にある時の作業記憶の中味を示す。図 6.15 に注視点が E にある時の作業記憶の中味を示す。

表 6.10 に示すように注視点が S にある場合は、作業記憶容量の最大値が 21 チャンクの場合と同じように、心理状態のモード A、モード B、モード C とも 5 個の画面情報を記憶していた。これは S を見る時、視野内に 5 個の情報しかなかったからである。

監視の途中、注視点が M にある場合は、心理状態のモード A の場合は 29 個の画面情報を記憶し、心理状態のモード B の場合は 27 個の画面情報を記憶し、心理状態のモード C の場合は 15 個の画面情報を記憶していた。心理状態がモード C の場合、作業記憶容量が 25 チャンクあるにもかかわらず 15 個の情報しか覚えていなかったため、この時の作業記憶の書き込み(コード化)、保持、呼び出し(検索)の三つの過程の作業記憶の中味を調べた。図 6.16 に示すように、書き込み過程では 25 個中 22 個の情報しか書き込むことができなかった。保持過程では書き込んだ 22 個の情報の中 18 個の情報しか保持できなかった。呼び出し過程では保持した 18 個の情報を 15 個しか呼び出せなかった。ここでは作業記憶中の情報はすべて呼び出すと考えている。書き込み過程で 3 個の情報の消失があり、保持過程で 4 個の情報の消失があり、呼び出し過程で 3 個の情報の消失があったことになる。

注視点が画面の一番右下 E にある場合は、心理状態のモード A の場合は 29 個の画面情報を記憶し、心理状態のモード B の場合は 27 個の画面情報を記憶し、心理状態のモード C の場合は 18 個の画面情報を記憶していた。心理状態がモード C の場合、作業記憶容量が 25 チャンクに対して 18 個の情報しか覚えていなかったため、この時の作業記憶の書き込み(コード化)、保持、呼び出し(検索)の三つの過程の作業記憶の中味を調べた。その結果、図 6.17 に示すように書き込み過程では 25 個の情報を書き込んだが、保持過程では 23 個の情報しか保持できなかった。また呼び出し過程では 18 個しか呼び出せなかった。つまり書き込み過程で容量いっぱいの記憶をしたが、保持過程で 2 個の情報の消失があり、呼び出し過程で 5 個の情報の消失があったことがわかる。

オペレータモデルの各パラメーター、  
 注視点の移動： X=5、 Y=5  
 視角  $\theta$  : 10 °  
 知覚パラメーターのしきい値 ( $\rho_1$ ) : 0  
 作業記憶容量の最大値 : 31 チャンク  
 作業記憶の記憶時間 : 60 秒

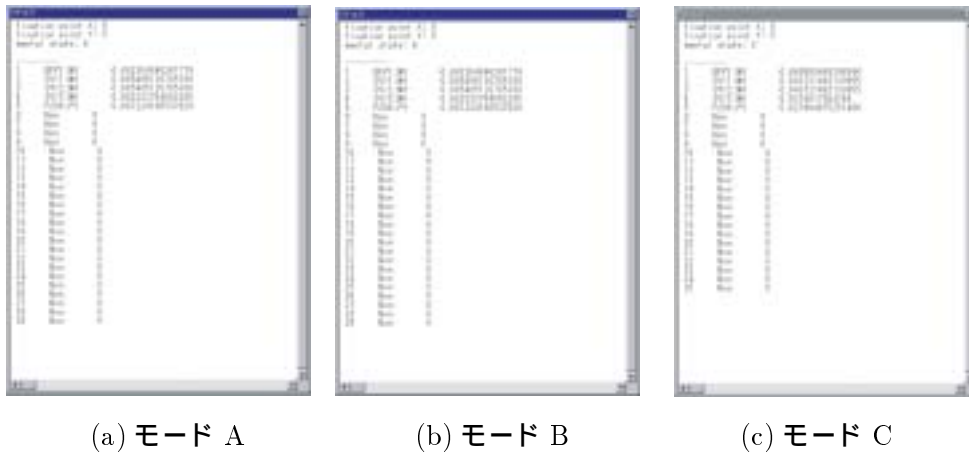


図 6.13 S での作業記憶の中味

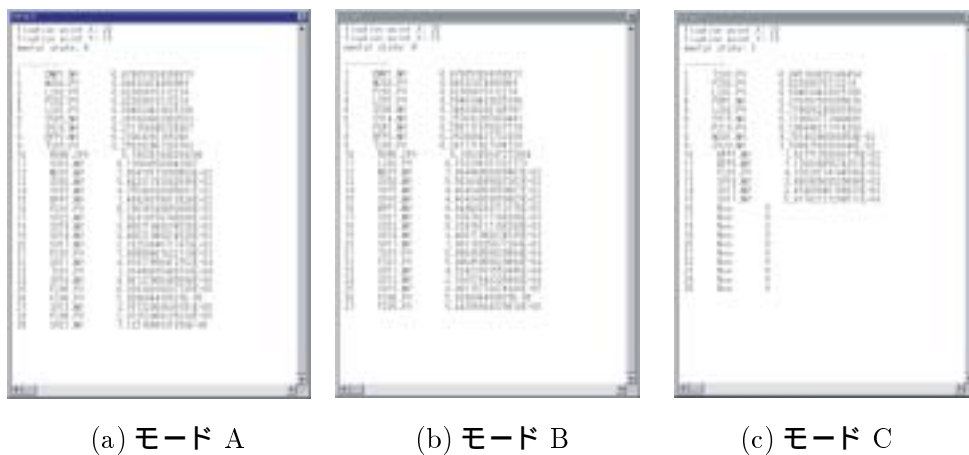


図 6.14 M での作業記憶の中味

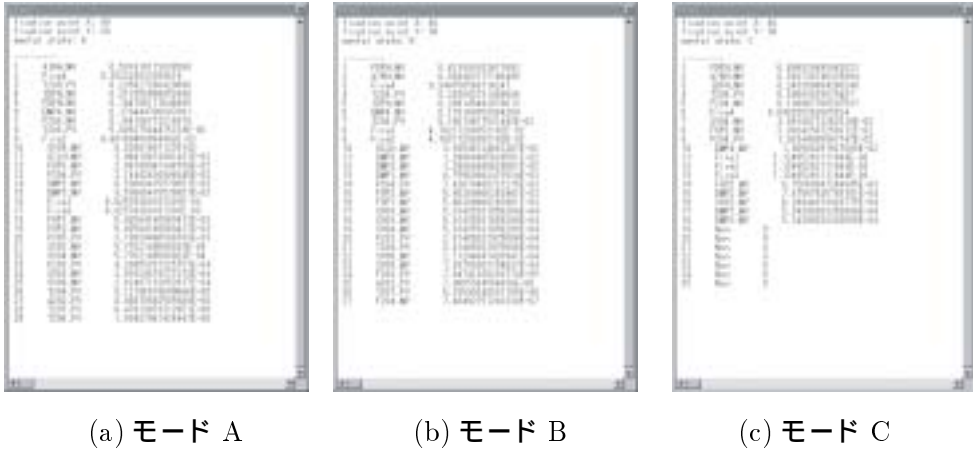


図 6.15 E での作業記憶の中味

表 6.10 作業記憶の情報数

心理状態	監視の最初			監視の途中			監視の最後		
	write	keep	search	write	keep	search	write	keep	search
モード A	5	5	5	29	29	29	29	29	29
モード B	5	5	5	27	27	27	27	27	27
モード C	5	5	5	22	18	15	25	23	18



図 6.16 M での各過程の作業記憶 (モード C)

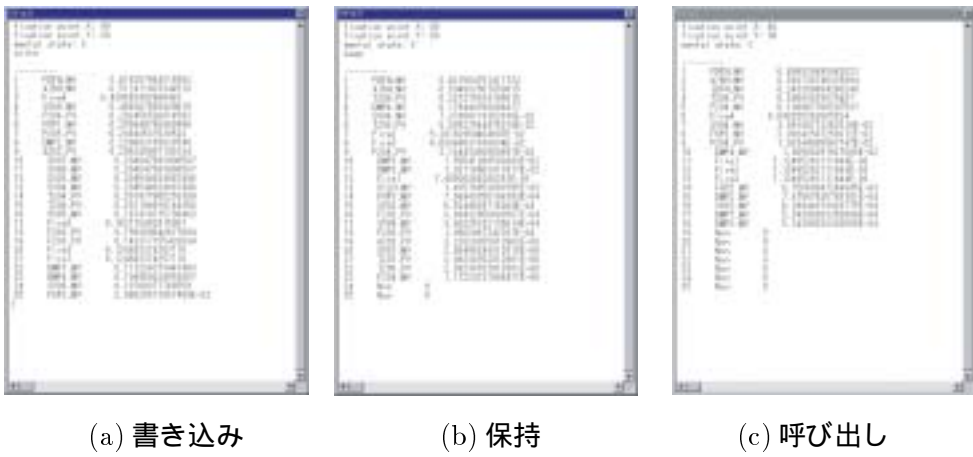


図 6.17 E での各過程の作業記憶 (モード C)

## 6.3 思考系エラーのシミュレーション

プラントに異常が発生した時、思考プロセッサが異常原因を判定する際に発生するエラーのシミュレーションを行った。思考プロセッサは作業記憶の情報に基づいて異常判定を行うため、実験では視角  $\theta$  を固定 ( $10^\circ$ ) し、知覚プロセッサで情報の見落とし見逃ごしがなく、作業記憶で情報の消失がない状況で思考系エラーのシミュレーションを行った。思考パラメーターは異常判断・判定の複雑さとオペレータの心理状態により決められる。異常判断・判定の複雑さは発生する異常を特定するのに必要な状態変数の数に依存すると考えた。思考プロセッサが異常原因を判定できないことをオペレータの心理状態と思考パラメーターのしきい値に基づいて分析する。

### 6.3.1 実験シナリオ

- (1) 燃料ポンプ (FOP1)1 台故障が発生した時、オペレータの心理状態と思考パラメーターのしきい値を変えて、思考プロセッサが異常原因を判定できるかを調べる。
- (2)  $O_2$  計故障が発生した時、オペレータの心理状態と思考パラメーターのしきい値を変えて、思考プロセッサが異常原因を判定できるかを調べる。

### 6.3.2 実験結果と考察

- (1) 燃料ポンプ (FOP1)1 台故障が発生した時、表 6.11 に示すように、心理状態がモード A の場合は、思考パラメーターのしきい値が 0 から 0.6 の場合までは異常原因を判定することができた。思考パラメーターのしきい値が 0.7 と 0.8 の場合は異常原因を判定することができる場合とできない場合があった。これは次のようにして起こる。常時監視中、燃料ポンプのアイコンの色の変化に先に気づいた場合は異常原因を判定することができる。しかし燃料ポンプの故障による他の状態変数の異常に先に気づくと、その異常状態変数の連想状態変数を観察することになる。このため心理状態がモード B になり、思考パラメーターの値がしきい値より小さくなり、異常原因を判定することができなくなる。また思考パラメーターのしきい値が 0.8 より大きい場合は異常原因を特定できなかった。

心理状態がモード B の場合は、思考パラメーターのしきい値が 0 から 0.6 の場合までは異常原因を判定することができたが、思考パラメーターのしきい値が 0.6 よ



り大きい場合は異常原因を特定できなかった。心理状態がモード C の場合は、思考パラメーターのしきい値が 0 から 0.4 の場合までは異常原因を判定することができたが、思考パラメーターのしきい値が 0.4 より大きい場合は異常原因を特定できなかった。

思考パラメーターのしきい値が一定の場合は、心理状態のモード A、B、C 順に異常原因判定が難しくなった。心理状態が一定の場合は、思考パラメーターのしきい値が大きくなるに従い異常原因判定ができなくなった。思考パラメーターのしきい値はオペレータのプラント運転経験やプラントに関する知識により小さくなると考えられることから、教育や訓練により異常原因判定ができるようになることが説明できる。また心理状態を改善することにより思考プロセッサの異常判定の確率を高められることも実験により確認できた。

例として、オペレータモデルが燃料ポンプ故障の異常原因が判定できない場合のオペレータの思考・行動をシミュレーションした。図 6.18 に示すように、常時監視中にプラントのシミュレータのある画面情報の異常に気づき、異常状態変数の連想状態変数を観察した。しかし異常原因判定ができず、さらにトレンド画面を見て異常原因を追求した。それでも異常原因を特定することはできなかった。異常原因が判定できないため、オペレータの心理状態はモード A からモード B をへてモード C に変化した。

表 6.11 燃料ポンプ故障時の異常原因判定の結果

心理状態	思考パラメーターのしきい値						
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
モード A	成功	成功	成功	成功	成功	成功	成功
モード B	成功	成功	成功	成功	成功	成功	成功
モード C	成功	成功	成功	成功	成功	失敗	失敗

心理状態	思考パラメーターのしきい値			
	0.7	0.8	0.9	1.0
モード A	成功、失敗	成功、失敗	失敗	失敗
モード B	失敗	失敗	失敗	失敗
モード C	失敗	失敗	失敗	失敗



図 6.18 燃料ポンプ故障時のオペレータの思考・行動

- (2) 酸素系故障の異常が発生した場合、表 6.12 に示すように、オペレータの心理状態がモード A、モード B の場合は、思考パラメーターのしきい値が 0 から 0.6 の場合までは異常原因を判定することができたが、思考パラメーターのしきい値が 0.6 より大きい場合は異常原因を特定できなかった。心理状態のモード C の場合は、思考パラメーターのしきい値が 0 から 0.4 の場合までは異常原因を判定することができたが、思考パラメーターのしきい値が 0.4 より大きい場合は異常原因を特定できなかった。このように心理状態がモード A、B、C の順に異常原因判定が難しくなった。また思考パラメーターのしきい値が大きくなるに従い異常原因判定ができなくなった。

例として、オペレータモデルが酸素系故障の異常原因を判定できない場合のオペレータの思考・行動をシミュレーションした。図 6.19 に示すように、常時監視中にプラントのある画面情報の異常に気づき、異常状態変数の連想状態変数を観察した。しかし異常原因判定ができず、トレンド画面を観察し異常原因を追求したが、異常原因を特定することはできなかった。オペレータの心理状態はモード A からモード B に変わり、最終的にモード C になった。

表 6.12 酸素計故障の異常原因判定の結果

心理状態	思考パラメーターのしきい値					
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
モード A	成功	成功	成功	成功	成功	成功
モード B	成功	成功	成功	成功	成功	成功
モード C	成功	成功	成功	成功	成功	失敗

心理状態	思考パラメーターのしきい値				
	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
モード A	成功	失敗	失敗	失敗	失敗
モード B	成功	失敗	失敗	失敗	失敗
モード C	失敗	失敗	失敗	失敗	失敗



図 6.19 酸素計故障時のオペレータの思考・行動

## 6.4 運動系エラーのシミュレーション

プラントシミュレータに異常が発生した場合、運動プロセッサが思考プロセッサで決定した意図通りに異常対応操作プログラムを実行することができるかを調べる。運動パラメーターは動作の切迫度とオペレータの心理状態により決められる。動作の切迫度は実際の動作に必要な最小時間を動作に使える時間でわることにより決める。動作に使った時間が動作に必要な時間の最小値より小さい場合は正しい動作は実行されないため、実験では動作の切迫度を 1.0 より小さい値を取るようにした。実験ではプラントシミュレータに給水ポンプ (BFP1) トリップの異常が発生した場合、思考プロセッサが異常原因を特定した状況で、運動パラメーターのしきい値、オペレータの心理状態と動作の切迫度に基づいて、運動系に起こるエラーを分析する。

### 6.4.1 実験シナリオ

- (1) 運動プロセッサの動作の切迫度を 1.0 にして、オペレータの心理状態と運動パラメーターのしきい値を変化させて異常対応操作が行えるか否かを調べる。
- (2) 運動プロセッサの動作の切迫度を 0.5 にした場合、オペレータの心理状態と運動パラメーターのしきい値を変化させて異常対応操作の成否を調べる。

### 6.4.2 実験結果と考察

- (1) 表 6.13 にまとめたように動作の切迫度が 1.0 の時、心理状態がモード A、モード B の場合は、運動パラメーターのしきい値が 0 から 0.6 の場合までは異常対応操作プログラムを実行することができたが、運動パラメーターのしきい値が 0.6 より大きい場合は異常対応操作プログラムを実行することができなかった。心理状態がモード C の場合は、運動パラメーターのしきい値が 0 から 0.4 の場合までは異常対応操作プログラムを実行することができたが、運動パラメーターのしきい値が 0.4 より大きい場合は異常原因を判定できても、異常対応操作プログラムを実行することができなかった。これらの結果から、心理状態のモード A、B、C 順に異常対応操作プログラムの実行が難しくなったことがわかる。また運動パラメーターのしきい値が大きくなるに従い異常対応操作プログラムを実行することができなくなった。
- (2) 表 6.14 にまとめたように動作の切迫度が 0.5 の場合は、心理状態がモード A、モー

ド B の場合は、運動パラメーターのしきい値が 0 から 1.2 の場合までは異常対応操作プログラムを実行することができたが、しきい値が 1.2 より大きい場合は異常対応操作プログラムを実行することができなかった。心理状態がモード C の場合は、運動パラメーターのしきい値が 0 から 0.8 の場合までは異常対応操作プログラムを実行することができたが、しきい値が 0.8 より大きい場合は異常原因を特定できても、異常対応操作プログラムを実行することができなかった。これらの結果から、心理状態のモード A、B、C 順に異常対応操作プログラムの実行が難しくなったことがわかる。また運動パラメーターのしきい値が高くなるに従い異常対応操作プログラムの実行ができなくなった。

動作の切迫度が 0.5 の場合は動作の切迫度が 1.0 の場合に比べて、時間的余裕があり、異常対応操作を実行できる可能性が高くなった。対応操作に使う時間を長くすると異常対応操作の成功率が高くなった。しかし異常対応操作を終わるまでの時間も長くなる。許される範囲で適切な時間をかけて操作をすることが必要となる。

図 6.20 の (a) に動作の切迫度が 1.0 の場合の異常対応操作の履歴を示す。この場合は異常対応操作に 42 秒かかった。(b) に動作の切迫度が 0.5 の場合の異常対応操作の履歴を示す。この場合は異常対応操作に 84 秒かかった。動作の切迫度が 2.0 の場合は (c) に示すように、オペレータモデルは異常原因を特定したが、正しい動作を実行することができなかった。動作の切迫度が 1.0 である (d) は、異常原因判定はできたが、運動パラメーターがしきい値より小さいため、異常対応操作プログラムを実行することができなかった場合である。オペレータの運動パラメーターのしきい値はオペレータのプラント運転の訓練により小さくなると考えられることから、運転訓練を重ねることに従い、異常対応操作ができるようになることが説明できる。

表 6.13 運動プロセッサの異常対応操作の結果

(動作の切迫度：1.0)

心理状態	運動パラメーターのしきい値					
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
モード A	できる	できる	できる	できる	できる	できる
モード B	できる	できる	できる	できる	できる	できる
モード C	できる	できる	できる	できる	できる	できない

心理状態	運動パラメーターのしきい値				
	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
モード A	できる	できない	できない	できない	できない
モード B	できる	できない	できない	できない	できない
モード C	できない	できない	できない	できない	できない

表 6.14 運動プロセッサの異常対応操作の結果

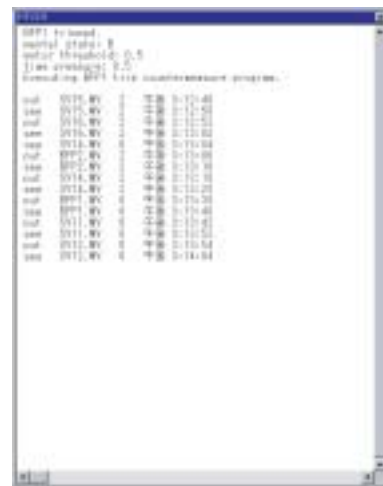
(動作の切迫度：0.5)

心理状態	運動パラメーターのしきい値					
	0~0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
モード A	できる	できる	できる	できる	できる	できる
モード B	できる	できる	できる	できる	できる	できる
モード C	できる	できる	できる	できる	できる	できない

心理状態	運動パラメーターのしきい値				
	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
モード A	できる	できる	できる	できない	できない
モード B	できる	できる	できる	できない	できない
モード C	できない	できない	できない	できない	できない



(a) 切迫度 1



(b) 切迫度 0.5

図 6.20 運動プロセッサの異常対応操作の履歴



(c) 切迫度 2



(d) 心理状態モード C

図 6.21 運動プロセッサの異常対応操作の履歴

## 6.5 複合エラーのシミュレーション

知覚、思考、運動プロセッサおよび作業記憶の中の複数のプロセスでエラーが発生する場合のシミュレーションを行う。各プロセッサと記憶は相互に影響しあう動的な環境で動作する。本節では思考プロセッサを中心として分析する。思考プロセッサは作業記憶の情報に基づいて異常判定を行うため、異常原因判定の成否は作業記憶からの情報と思考プロセッサのパフォーマンスにより決まる。ここでは思考プロセッサが異常原因を判定できない場合について、思考パラメーターのしきい値、オペレータの心理状態と知覚プロセッサが知覚した情報に基づいて分析する。

### 6.5.1 実験シナリオ

- (1) 燃料ポンプ (FOP1)1 台が故障した時、知覚パラメーターのしきい値  $\rho_1$  ( $\rho_2=2\rho_1$ ) が 0.1 で、作業記憶容量が 21 チャンクの場合、オペレータの心理状態と思考パラメーターのしきい値を変化させて、思考プロセッサが異常原因を判定できるか否かを調べる。
- (2)  $O_2$  計故障が発生した時、知覚パラメーターのしきい値  $\rho_1$  ( $\rho_2=2\rho_1$ ) が 0.1 で、作業記憶容量が 21 チャンクの場合、オペレータの心理状態と思考パラメーターのしきい値を変化させて、思考プロセッサが異常原因を判定できるか否かを調べる。

### 6.5.2 実験結果と考察

- (1) 燃料ポンプ (FOP1)1 台が故障した場合の実験結果を表 6.15 にまとめた。心理状態がモード A の場合は、思考パラメーターのしきい値が 0 から 0.6 の場合までは異常原因を判定することができた。思考パラメーターのしきい値が 0.7 と 0.8 の場合は異常原因を判定できる場合とできない場合があった。すなわち、常時監視中に、燃料ポンプのアイコンの色の変化に先に気づいた場合は異常原因を判定することができたが、燃料ポンプの故障による他の状態変数の異常に先に気づくと、その異常状態変数の連想状態変数を観察しなければならず、心理状態がモード B になり、思考パラメーターの値がしきい値より小さくなるため、異常原因を判定することができなくなった。思考パラメーターのしきい値が 0.8 より大きい場合は異常原因を特定できなかった。



心理状態がモード B の場合は、思考パラメーターのしきい値が 0 から 0.6 の場合までは異常原因を特定することができたが、しきい値が 0.6 より大きい場合は異常原因を特定できなかった。心理状態のモード C の場合は、思考パラメーターのしきい値が 0 から 0.4 の場合までは異常原因を特定することができたが、しきい値が 0.4 より大きい場合は異常原因を特定できなかった。

表 6.15 燃料ポンプ故障時の異常原因判定の結果

心理状態	思考パラメーターのしきい値						
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
モード A	できる	できる	できる	できる	できる	できる	できる
モード B	できる	できる	できる	できる	できる	できる	できる
モード C	できる	できる	できる	できる	できる	できない	できない

心理状態	思考パラメーターのしきい値			
	0.7	0.8	0.9	1.0
モード A	できる、できない	できる、できない	できない	できない
モード B	できない	できない	できない	できない
モード C	できない	できない	できない	できない

- (2) 酸素系故障の異常が発生した場合の実験結果を表 6.16 にまとめた。オペレータの心理状態がモード A、モード B の場合は、思考パラメーターのしきい値が 0 から 0.6 の場合までは異常原因を特定することができたが、しきい値が 0.6 より大きい場合は異常原因を特定できなかった。心理状態がモード C の場合は、思考パラメーターのしきい値と関係なく異常原因を特定することができなかった。知覚プロセッサの知覚結果を調べたところ、図 6.22 に示すように、常時監視中最大 39 個の画面情報を知覚したが、酸素計故障に関係する送風量、排ガス酸素濃度、排ガス一酸化炭素濃度、ファーンズ圧力を知覚できていないことが分かった。常時監視中異常と関係する画面情報を知覚できなかった場合、もしアラーム音情報に気づくとアナンシェータ画面を見て、連想状態変数やトレンド画面情報を観察して異常原因を判定することができる。しかし、アラーム履歴を調べた結果、酸素計故障が発生した時、異常が発生しても何のアラームも鳴っていない。オペレータモデルは視覚情報と聴覚情報の両方から異常に気づくことなく常時監視を続けていたことになる。この結果はアラーム設定の重要性を示している。

表 6.16 酸素計故障の異常原因判定の結果

心理状態	思考パラメーターのしきい値					
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
モード A	できる	できる	できる	できる	できる	できる
モード B	できる	できる	できる	できる	できる	できる
モード C	できない	できない	できない	できない	できない	できない

心理状態	思考パラメーターのしきい値				
	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
モード A	できる	できない	できない	できない	できない
モード B	できる	できない	できない	できない	できない
モード C	できない	できない	できない	できない	できない

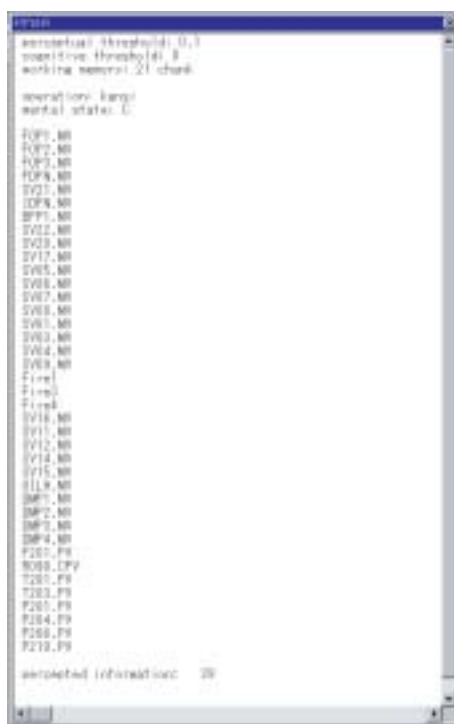


図 6.22 モード C の時の知覚結果

## 6.6 まとめ

本章では開発した心身状態を考慮したオペレータモデルを用いて、モデル中の各パラメーターを調整することにより、ヒューマンエラー発生のシミュレーションを行った。常時監視における知覚プロセッサの知覚率は、オペレータの心理状態、注視点の移動幅、認識可能な領域の大きさ、知覚パラメーターのしきい値により変化する。作業記憶の書き込み過程、保持過程、検索過程の結果はオペレータの心理状態、記憶容量、記憶強度により変化する。思考プロセッサの異常原因判定の正しさはオペレータの心理状態と作業記憶からの情報により変化する。運動プロセッサの異常対応操作プログラムの実行はオペレータの心理状態と動作の切迫度により変化する。各プロセッサと記憶の動作が相互に影響しあってヒューマンエラーが発生する様子がシミュレーションできるようになった。本章で示したヒューマンエラーの詳細な分析は、ヒューマンインタフェースの評価やオペレータの運転支援システムの開発に役立てられる。

## 第7章 結論と今後の課題

プラント運転のオペレータモデルは特定の目的にそって、人間のある限られた特性を表現したものであって、使用目的によって、多様なオペレータモデルが提案されている。本研究では、Cardらの単純な人間情報処理モデルを基本として、オペレータの行動をダイナミックにシミュレーションできる認知情報処理モデルを構築した。まず最初に、オペレータの情報処理モデルを知覚、思考、運動の三つのプロセッサと作業記憶、長期記憶の記憶領域から構成した。このオペレータモデルは、プロセス状態の論理判断によって異常原因を特定し、緊急対応プログラムを実行する。このオペレータモデルをPC上に実装したあと、運転訓練用ボイラープラントシミュレータと結合してプラントシミュレータに発生する標準的な異常にリアルタイムで対応できることを確かめた。また、人間オペレータの時間特性が本オペレータモデルによって再現できることも確認した。

オペレータの思考や行動、オペレータの心理状態、プラントの状態は互いに複雑に影響を及ぼしあう。それゆえプラント運転におけるヒューマンエラーなどのヒューマンファクターの問題を考えるうえで、これらの要素を個別に解析するだけではなく、時々刻々と変わる状況の中で各々の要素がどのように影響を及ぼしあうかを解析することが必要である。現場で共有しているヒューマンエラーに関する知見をシミュレーションするため、オペレータの情報処理モデルにオペレータの心理状態、注視点と視野の情報を追加して、心身状態を考慮したオペレータモデルを開発した。またヒューマンエラー発生のメカニズムをシミュレーションによって考察するため、各プロセッサや記憶のパフォーマンスを表すパラメーターを導入した。最初のオペレータモデルと同じように心身状態を考慮したオペレータモデルをPC上に実装し、ボイラープラントシミュレータと結合してプラントシミュレータに発生する標準的な異常にリアルタイムで対応できることを確かめた。作成したオペレータモデルは、監視操作中に画面情報の異常に気づいた時、異常原因が画面上で明らかな場合は直ちに定型の対応操作を行った。異常原因が画面上で明らかでない場合は異常状態変数から連想した連想状態変数を観察して、それらの異常パターンから異常原因を追求した。それでも異常原因を特定できない場合はトレンド画

面情報を観察して、さらに異常原因を追求して、リアルタイムで異常に対応した。

続いてオペレータモデルの各プロセッサと記憶のパフォーマンスに関するパラメータを調整することにより、いろいろな状況で起こるヒューマンエラーのシミュレーションを行い、ヒューマンエラー発生のメカニズムを考察した。例えば、知覚プロセッサの知覚結果がオペレータの心理状態、注視点の移動、認識可能な領域の大きさ、監視画面要素の特徴により変わることを再現した。作業記憶の書き込み、保持、検索の過程での情報の消失はオペレータの心理状態と情報の特徴により変わることを再現した。思考プロセッサの異常判断の間違いはオペレータの心理状態と作業記憶からの判断に必要な情報によることを再現した。運動プロセッサの動作の実行の成否はオペレータの心理状態、動作に必要な時間と実際動作に使った時間により変わることを再現した。このように現場で共有されているヒューマンエラーに関する知見をシミュレーションにより再現した。さらに、特定の要素が直接エラーを引き起こす場合はもちろんのこと、いろいろな要素が複合して発生するエラーのメカニズムも解析した。

今後の課題としては次のことが考えられる。

- いろいろな状況でのヒューマンエラーの発生をシミュレーションし、そのプロセスを解析することによって有効な対策を立案する方法論を確立する。
- 作成したオペレータモデルを仮想被験者として用いるためには、人間の実測データをもとにモデル中のパラメータ値を調整してシミュレーションを行う必要がある。このためのデータを蓄積する。
- 経験したことがない異常が発生した場合は、経験から獲得した手順や経験則は適用できない。この場合はより高次の目標に基づいて行動する知識ベースの行動が必要である。オペレータモデルに知識ベースの行動を実現する。
- プラント運転におけるヒューマンエラーを分析する時、作業環境がオペレータに与える影響は大きい。作業環境がオペレータに与える影響をモデリングすることにより、オペレータの内的、外的要素を考慮した、現場のオペレータにより近いオペレータモデルを作成する。
- 実際のプラントオペレーション現場では、二人以上のオペレータによるチームオペレーションが多く行われている。チーム行動をモデリングすることにより、オペレータ間のコミュニケーションや、組織体制についての解析を行う。

## 謝辞

本論文の遂行するにあたって始終暖かい御指導、御教示を賜りました主指導教官の奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科の西谷 紘一教授に厚く御礼を申し上げます。

お忙しい中論文審査を引き受け下さしまして、貴重な御指導と御助言をいただきました奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科の松本 健一教授に深く感謝いたします。

研究の要所で貴重な御指導と御助言をいただきました奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科の山下 裕助教授に深く感謝いたします。

実務面で熱心な御指導と御助言をいただきました元奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科の黒岡 武俊助手（現在富山大学工学部物質生命システム工学科助教授）に深く感謝いたします。

リサーチミーティングなどで貴重な御助言をいただきました奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科の今福 啓助手に深く感謝いたします。

公私に渡ってお世話になりました奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科システム制御・管理講座の皆様に深く感謝いたします。

本研究にあたり素晴らしい研究環境を提供した奈良先端科学技術大学院大学に厚く御礼を申し上げます。

## 参考文献

- [1] 甘利俊一, 外山敬介 (編). 脳科学大事典. 朝倉書店, 2000.
- [2] ボルト リチャード・A (MIT), 鶴岡雄二/訳. マン・マシン・インターフェース進化論. パーソナルメディア, 1987.
- [3] Card S.K., T.P. Moran and A. Newell. The Psychology of Human-Computer Interaction. Lawrence Erlbaum Associates, 1983.
- [4] Chen Jie, R.J. Patton. Robust Model-Based Fault Diagnosis For Dynamic System. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [5] Elzer P.F., R.H. Kluwe and B. Boussoffara(Eds). Human Error and System Design and Management. Springer, 2000.
- [6] Falzon P.. Cognitive Ergonomics, Understanding, Learning and Designing Human-Computer Interaction. ACADEMIC PRESS, 1990.
- [7] 福田忠彦. 生体情報システム論. 産業図書, 1995.
- [8] 福田忠彦, 渡辺利夫. ヒューマンスケープ、視覚の世界を探る. 日科技連, 1996.
- [9] 福田忠彦. 生体情報論. 朝倉書店, 1997.
- [10] 船橋誠壽, 吉原郁夫. 知的情報処理. 朝倉書店, 1999.
- [11] 古田一雄. プロセス認知工学. KAIBUNDO, 1998.
- [12] Gilmore Walter E., David I. Gertman, Harold S. Blackman. User-Computer Interface in Process Control, A Human Factors Engineering Handbook. ACADEMIC PRESS, 1989.

- [13] 御領 謙, 菊地 正, 江草 浩幸. 最新認知心理学への招待、心の働きとしくみを探る. サイエンス社, 2001.
- [14] ハーモン P., D. キング 著, 諏訪 基 監訳. エキスパートシステム. サイエンス社, 1988.
- [15] Hollnagel Erik. Human Reliability Analysis Context and Control. ACADEMIC PRESS, 1993.
- [16] Hollnagel Erik. Cognitive Reliability and Error Analysis Method. Elsevier, Alden Group, Oxford, 1998.
- [17] Hollnagel E., & H. Yoshikawa. Cognitive Systems Engineering in Process Control 1996. ESSCS Groningen, The Netherlands, 1998
- [18] <http://www.sikiken.co.jp/colors/>
- [19] 伊藤謙治. 高度成熟社会の人間工学. 日科技連, 1997.
- [20] ジョンソン P.N. = レアード, 海保博之 監修, AIUEO 訳. メンタルモデル. 産業図書, 1992.
- [21] Johnson-Laird P.N. 著, 海保博之, 中溝幸夫, 横山詔一, 守 一雄 訳. 心のシミュレーション. 新曜社, 1994.
- [22] Jungclaus Ralf. Modeling of Dynamic Object Systems. Vieweg, 1993.
- [23] 海保博之, 原田悦子, 黒須正明. 認知的インタフェース. 新曜社, 1991.
- [24] 海保博之, 原田悦子. プロトコル分析入門. 新曜社, 1993.
- [25] 金子隆芳. 色の科学、その心理と生理と物理. 朝倉書店, 1999.
- [26] Karwowski Waldemar. International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors, VOLUME 1, 2, 3. TAYLOR & FRANCIS, 2001.
- [27] ケイシー S. 著, 赤松幹之 訳. 事故はこうして始まった、ヒューマンエラーの恐怖. 化学同人, 1995.



- [28] 北島禎二, 中山慶彦, 黒岡武俊, 山下 裕, 西谷紘一. プラント運転を行うオペレータモデルの開発. 日本プラント・ヒューマンファクター学会誌, Vol.2, No.2, pp.106-115 (1997).
- [29] 黒川隆夫. ノンバーバルインタフェース. オーム社, 1994.
- [30] 黒岡武俊, 木佐昌文, 山下 裕, 西谷紘一. 脳波を用いたプラントオペレータの思考状態推定. 日本プラント・ヒューマンファクター学会誌, Vol.3, No.2, pp.100-109, 1998.
- [31] Kurooka T., Y. Yamashita, H. Nishitani. Mind state estimation for plant support. Computer and chemical Engineering 24, 551-556, 2000
- [32] Mavrovouniotis Michael L.. Artificial Intelligence in Process Engineering. ACADEMIC PRESS, INC, 1990.
- [33] 三上章允 (編). 視覚の進化と脳. 朝倉書店, 1996.
- [34] 日本視覚学会 (編). 視覚情報処理ハンドブック. 朝倉書店, 2000.
- [35] 西田豊明. 定性推論の諸相. 朝倉書店, 1993.
- [36] Nishitani Hirokazu. Human-computer interaction in the new process technology. J. Proc. Cont. Vol.6, No.2/3, pp. 111-117, 1996.
- [37] Nishitani Hirokazu, Tsuguo Kawamura, Go Suzuki. University-industry cooperative study on plant operations. Computers and Chemical Engineering 24, 557-567, 2000.
- [38] 西谷紘一, 藤原健史, 黒岡武俊, 北島禎二, 福田 稔. プラント運転制御システムに対するユーザビリティテストの試み. 日本プラント・ヒューマンファクター学会誌, Vol.1, No.2, pp.26-35 (1996).
- [39] Peterson Lloyd R. and Margaret Jean Peterson. Short-term retention of individual verbal items. Vol. 58, No 3 september (1959).
- [40] Preece Jenny, Yvonne Rogers, Helen Sharp, David Benyon, Simon Holland, Tom Carey. Human-Computer Interaction. Addison-Wesley, 1994.

- [41] PSE Asia 2000. International Symposium on Design, Operation and Control of Next Generation Chemical Plants. Kyoto, Japan, 2000.
- [42] Rasmussen J.. Skills, Rules, knowledge: signals, signs, symbols and other distinctions in human performance models. *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, MSC-13, 257-267, 1983.
- [43] ラスムッセン J. (著), 海保博之, 加藤 隆, 赤井真喜, 田辺文也 (訳). インタフェースの認知工学. 啓学出版, 1990.
- [44] Rasmussen Jens, Annelise Mark Pejtersen, L.P.Goodstein. Cognitive Systems Engineering. A Wiley-Interscience Publication JOHN WILEY & SONS, INC, 1994.
- [45] Reason James. Human Error. Cambridge University Press, 1990.
- [46] リーソン J. 著, 林 喜男監訳. ヒューマンエラー—認知科学的アプローチ—. KAI-BUNDO, 1994.
- [47] 坂田晃一, 石井春江, 黒岡武俊, 西谷紘一. 異常対応訓練にみるオペレータの挙動の特徴. 日本プラント・ヒューマンファクター学会誌, Vol.4, No.2, pp.112-120 (1999).
- [48] 坂田晃一, 西谷紘一. シミュレータを用いた異常対応訓練についての考察. 日本プラント・ヒューマンファクター学会誌, Vol.5, No.2, pp.130-140 (2000).
- [49] 佐相邦英, 吉村誠一, 高野研一, 岩井誠司, 藤本順三. 運転チーム行動モデル検証用プラントシミュレーションコードの開発. 電力中央研究所報告, 研究報告 : S93002, 1993.
- [50] 関口 隆, 高橋 浩, 青木正夫, 下川勝千, 薦田憲久. シーケンス制御工学. 電気学会, 1992.
- [51] 重野 純 (編). 心理学. 新曜社, 1994.
- [52] 篠原 彰一. 学習心理学への招待、学習・記憶のしくみを探る. サイエンス社, 1999.
- [53] Sutton Robert. Modelling Human Operators in Control System Design. RESEARCH STUDIES PRESS LTD. JOHN WILEY & SONS, INC, 1990.

- [54] 高野研一, 佐相邦英, 吉村誠一, 岩井誠司, 関本保男. 原子力発電所における運転チームの行動シミュレーション—オペレータ行動モデル (個人モデル) の開発—. 電力中央研究所報告, 研究報告: S93001, 1993.
- [55] 高野 研一, 長谷川 尚子, 佐相 邦英. 認知過程シミュレーションによる異常対応操作時の認知機能別ワークロードの推定. 人間工学, Vol.35, No.6, 1999.
- [56] 田村 博 (編). ヒューマンインタフェース. オーム社, 1998.
- [57] 丹治 順, 吉澤修治 (編). 脳の高次機能. 朝倉書店, 2001.
- [58] 塚原仲晃 (編). 脳の情報処理. 朝倉書店, 1996.
- [59] 上野晴樹, 小山照夫 (共編). エキスパートシステム. オーム社, 1988.
- [60] 内川恵二. 色覚のメカニズム、色を見る仕組み. 朝倉書店, 1998.
- [61] Wang P.Z, K.F Loe. Between Mind and Computer. World Scientific, 1993.
- [62] Widman Lawrence E., Kenneth A. Loparo, Norman R. Nielsen. Artificial Intelligence, Simulation, And Modeling. John Wiley & sons, Inc., 1989.
- [63] ヤコブ・ニールセン著, 篠原稔和監訳, 三好かおる訳. ユーザビリティエンジニアリング原論、ユーザーのためのインタフェースデザイン. トッパン, 1999.
- [64] 柳田邦男. 事故調査. 新潮社, 1994.
- [65] 横河電機株式会社. ボイラー・シミュレータ (CENTUM CS) マニュアル (1997).
- [66] 吉川栄和, 古田一雄, 中川用雄, 吉村誠一, 吉田一雄, 内藤憲夫. 原子力におけるヒューマンモデル研究の現状と応用領域の展望. 日本原子力学会誌, Vol.41, pp.2-14 No.1 (1999).
- [67] 吉野賢治. 運転・保守作業におけるヒューマンエラー予測手法の確立、その1) ヒューマンエラー誘発要因としての PSF の重要性とその構築. 日本プラント・ヒューマンファクター学会誌, Vol.1, No.1, pp.8-15 (1996).

# 付録

## A ボイラーシミュレータの各系統の状態変数

系統名	要素名	形態	役割	主要状態変数
給水系統	BFP1	アイコン	給水ポンプ No.1 スイッチ	主
	BFP2	アイコン	給水ポンプ No.2 スイッチ	主
	SV11	アイコン	BFP No.1 吐出側遮断弁	
	SV12	アイコン	BFP No.1 吸込側遮断弁	
	SV13	アイコン	BFP No.1 ミニマムフロー弁	
	SV14	アイコン	BFP No.2 吐出側遮断弁	
	SV15	アイコン	BFP No.2 吸込側遮断弁	
	SV16	アイコン	BFP No.2 ミニマムフロー弁	
	SV17	アイコン	給水遮断弁	
	F205	データ	ドラム給水量	
	F206	データ	DSH 水量	
	F207	データ	BFP 排出流量	主
	L201	データ	ドラム水位 (給水小弁用)	
	P206	データ	給水ポンプ吐出圧力	
負荷系統	SV19	アイコン	ドラム安全弁	
	SV20	アイコン	主蒸気遮断弁	
	SV21	アイコン	タービンバイパス遮断弁	
	SV22	アイコン	MSドレイン弁	
	M201	データ	タービン負荷	主
	F201	データ	主蒸気流量	
	T201	データ	主蒸気温度	
	P201	データ	主蒸気圧力	
送風系統	FDF	アイコン	FDF スイッチ	主
	AILH	アイコン	エアヒータ起動スイッチ	
	F204	データ	空気流量	主
	T208	データ	空気熱交換後温度	
	T209	データ	空気熱交換前温度	

系統名	要素名	形態	役割	主要状態変数
排気系統	IDF	アイコン	IDF スイッチ	主
	AILH	アイコン	エア-ヒータ起動スイッチ	
	A201	データ	排ガス酸素濃度	主
	A202	データ	排ガス-酸化炭素濃度	主
	T206	データ	排ガス熱交換前温度	
	T207	データ	排ガス熱交換後温度	
給油系統	FOP1	アイコン	燃料ポンプ No.1 スイッチ	主
	FOP2	アイコン	燃料ポンプ No.2 スイッチ	主
	FOP3	アイコン	燃料ポンプ No.3 スイッチ	主
	SV01	アイコン	No.1 燃料遮断弁	
	SV02	アイコン	No.2 燃料遮断弁	
	SV03	アイコン	No.3 燃料遮断弁	
	SV04	アイコン	No.4 燃料遮断弁	
	SV05	アイコン	No.1 ATM スチーム遮断弁	
	SV06	アイコン	No.2 ATM スチーム遮断弁	
	SV07	アイコン	No.3 ATM スチーム遮断弁	
	SV08	アイコン	No.4 ATM スチーム遮断弁	
	SV09	アイコン	主燃料遮断弁	
	SV10	アイコン	燃料循環弁	
	OILH	アイコン	燃料ヒーター用スチーム弁	
	F202	データ	燃料流量	主
	F203	データ	燃料ハイセレクタ	
P204	データ	バーナヘッド圧力		
P205	データ	燃料ポンプ吐出圧力		
P210	データ	ATM 圧力		
T204	データ	燃料温度		
ドラム系統	SV18	アイコン	ドラムエア-ベントスイッチ	
	M203	アイコン	ドラムドレイン弁	
	P202	データ	ドラム内圧力	
	L202	メーター	ドラム水位 (給水大弁用)	主
	T203	データ	ドラム温度	
ファーンズ系統	DMP1	アイコン	No.1 バーナダンパー	
	DMP2	アイコン	No.2 バーナダンパー	
	DMP3	アイコン	No.3 バーナダンパー	
	DMP4	アイコン	No.4 バーナダンパー	
	Fire1	アイコン	No.1 バーナフレームアイ	主
	Fire2	アイコン	No.2 バーナフレームアイ	主
	Fire3	アイコン	No.3 バーナフレームアイ	主
	Fire4	アイコン	No.4 バーナフレームアイ	主
	P203	データ	ファーンズ圧力	主

## B プラントシミュレータの画面要素

画面要素名	情報形態	大きさ	色	X 軸	Y 軸	点滅	正常状態
BFP1	アイコン	1.32	水色	7.5	5.7	OFF	ON
BFP2	アイコン	1.32	青色	7.5	13.5	OFF	OFF
SV11	アイコン	0.7	水色	10.0	5.8	—	ON
SV12	アイコン	0.7	水色	5.5	5.8	—	ON
SV13	アイコン	0.7	青色	7.6	8.5	—	OFF
SV14	アイコン	0.7	青色	10.0	13.5	—	OFF
SV15	アイコン	0.7	青色	5.5	13.5	—	OFF
SV16	アイコン	0.7	青色	7.6	10.3	—	OFF
SV17	アイコン	0.7	水色	18.5	9.5	—	ON
F205	データ	0.8	白	17.0	8.3	—	78.2
F206	データ	0.7	白	21.0	7.3	—	1.8
F207	データ	0.8	白	14.8	11.0	—	80.0
L201	データ	0.5	白	19.8	12.5	—	0.0
P206	データ	1.0	白	8.5	8.4	—	96.9
FOP1	アイコン	1.32	土黄	4.5	20.2	OFF	ON
FOP2	アイコン	1.32	土黄	4.5	22.5	OFF	ON
FOP3	アイコン	1.32	青色	4.5	25.0	—	OFF
SV01	アイコン	0.7	土黄	18.0	20.1	—	ON
SV02	アイコン	0.7	土黄	18.0	22.1	—	ON
SV03	アイコン	0.7	土黄	18.0	24.0	—	ON
SV04	アイコン	0.7	土黄	18.0	25.8	—	ON
SV05	アイコン	0.7	ピンク	14.7	18.8	—	ON
SV06	アイコン	0.7	ピンク	14.7	20.6	—	ON
SV07	アイコン	0.7	ピンク	14.7	22.6	—	ON
SV08	アイコン	0.7	ピンク	14.7	24.5	—	ON
SV09	アイコン	0.7	土黄	14.5	27.0	—	ON
SV10	アイコン	0.7	青色	8.1	17.5	—	OFF
OILH	アイコン	1.0	土黄	5.5	27.0	—	ON
F202	データ	0.7	白	11.5	26.0	—	7.0
F203	データ	0.6	白	13.0	28.2	—	52.3
P204	データ	1.0	白	16.5	28.2	—	3.9
P205	データ	1.0	白	7.0	27.5	—	12.8
P210	データ	1.0	白	10.5	20.0	—	7.5
T204	データ	0.7	白	9.8	28.0	—	90.0
IDF	アイコン	3.2	緑	35.8	22.0	—	ON
AILH	アイコン	26.25	桜色	31.0	24.0	—	ON
A201	データ	0.5	白	26.0	23.0	—	2.7
A202	データ	0.8	白	27.7	23.0	—	24.5
T206	データ	0.7	白	30.0	22.5	—	225.0
T207	データ	0.7	白	32.0	22.5	—	200.5

画面要素名	情報形態	大きさ	色	X 軸	Y 軸	点滅	正常状態
SV19	アイコン	0.7	青色	33.0	7.2	—	OFF
SV20	アイコン	0.7	ピンク	35.3	9.5	—	ON
SV21	アイコン	0.7	青色	34.5	6.5	—	OFF
SV22	アイコン	0.7	青色	34.3	12.4	—	OFF
M201	データ	1.75	白	37.5	12.0	—	80.0
F201	データ	0.8	白	31.5	11.0	—	80.0
T201	データ	0.8	白	29.0	11.0	—	485.0
P201	データ	1.1	白	30.5	8.6	—	80.0
FDF	アイコン	3.2	緑	34.0	25.5	—	ON
AILH	アイコン	26.25	桜色	31.0	24.0	—	ON
F204	データ	0.6	白	37.0	27.9	—	51.5
T208	データ	0.7	白	30.0	27.0	—	148.0
T209	データ	0.8	白	32.0	27.0	—	100.0
SV18	アイコン	0.7	青色	27.6	12.8	—	OFF
M203	アイコン	0.7	白	23.5	17.5	—	OFF
P202	データ	0.7	白	17.5	13.5	—	84.0
L202	メーター	0.7	白	17.5	14.0	—	0.0
T203	データ	1.0	白	17.5	14.8	—	298.4
DMP1	アイコン	1.2	緑	21.2	20.1	—	ON
DMP2	アイコン	1.2	緑	21.2	22.1	—	ON
DMP3	アイコン	1.2	緑	21.2	24.0	—	ON
DMP4	アイコン	1.2	緑	21.2	25.8	—	ON
Fire1	アイコン	2.0	桜色	23.0	20.1	—	ON
Fire2	アイコン	2.0	桜色	23.0	22.1	—	ON
Fire3	アイコン	2.0	桜色	23.0	24.0	—	ON
Fire4	アイコン	2.0	桜色	23.0	25.8	—	ON
P203	データ	0.7	白	27.5	19.3	—	-10.0

# 研究業績

## 学術論文誌

1. 金 銀花, 黒岡 武俊, 山下 裕, 西谷 紘一. 心理状態を考慮したオペレータモデルの開発. 日本プラント・ヒューマンファクター学会誌, Vol.7, No.2, pp.86-96(2002).

## 国際会議プロシーディングス

1. Yinhua Jin, Taketoshi Kurooka, Yuh Yamashita, Hirokazu Nishitani. Development of an Operator Model Including Human Errors. Proceedings of International Symposium on Design, Operation and Control of Next Generation Chemical Plants (PSE Asia 2000), pp.559-564, Kyoto, Japan, Dec.6-8, (2000).
2. Yinhua Jin, Taketoshi Kurooka, Yuh Yamashita, Hirokazu Nishitani. A Cognitive Information Processing Model for Analysis of Plant Operator Errors. Proceedings of International Symposium on Design, Operation and Control of Next Generation Chemical Plants (PSE Asia 2002), pp.313-318, Taipei, Taiwan, Dec.4-6 (2002).
3. Yinhua Jin, Taketoshi Kurooka, Yuh Yamashita, Hirokazu Nishitani. Modeling and Simulation of Human Errors in Plant Operations. Proceedings of the 8th International Symposium on Process Systems Engineering (PSE 2003), Kunming, China, June 22-27 (2003) (Accepted).

## 国内会議発表

1. 金 銀花, 黒岡 武俊, 山下 裕, 西谷 紘一. プラントオペレータの情報処理モデル. ヒューマンインタフェースシンポジウム 2001 論文集, pp.535-538, 大阪, 10月2日



～ 4 日 (2001).

2. 金 銀花, 黒岡 武俊, 山下 裕, 西谷 紘一. プラントオペレータの知覚エラーのシミュレーション. ヒューマンインタフェースシンポジウム 2002 論文集, pp.71-74, 札幌, 9 月 1 日 ~ 3 日 (2002).
3. 金 銀花, 黒岡 武俊, 山下 裕, 西谷 紘一. 心理状態を考慮したオペレータモデルの開発. 化学工学会第 35 回秋季大会, 神戸, 9 月 18 日 ~ 20 日 (2002).