

JAERI - M
91-039

原子炉運転員タスクシミュレーションモデル
OPPSの性能評価

1991年3月

吉田 一雄

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷機

原子炉運転員タスクシミュレーションモデルOPPSの性能評価

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部

吉田 一雄

(1991年2月7日受理)

原研では、原子炉異常時の運転員の認知的ふるまいを計算機で模擬する手法を開発するため、関連する既存の手法の分析と評価を進めている。その一環として、米国オークリッジ国立研究所(ORNL)が開発したOPPSモデルを、汎用のタスクネットワーク解析プログラムMicro-SAINTEを用いて作成し、これを用いてタスクネットワーク解析手法に基づく運転員のふるまいのモデルの評価を行った。評価に当たっては、異常事象としてBWRでの逃し安全弁誤開を想定し、その時の運転員のふるまいを例題に取り、解析を実施した。さらに、Micro-SAINTEの基本的な性能を評価するとともに、OPPSモデル内のネットワーク表現で問題と考えられる点について検討した。

その結果、Micro-SAINTEを用いたモンテカルロシミュレーションでは、乱数シードがタスクの実行時間分布および確率的分岐割合に影響を及ぼす可能性があること、OPPSモデル内の繰り返し操作の表現方法では、タスク実行時間に分布がある場合、標準偏差を正しく計算できないこと等が明らかになった。

Evaluation of OPPS Model for
Plant Operator's Task Simulation with
Micro-SAINT

Kazuo YOSHIDA

Department of Reactor Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 7, 1991)

The development of a computer simulation method for cognitive behavior of operators under emergency conditions in nuclear power plants are being conducted at Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI). As one of activities in this project, the task network modeling and simulation method has been evaluated with reproduced OPPS model using Micro-SAINT which is a PC software for task network analysis. OPPS is an operator's task simulation model developed by Oak Ridge National Laboratory.

Operator's tasks under the condition of failure open of a safety relief valve in a BWR power plant has been analyzed as a sample problem with Micro-SAINT version of OPPS for the evaluation of task network analysis method. Furthermore, the fundamental capabilities of Micro-SAINT has been evaluated, and the task network in OPPS model has been also examined.

As the results of this study, it has been clarified that random seed numbers in Micro-SAINT affect the probabilistic branching ratio and the distribution of task execution time calculated by Monte Carlo simulations, and the expression of network for a repeated task in the OPPS model leads to incorrect standard deviation in the case that a task execution time has some distribution.

Keywords: Task Simulation, Network Analysis, OPPS, Micro-SAINT,
Operator's Behaviors, Monte-Carlo Simulation

目 次

1. 序	1
2. タスクネットワーク解析の概要	3
2.1 手法の概要	3
2.2 Micro-SAINTの概要	4
3. OPPSモデルの概要	10
3.1 開発の背景	10
3.2 モデルの構造	10
4. Micro-SAINT版OPPSモデルの作成	25
4.1 タスク実行時間の取扱い	25
4.2 後続タスクへの分岐方法	25
4.3 統計量の算出	26
4.4 アラーム発生に関する考察	29
4.5 ORNLレポートの記述に見られる矛盾点とその対処	30
5. Micro-SAINT版OPPSモデルの性能評価	32
5.1 逃し安全弁誤開シナリオの概略	32
5.2 逃し安全弁誤開シナリオデータの矛盾点とその対処	33
5.3 逃し安全弁誤開シナリオを用いたテストラン	33
5.4 Micro-SAINTの基本性能およびOPPSモデルのネットワーク表現の検討	35
6. 結論	55
謝辞	56
参考文献	56
付録A SAINTのジョブ制御文および入力データ	58
付録B OPPSモデルを構成するタスクの概要	63
付録C OPPS用事故シナリオ作成シート	69

Contents

1. Introduction	1
2. Task Network Analysis	3
2.1 Overview	3
2.2 Brief Description of Micro-SAINT	4
3. Overview of OPPTS Model	10
3.1 Background of Development	10
3.2 Structure of OPPTS Model	10
4. Production of Micro-SAINT Version of OPPTS	25
4.1 Treatment of Task Execution Time	25
4.2 Treatment of Branching to Following Task	25
4.3 Calculation of Statistical Values	26
4.4 Treatment of Post-Alarm Task in Disturbance Detect Phase ...	29
4.5 Treatment for Inconsistency in NUREG/CR-3515	30
5. Evaluation of Micro-SAINT Version of OPPTS	32
5.1 Treatment for Inconsistency in Safety Relief Valve Scenario Analysis Questionnaire	32
5.2 Overview of Safety Relief Valve Scenario	33
5.3 OPPTS Model Test with Safety Relief Valve Scenario	33
5.4 Evaluation of Fundamental Capability of Micro-SAINT and Examination of Expression of Task Networks in OPPTS Model ...	35
6. Conclusion	55
Acknowledgement	56
References	56
Appendix A Job Control Language and Input for SAINT	58
Appendix B Description of Tasks in OPPTS Model	63
Appendix C Work Sheet for Setup of Incident Scenario in OPPTS	69

1. 序

原研では、原子力施設におけるヒューマンファクタ研究の一環として、人間の認知的ふるまいを計算機を用いて模擬するための手法の開発を行っている。原子力施設と人間とは、多様な施設の設計、建設、運転、保守等の様々な段階で係わっており、そのふるまいを画一的に取り扱うことは不可能である。そこで、当面は、原子炉に限って、その安全性、信頼性に直接結び付く異常発生時の運転員の認知的ふるまいのモデル化手法の開発を行うこととし、そのための研究を進めている。

原子炉の運転における運転員のふるまいは、感覚器官を通して、外界の情報を知覚し、それを基に状況を把握し、それに対処するための目標を設定し、次に目標達成に必要なタスクと手順を策定し、実際に手足を動かす動作に大別される。原子炉の異常発生時での運転員のふるまいを計算機で模擬する手法として、いくつかの手法が提案されており、代表的なものとして、次のような手法がある。

米国原子力規制委員会(NRC; Nuclear Regulatory Commission)のスポンサーでWestinghouse社が開発したCES(Cognitive Environment Simulation)⁽¹⁾、欧州共同体Ispra研究所で開発中のCOSIMO(Cognitive Simulation Model)⁽²⁾は、AI(Artificial Intelligence; 人工知能)手法を用いて認知的ふるまいのモデル化を目指している。また、Oak Ridge国立研究所(Oak Ridge National Laboratory; ORNL)では、80年代初頭にタスクネットワーク解析手法を用いて、認知的ふるまいも含めて、緊急時の運転員の全行動を模擬するOPPS(Operator Personnel Performance Simulation)モデルを開発した⁽³⁾。しかし、このモデルでは、認知的ふるまいをJ.Rasmussenの意志決定モデル⁽¹⁰⁾を基に単純な4個のタスクで表現しており十分なものではない。近年、ORNLでは、この点を改善すべく、認知的ふるまいをAI手法のひとつであるエキスパートシステムを用いてモデル化することで改良し、これと、前述のタスクネットワークシミュレーションとを動的に結合してINTEROPS(Integrated Reactor Operator System)を開発している⁽⁴⁾。これは、CESあるいはCOSIMOと

OPPSの特徴を合わせ持ったモデルといえる。国内においても、タスクネットワーク解析手法を用いて運転員の認知過程モデルを開発し⁽⁵⁾、訓練用シミュレータを用いた認知実験の結果を基に、モデルの検証、実験結果の分析の試みが成されている。

原研では、運転員のふるまいのモデル化手法の開発を目指し、まず関連する既存の手法の分析と評価を行うこととした。その作業の一環として、まず上記の既存の手法のうち公開情報が比較的多く、モデル開発のための計算機ソフトの入手も容易なOPPSモデルを作成し、これを用いてタスクネットワーク解析手法を用いた運転員のふるまいのモデル化の検討を行った。

タスクネットワークで解析対象をモデル化し解析する手法は、機能の流れ図あるいは動作シーケンスのダイアグラムのようなタスクを表現する技法から派生した技術であり、タスクネットワーク解析のための計算機プログラム(解析用ツール)も開発されている。

タスクネットワークモデルを用いて、人間のふるまいをモデル化する場合、一連の行動を基本的な一連の動作(タスク)に分割し、個々のタスクを一つのノードで表し、タスク間のつながりをネットワークで表現する。この解析手法を原子炉の異常時における運転員の対応操作の

ーク解析用プログラム S A I N T (Systems Analysis of Integrated Networks of Tasks)⁽⁶⁾を用いている。

本編では、タスクネットワーク解析手法による異常時の運転員の認知的ふるまいのモデル化に係わる検討の一環として、O P P Sモデルを例に取り、S A I N Tの P C (Personal Computer) 版である Micro-S A I N T⁽⁷⁾を用いて、I B M / P C 上に O P P Sモデルを作成し、タスクネットワーク解析手法の評価を行った結果をまとめている。

2. タスクネットワーク解析の概要

2.1 手法の概要

タスクネットワークで解析対象をモデル化し解析する手法は、機能の流れ図あるいは動作シーケンスのダイアグラムのようなタスクを表現する技法から派生した技術であり、タスクネットワーク解析のための計算機言語 (GERT, SIMSCRIPTなど) あるいはプログラム (解析用ツール; SAINT, HOSなど) も開発されている⁽⁶⁾。

タスクネットワーク手法を用いて、人間のふるまいをモデル化する場合、一連の行動を基本的な一連の動作 (タスク) に分析し、個々のタスクを一つのノードで表し、タスク間のつながりをネットワークで表現する。このネットワークの構造には、その中で人が遂行するタスクの順序を規定するための、意思決定などの行動の選択を描き出す分岐、あるいは、運動とか動作の反復、エラーの修復を表現するループが含まれる。ノードが表すタスクには、それを完遂するのに要する時間 (ある分布を持つ場合は、そこからランダムにサンプルされる)、次に続くタスクの一覧と、いずれのタスクに分岐するか条件が与えられる。これらの情報を基に、解析用ツールを用いて計算機上にタスクネットワークモデルを構築し、タスクネットワークシミュレーションを実行する。その結果として、たとえば、一連の行動の全実行時間の分布を求めることができる。エラーを犯した場合にそれを修復するために一連の行動の完遂に遅れを生じる場合も解析できる。このようなタスクネットワーク解析を、魚釣りを例にとり⁽⁸⁾説明する。

魚を釣るという行動は、次のような動作で構成されると考えられる。まず、釣り針に餌を付け、釣り糸を投げ入れる。魚が喰い付くのを待ち、喰い付けば釣り上げて魚を釣り針からはずし、喰い付かなければ糸を巻き上げ、餌のチェックを行い、餌がなくなっていれば針に餌を付け再度釣り糸を投げ入れる。これをタスクネットワークで表現すると図2.1のようになる。タスクネットワーク中で個々の動作は、タスクとして一つのノードで、それらのつながりはネットワークで表され、一連の動作を視覚的に表現できる。ネットワークの構造には、タスクの順序を規定するための行動の選択を表す分岐 (たとえばノード3からノード7および4への分岐)、あるいは、動作の反復を表現するループ (たとえば、ノード3とノード4の繰り返し) が含まれる。ノードにより表されるタスクには、それを完遂するのに要する時間が与えられる。たとえばノード1の“餌を付ける”という動作には、平均50秒要し、バラツキの度合は、標準偏差で20秒であると定義される。この他、タスクで定義される情報としては、次に続くタスクが2個以上ある場合いずれのタスクへ分岐するか条件である。たとえば、ノード3の“喰い付き待ち”から、ノード4あるいはノード7へ分岐するかは、喰い付きの有無で決まる。これは一般的には確率条件であり、ここでは分岐確率が条件として与えられる。これに対して“釣糸投入後の時間チェック”のノード4から、ノード3あるいはノード5への分岐条件は、釣糸を投げ入れてから時間が120秒経過したか否かである。この場合は、釣糸投入後の経過時間という状態変数の値の変化によってタスクの分岐が選択される。また、タスクのネットワーク表現の特徴の一つとして、一つのタスクを複数のサブタスクを用いた表現で置き換えることによりモデルを詳細化できることが挙げられる。たとえば、“餌のチェック”のタスクでは、餌が

完全になくなっていればノード1の“餌を付ける”へ分岐するが、餌が針に残っている場合には、餌の状態に応じたいくつかの対応が考えられる。餌がまだ新鮮であればつけかえる必要はないし、新鮮でなくても、これまでによく釣れていればもう少し取り替えないで続けてみようという判断が行われると考えられる。これをネットワーク化すれば図2.2のようになり、これを図2.1のノード6に置き換えればよい。

これらの情報を基に、タスクネットワーク解析のためのツール(SAINT、Micro-SAINTなど)を用いて計算機上にタスクネットワークモデルを構築できる。タスクネットワークシミュレーションに際しては、乱数を用いて、実行時間に分布を持つタスクの個々のシミュレーションでのタスク実行時間を決めたり、分岐が確率的であるネットワークで、いずれのタスクへ分岐するかが決められる。乱数を発生させるプログラムにおいて乱数の元になる値を乱数シードと呼ぶ。

このタスクネットワークを用いて、例えば、釣糸投入後の待ち時間が、漁果に及ぼす効果について調べることができる。すなわち、ノード4の分岐条件である待ち時間の“120秒”を喰い付きの確率の変化(待ち時間を長くすると餌が悪くなり、喰い付きの確率は低下する)も考慮して、種々の値に変えて解析を行う。ある待ち時間に対して、モンテカルロ計算のようにタスクネットワークシミュレーションを数百～数千回繰り返すことで、1尾の魚を釣り上げるのに要する平均的な時間が求まる。これより釣糸投入後の待ち時間の最適値を調べることができる。

このようなタスクネットワーク手法の機能を用いて、タスクネットワーク解析は、来客の時間を追っての変動に応じた銀行の窓口業務の最適化、あるいは、製品の組立行程での作業員の作業負荷の分析等に用いることができる。人間行動のパフォーマンスの係わる解析の実例の一つとしては、軍用ヘリコプターのコックピットの設計時でのパイロットの作業負荷の評価⁽⁹⁾が挙げられる。

2.2 Micro-SAINTの概要

SAINTは、1970年代半ば、米国空軍の航空医学研究所(Aerospace Medical Research Laboratory)において、システム設計者あるいは人間工学の技術者が、人間と機械を一体(システム)と捉え、各コンポーネントあるいはシステム全体のパフォーマンスを評価する手法を提供するためのツールとして開発された。Micro-SAINTはSAINTの基本的機能を踏襲しつつ、使用性(usability)を高め、PC上で稼動するように作成された市販のソフトウェアである。SAINTは、FORTRAN言語で書かれており、付録Aに示したような、固定フォーマットの入力により、タスクネットワークを定義するようになっている。これに対してMicro-SAINTでは、すべてのデータをプログラムとの対話によるメニュー形式で入力できるだけでなく、解析結果の図形表示が比較的容易に行えるなど、使用性が高い。しかし、他の計算プログラムとの結合による機能の拡充を考える場合、Micro-SAINTは、市販のPCソフトであるため、プログラムの修正、変更が原則的に不可能であるという制約がある。以下にMicro-SAINTの主要な特徴を記す。

(1) 基本メニュー

基本メニューとしては、

- ・モデル開発
- ・モデル実行
- ・結果の解析
- ・アニメーション

がある、各メニューの下にサブメニューがあり、それらから必要なものを選択し実行できる。

a) モデルの開発

Micro-SAINT のタスクネットワークモデル構築で重要なものは、

- ・タスクの定義
- ・ネットワークの定義
- ・変数の定義
- ・シミュレーションシナリオの定義

である。

・タスクおよびネットワークの定義

ある目標を達成するために行われる一連の基本的な動作をタスクと呼び、このタスクを基本ユニットとしてネットワークが組まれる。各タスクは、サブタスクから成るサブネットワークを用いて、より詳細に定義することができ、タスクの階層的表現が行えることが大きな特徴の一つである。Micro-SAINT では、最大個 400個のタスクが定義できる。各タスクに与えられる情報としては、タスク番号および名称に加えて、次に挙げる属性情報がある。

*タスクの実行を開始するのに必要な条件 (Release Condition)

ここで指定した条件が満足された時に、タスクが実行される。

*タスク実行時間 (Task Execution Time)

タスクの実行時間を定義する。実行時間には分布 (正規分布、 γ -分布、一様分布、指数分布が選択できる) を考慮でき、その平均値、標準偏差により、実行時間分布を定義できる。タスクネットワークモデル実行時での、タスク実行時間は、定義された時間分布とその時発生した乱数により決まる。

*タスクを開始することによる効果 (Task's Beginning Effect)

タスク実行開始直前に、タスクネットワークモデル内で定義した変数の値を操作することができる。操作内容は、C言語の実行文で定義する。

*タスクを終了することによる結果 (Task's Ending Effect)

タスク実行終了時に、タスクネットワークモデル内で定義した変数の値を操作することができる。操作内容は、C言語の実行文で定義する。

* 後続タスクとその分岐方法

次に続くタスク番号と、後続タスクが複数の場合は、いずれかのタスクに分岐するかをいくつかの分岐法の中から選択できる。分岐方法としては、probabilistic（入力で指定した割合で確率的にいずれかのタスクへ分岐）、tactical（後続タスクへの分岐条件として指定した変数あるいは関数の値が最大になるタスクへ分岐、例えば図2.1のタスク4における後続タスクへの分岐）、multiple（後続のタスクすべてに分岐する。すなわち、複数のタスクが並行して実行される）がある。

・変数定義

タスクネットワーク内で用いる変数（最大100変数）を定義する。ここで定義された変数はタスクのBeginning Effect, Ending Effectで値を参照・変更することができる。また、これらの変数はRelease Condition分岐条件等で参照でき、ネットワーク内の流れの制御に利用される。変数演算としては、四則演算、論理演算ができる。

・シミュレーションシナリオの定義

変数の初期化、シミュレーション途中での変数の時間変化等を定義する。

b) モデルの実行

タスクネットワークモデルの構築がすむと、次にモデルを実行する。モデル実行は、単にタスクシミュレーションを行うだけでなく、作成したモデルをデバッグするための充実した機能が付加されている。

例えば、デバッグモードでの実行では、1タスクの実行毎に計算が一時停止し、シミュレーションの流れを逐一追いながら実行できる。また、モデル内で定義した変数の値も、任意に選択して表示できるデバッグライク機能もある。その他、ユーザーがシミュレーション途中で変数値の変更ができ、“interactive”なモデル実行も可能である。また、タスクシミュレーションは一度に複数回連続的に実行でき、1シミュレーション毎に一連のタスク実行に要した時間が記録され、その分布を調べることができる。

c) 結果の分析

モデルの実行後、実行時間の分布あるいはスナップショット記録（その他の特徴のb)を参照のこと）された変数の値の変化を、グラフ表示することができ、結果の分析、あるいはモデルのデバッグに有効に利用できる。

d) アニメーション

タスクネットワークを図形表示し、ネットワークの一連の流れを“entities”（たとえば、製品組立行程であればその製品、銀行の窓口業務であれば人）の動きで表し、タ

スクネットワークを視覚的に理解することができ、デモンストレーションとしても最適である。

(2) その他の特徴

a) ジョブキューモデル

タスクネットワークの中で、あるタスクが比較的時間がかかり、entitiesがそこで滞ってしまうような場合、一端、entitiesを Job Queueと呼ばれるスタックにしまい、ネットワーク内の entitiesの流れを制御するためのモデルである。

これは、行程業務の最適化等の解析に有効に利用できる。例えば、銀行の窓口業務での待時間の分析を、客の訪れる頻度、事務処理一件当りの所要時間の平均と分布、窓口係の人数等をパラメータとして行うことができる。

b) スナップショット

タスクネットワークシミュレーションの中で、一定時間間隔あるいは、あるタスク開始時または終了時等、ユーザーの指定した時点での、変数の値を記録することができ、結果の分析において、その時間変化を図形表示する機能である。例えば、前述の銀行窓口業務では、待時間の平均、待人数等の一日の営業時間内での推移を時間を追ってグラフ表示できる。

c) 関数定義

ユーザーが任意の関数を定義でき、タスクネットワークシミュレーション内で関数値を参照できる。例えば、タスクの平均実行時間、標準偏差等を関数で変化させることができる。

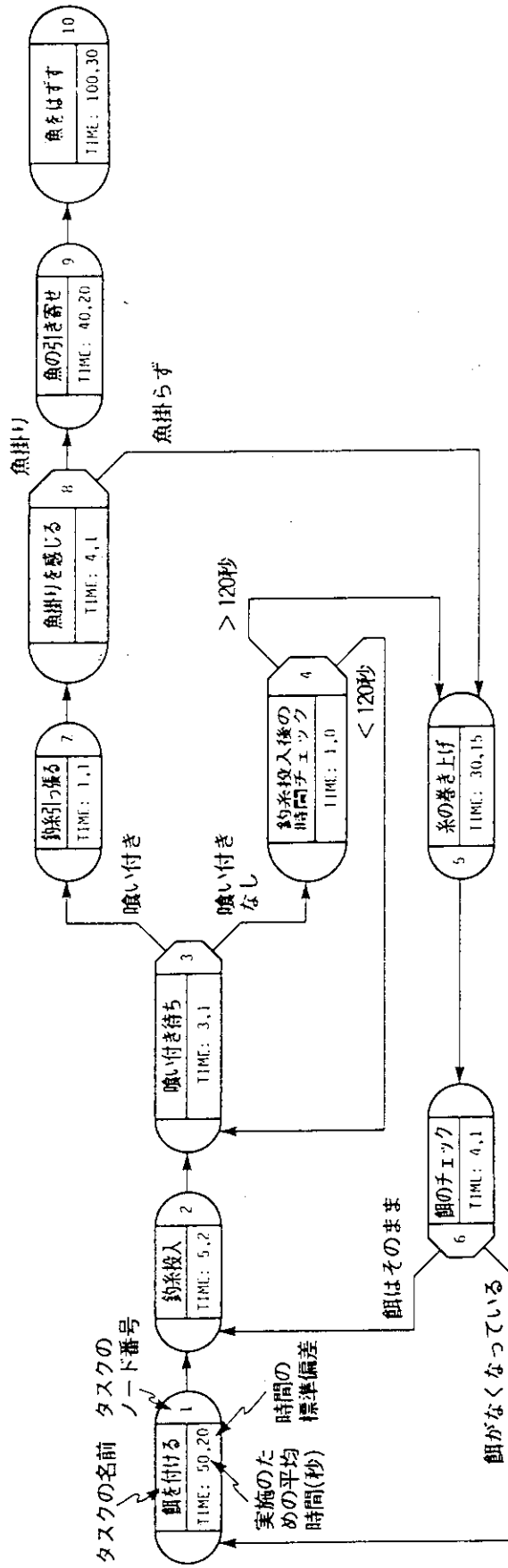


図2.1 魚釣りのタスクネットワーク表現(参考文献(8))

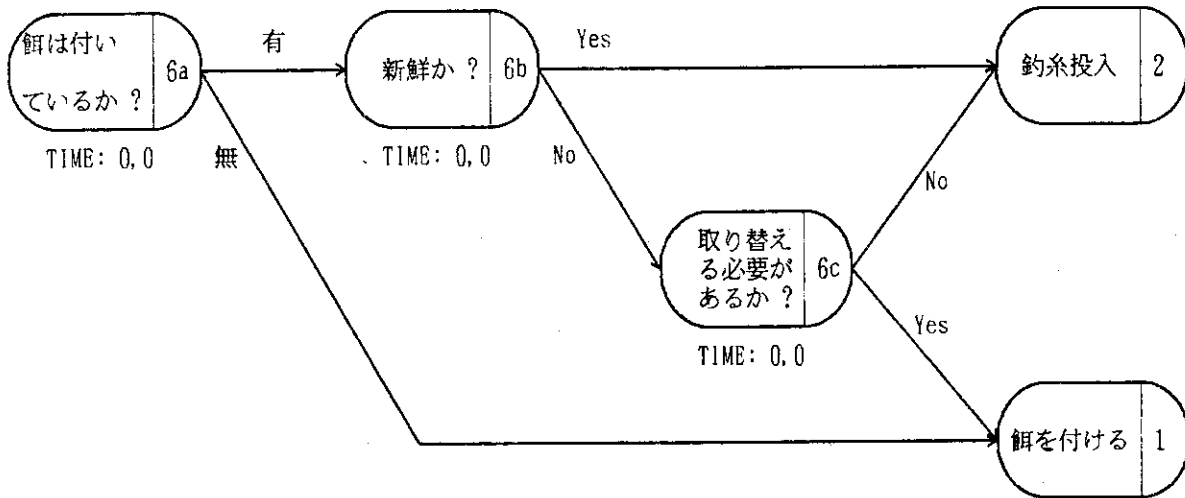


図2.2 “餌のチェック”タスクのサブタスクによる詳細化の例

3. OPPSモデルの概要

3.1 開発の背景

OPPSモデルは、米国NRCがスポンサーとなりORNLで実施されたSROA(Safety-Related Operation Action)プロジェクトの中で開発された。参考文献(3)によれば、当時NRCは、TMI事故後の対応の一つとして、NUREG-0660の中で、原子炉制御室の見直しを行い運転員のエラーの原因となるような欠陥があれば、それを改善することを求めた。そこでは、制御室の設計での、安全機能に係わる運転員と自動制御系の役割分担も問題にされた。これに対応して、電力界は、ANSI(American National Standard Institute)の策定した自動化設計基準N660に照らして、制御室の設計の見直しを行った。そこでは、運転員がシステムの性能(performance)に及ぼす影響の定量化が求められているが、これを実施するには、原子力発電所での運転員のふるまいに関する包括的で目的に合ったデータベースが必要であった。しかし、利用可能なデータは、原子力分野以外での航空、軍事での研究に基づく情報あるいは、電力関係者の主観的観察(すなわち、専門家の意見)のみであって、適当なものがなくこれが障害となり、十分な検討は行えなかった。このような状況を踏まえ、原子力発電所の緊急時での運転員のふるまいについてのデータベースを整備し、安全系に係わる運転員行動も含めて新設の原子炉の設計および既存の原子炉の改良の評価基準をNRCが策定するのに役立てることを目的としてSROAプロジェクトが実施された。OPPSモデルは、その成果の一部である。以下 参考文献(3)に即して、OPPSモデルの概要を記述する。

3.2 モデルの構造

OPPSモデルでは、運転員が行うプラントの異常に対する対応の過程を次の4つのフェイズにわけたネットワークで模擬している。

- 異常検知 (DETECT a disturbance)
- 情報の内部処理 (INTERNAL PROCESSING of information)
- 操作 (OPERATION)
- 過誤の修復 (ERROR RECOVERY)

図3.1に示すように、OPPSモデル全体は、上記の4フェイズで表現される運転員の行動のパスと原子炉システムの応答を表わすパスとから成る。しかし、両者の間での相互作用は、考慮されていない。図3.2には各フェイズを構成するタスクレベルでのOPPSモデルの全体構成を詳細に表わす。これらの図でノードは、タスクの各要素を表し、矢印はタスクの流れを表わす。以下にOPPSモデルの詳細をフェイズを追って説明する。

(1) 異常検知

本フェイズの構成を図3. 3に示す。運転員が異常を検知する形態として、OPPSモデルでは、次の3通りが考慮されている。アラーム発生前での運転員による異常検知は、異常発生とアラーム発生との時間が数秒以上あれば期待できる。一つはプラント全体の挙動を把握する目安として運転員が監視している表示パラメータに現われた異常徴候による異常の検知である。この種の表示パラメータは、OPPSモデルでは“High Level Indication”（高レベル指示）と呼び、たとえば、水位、圧力、電気出力などがある。これらパラメータのうち1つが、プラントの異常により影響を受け変化すると、アラーム発生前の異常検知の可能性は高くはないが有りうる。もう一つは、異常が緩かに進行する場合の異常検知である。このようなケースでは、種々のパラメータの時間的変化が記録されており、これを定期的にチェックすることにより、アラーム発生前に異常を検知でき、その可能性は一般的に前者より高い。前述の二形態は、アラーム発生前の異常検知である。これに対して、アラーム発生による異常検知は、時間遅れはなく、発生とほとんど同時に行なわれる。OPPSでは、これらを図3. 3に示すようなタスクネットワークで表現している。

タスク2“指示計のタイプ”(Indication Type)では、アラーム発生前の異常検知に関連する表示に係わる行動形成因子(PSF: Performance Shaping Factor)を考慮している。もし、解析の対象とする異常において、高レベル指示計の表示パラメータが関連しているか否かを解析の初期条件として入力することによってタスク5“異常検知確率”(Probability of Detection)あるいは、タスク6“モニターによる異常検知”(Monitor Detect)に分岐する。タスク5“異常検知確率”には、アラーム発生前に異常を検知する確率が入力され、この値に従って、次の2つのタスクへ分岐する。タスク6“モニターによる異常検知”に分岐した場合、通常運転中に種々の表示パラメータを定期的にチェックする検査時間間隔(1時間毎又はシフト毎)が与えられる。タスク15“アラーム発生前異常検知”(Pre-Alarm Detect)へ分岐した場合は、異常検知までの平均時間が与えられる。これまでのネットワークは、全て次のフェイズのタスク23“観察”(Observe)につながる。

一方、タスク3“アラーム”(Alarm)は、上記のネットワークと並行して実行され、異常発生からアラーム点灯までの時間が入力に従い決定される。もし、この時間がアラーム発生前の異常検知までの時間より短い場合には、アラーム発生前の異常検知のフェイズは中断され、タスク23“観察”とタスク4“システムタイマー”(System Timer)が起動される。逆にこの時間が長い場合には、タスク23“観察”がアラーム発生前に起動される。ここで、タスク4“システムタイマー”は、アラーム発生からプラント状態が安全上の制限を超えるまでの時間を与える。この時間は解析条件として入力され、アラーム発生までの時間がこれに加算され、最終的に運転員の操作に要した時間と比較される。以下に本フェイズを構成する各タスクの概略を記す。なお、ダミータスクとは、ネットワークシミュレーションの制御あるいは、統計処理上必要タスクであり、運転員の行動のモデル化に直接は関係しないものである。

(2) 情報の内部処理のフェイズ

本フェイズは、異常検知に続く部分であり、運転員の観察から手順決定までの過程を模擬の対象としている。このフェイズの構成を図3. 4に示す。OPPSでは、図3. 5に示す

Rasmussenの意志決定の梯子モデルを簡略化した図3. 6に示すモデルを採用している。タスク23“観察”では、アラームの診断に必要なデータを収集するのに要する時間分布が与えられる。この時間は、運転手順書で要求している収集すべきデータの個数に比例すると仮定している。データ個数は解析条件として与える。時間分布及びその平均値は、解析条件としてあらかじめ設定しておく必要がある。デフォルト値は、ORNLで行ったタスク分析⁽¹¹⁾、⁽¹²⁾に基づく値が使用されている。このタスクにおける入力としては、収集すべきデータ個数に加えて発生事象に関する情報も必要である。発生アラームが特定のプラント状態を示すのか、あるいはより一般的な状態を示すのかを入力しなければならない。この入力に従って次の分析が選択される。仮に、発生アラームによりプラント状態が同定できる場合には、タスク26“手順の決定”(Formulate Procedure)に向う。一方、プラント状態が同定できない場合には、タスク24“異常の診断”(Identify)に向う。タスク24“Identify”は、プラント状態の徴候で確認・分類わけを行い、さらに異常の本質・重大性を診断するために要する平均時間を与える。ここで、徴候ベースでのプラント診断のみで異常に対処できる場合には、タスク26“手順の決定”に向う。しかし、徴候ベースの診断だけでは、対応手順が決められず異常の原因までさかのぼって原因同定を行う必要がある場合は、タスク25“タスクの決定”(Define Task)に向う。タスク25“タスクの決定”では運転員が収集したデータに基づき異常原因を推定するのに要する時間を与えられる。以上の情報の内部処理フェイズは、タスク26“手順の決定”で完了する。このタスクは、運転手順書を参照するのに要する時間を与える。必要な運転手順書の数は解析対象事象に合わせて入力で与える。本タスクの実行時間としては、一つの運転手順書を参照するのに要する時間に手順書の数を乗じた値で与えられる。以上のようにOPPSモデルでは、情報の内部処理フェイズでのエラーは取り扱っていない。さらに、本フェイズには、図3. 7に示すような運転手順に関するPSFを表現する一連のタスクが含まれる。これらのタスクでは、運転手順書に係わるPSFを表す条件が満足されなければ、遅れ時間が加算される。

(3) 操作フェイズ

本フェイズは、現場の操作(中央制御室から指示)と中央制御室での操作の2つの部分から成る。まず、前述の情報の内部処理フェイズの最終タスク“運転手順策定に要する基本時間”(Procedure Wait Time)の終了時に現場での操作の必要性の有無でどちらかへ分岐する。現場での操作が必要とされる場合のタスクの構成を図3. 8に示す。タスク32“同時操作の可能性”(Concurrent Operation)では、現場での操作が中央制御室における操作と同時に並行して行えるか否かによって、タスク16“中央制御室での操作の開始”(Start Operate)またはタスク34“現場操作員への指示”(Communicate)に分岐する。同時に行える場合は、タスク16へ分岐し、現場での操作を表すタスクは実行されない。これは、中央制御室での操作のほうが時間を要する場合は、間違いとはならないが、逆の場合は、正しくない結果を与える。タスク34では、現場での操作を伝達するのに要する時間を計算し、次に現場操作員が操作現場まで行くのに要する時間を計算するタスク35“現場への移動”(Travel)、機器を操作するのに要する時間を計算するタスク36“現場での操作”(Operate)、さらにその結果を、中央制御室の運転員へ連絡する時間を計算するタスク37“中央制御室への連絡”(Communicate)を経由しタスク16“中央制御室での操作の開始”(Start Operate)に達

する。これらの時間は、運転員の応答時間に加算され、タスクの流れは、操作フェイズの後半に続く。操作フェイズの後半は、中央制御室での操作を模擬しており、その構成を図3.9に示す。現場での操作を必要としない場合、あるいは、現場操作と中央制御室での操作を同時に行える場合は、操作フェイズは後半部のみとまる。この部分のネットワークは、タスク16“中央制御室での操作の開始”より始まる。このタスクは、ダミータスクであり、続くタスク7“操作忘れのエラー”(Error of Omission)タスク8“操作間違いのエラー”(Error of Commission)及びタスク9“正しい操作”(Correct Actions)に分岐する確率を定めている。シミュレータを用いた実験によれば^{(11),(12)}、タスク8“操作間違いのエラー”では、エラー直後のエラーの回復が高い確率で期待できることからタスク8“操作間違いのエラー”の次にタスク12“エラーの回復1”(Recovery)を設ける。タスク9“正しい操作”では、全ての操作を遂行するのに必要な時間を与える。この時間はORNLでのタスク分析等を基に定めた値である。この後半のフェイズは、操作すべきスイッチ等の数(入力値)と、“正しい操作”、“操作忘れのエラー”及び“操作間違いのエラー”の数の和を比較し、両者が等しくなるまで繰り返し計算を行い、一連の運転員の操作の遂行をシミュレートする。この繰り返しの制御を行っているのが、タスク17“操作回数”(Number of Switch)である。しかし、このフェイズではリカバリーされない過程が運転員操作に含まれている可能性があり、次のフェイズに引き継がれる。

(4) 過誤修復のフェイズ

本フェイズは、操作フェイズで発見されなかった過誤を検出し、修正するフェイズであり、その構成を図3.10に示す。種々の機器の応答の遅れ(入力値)を集積するタスク18“システム応答の待ち時間”(Process Wait Time)より始まる。もし、操作フェイズで過誤がなければ、統計的処理タスク22を経てシミュレーションは終了する。一方、過誤が存在する場合には、タスク19“エラーの診断”(Error Diagnosis)に向い、過誤の検出が確率的に行われる。このタスクで発見された過誤は、続くタスク20“エラーの回復操作”(Operate)とタスク21“回復操作の検証”(Verify)で修正される。このエラーの修正作業では、新たな過誤の発生はないものとしている。こうして、シミュレーションは終了する。

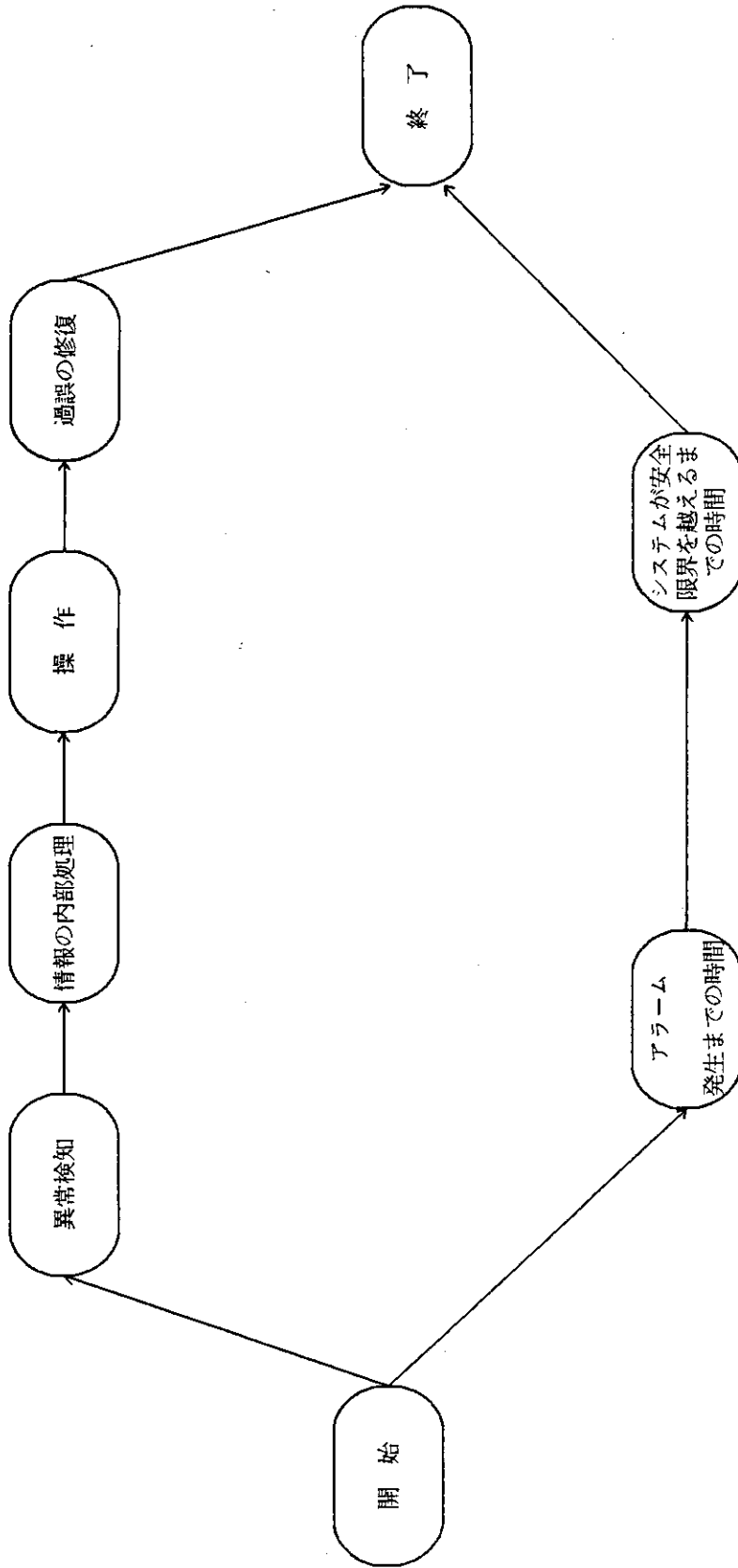


図3.1 OPPSモデルの全体構造(概略)(参考文献(3))

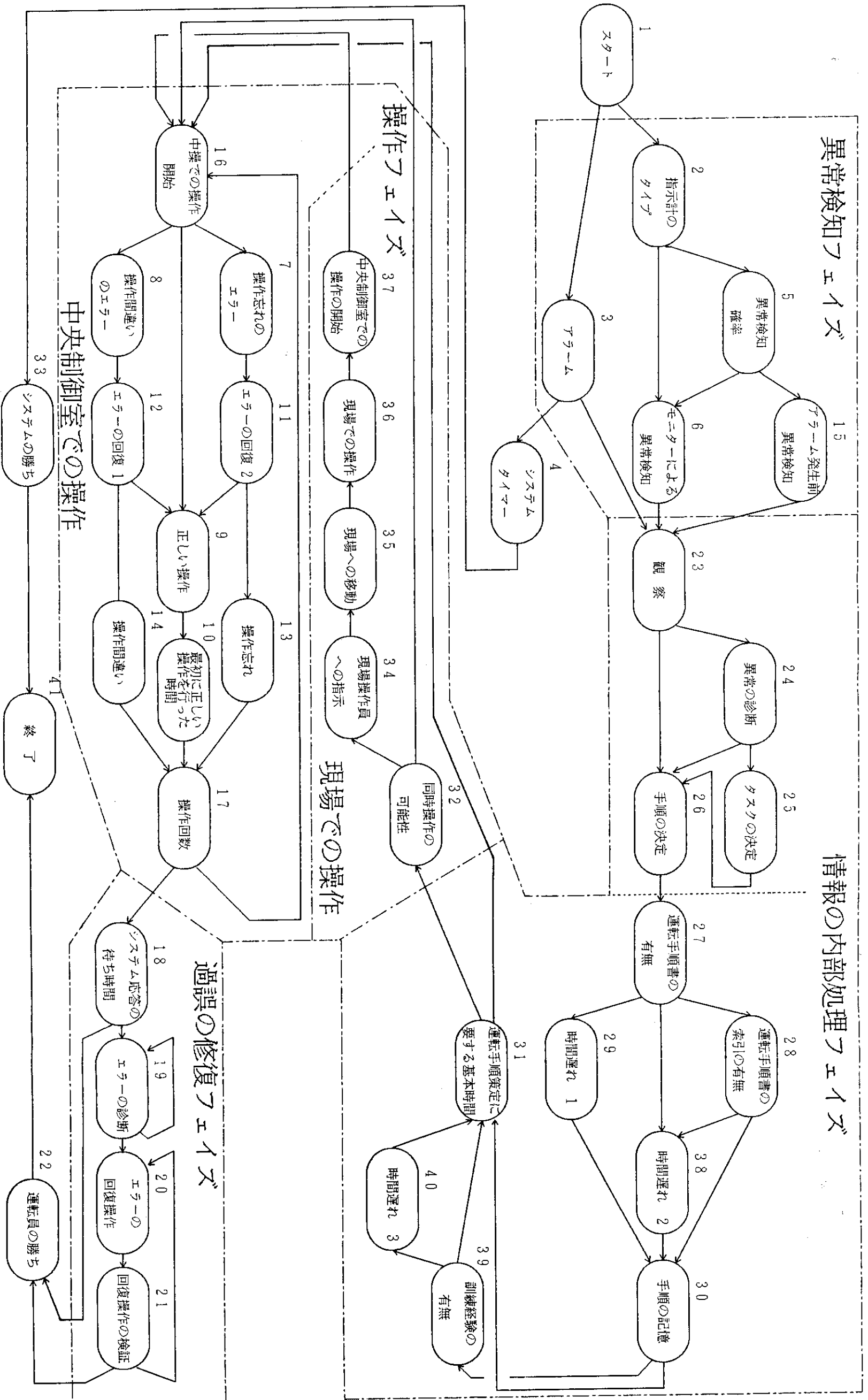
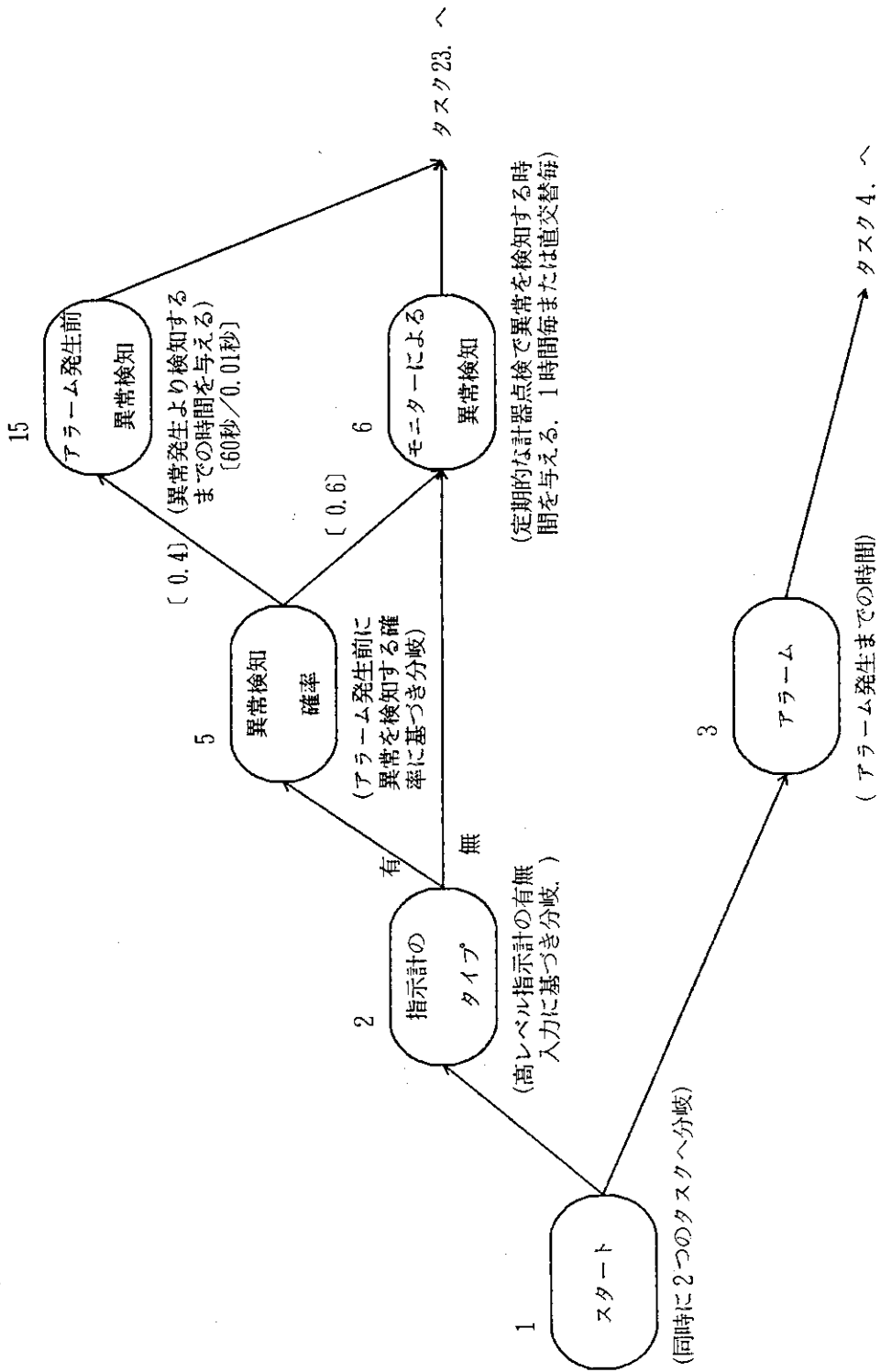
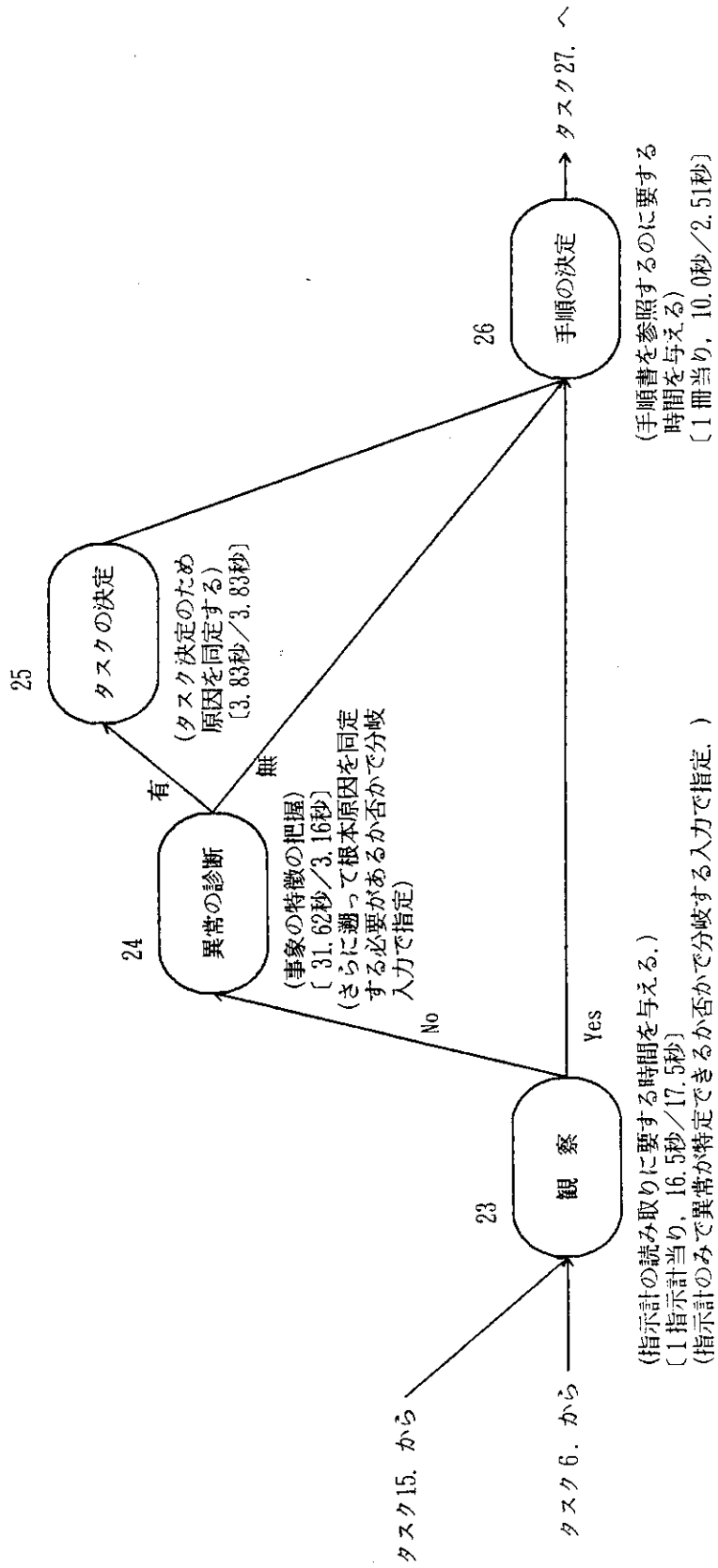


図3.2 OPPSモデルの全体構造(詳細)(参考文献(3))



注) []内は分岐確率またはタスク実行時間分布のディフォルト値を表し〔平均値/標準偏差〕である。

図3.3 異常検知フェイズのネットワーク構造(参考文献(3))



注) [] 内はタスク実行時間分布のデフォルト値を表し,
〔平均値/標準偏差〕である。～当りとある場合は入力された指示計の数, 手順書の数が乗じられる。

図3.4 情報の内部処理フェイズのネットワーク構造(参考文献(3))

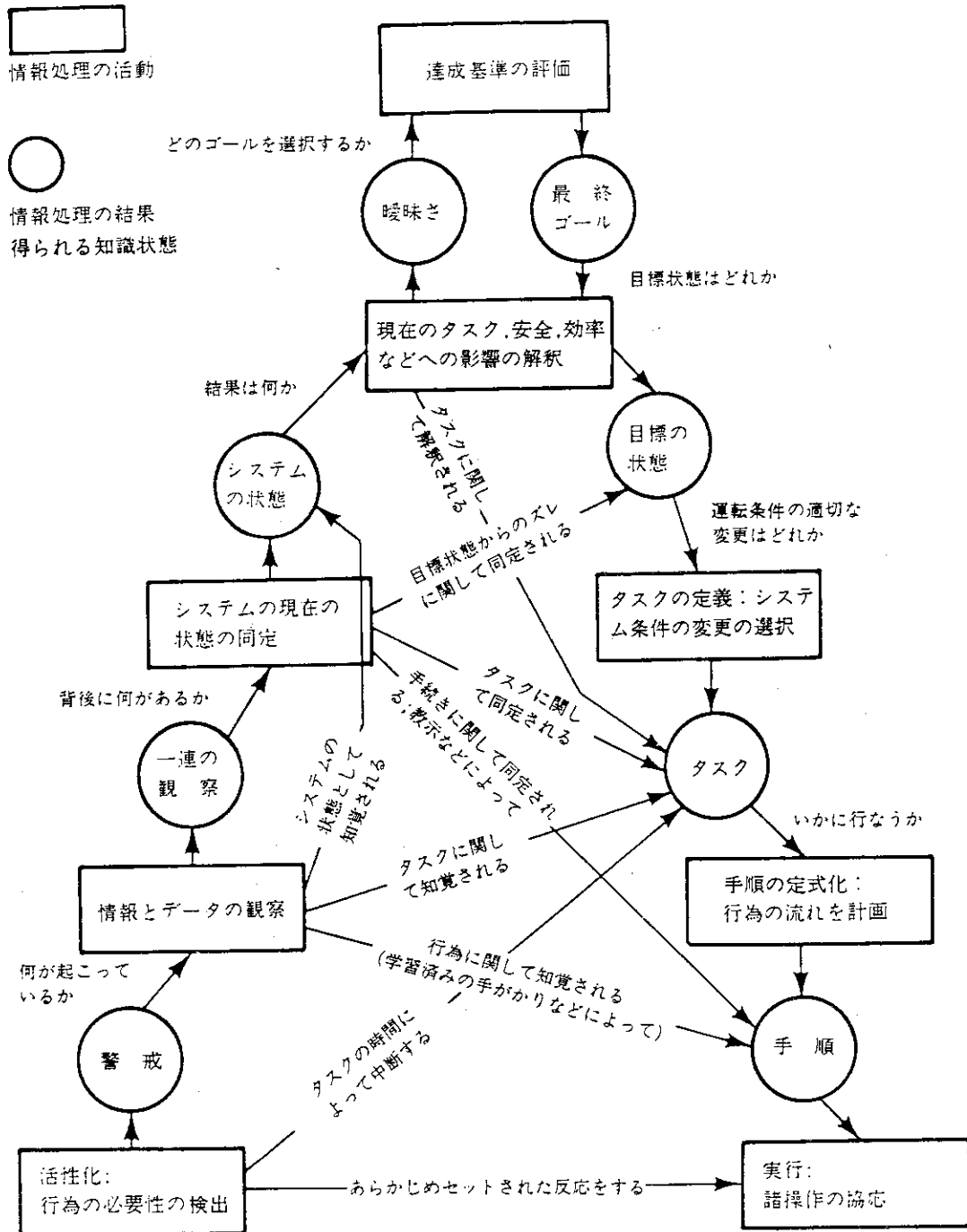


図3.5 Russumsenの意志決定モデル(参考文献(10))

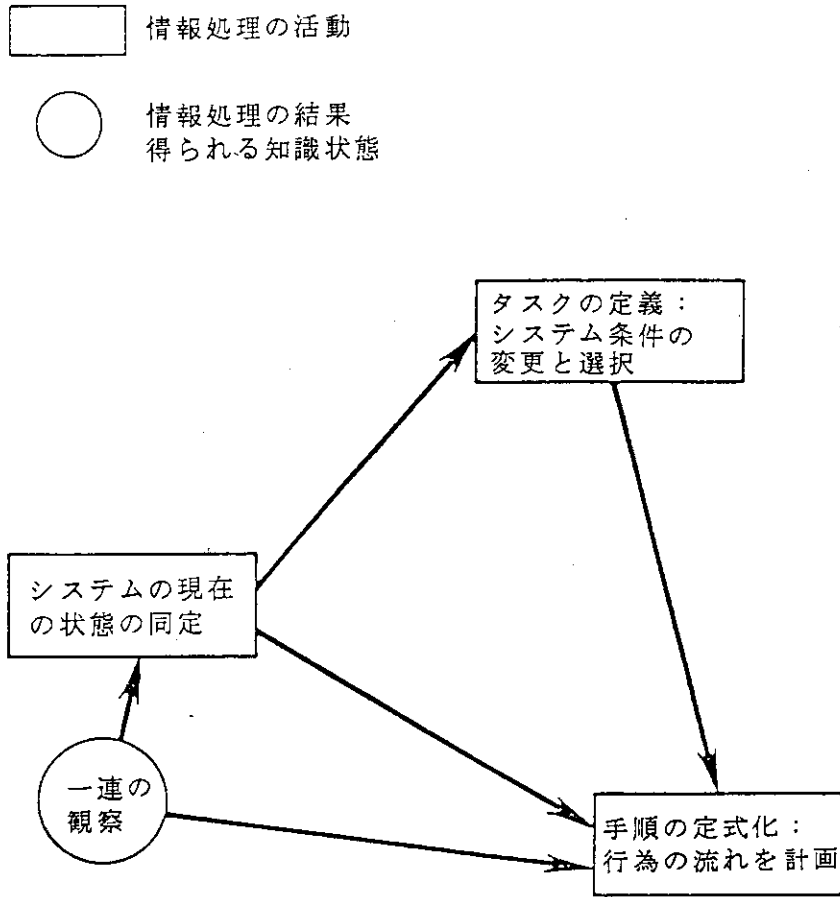
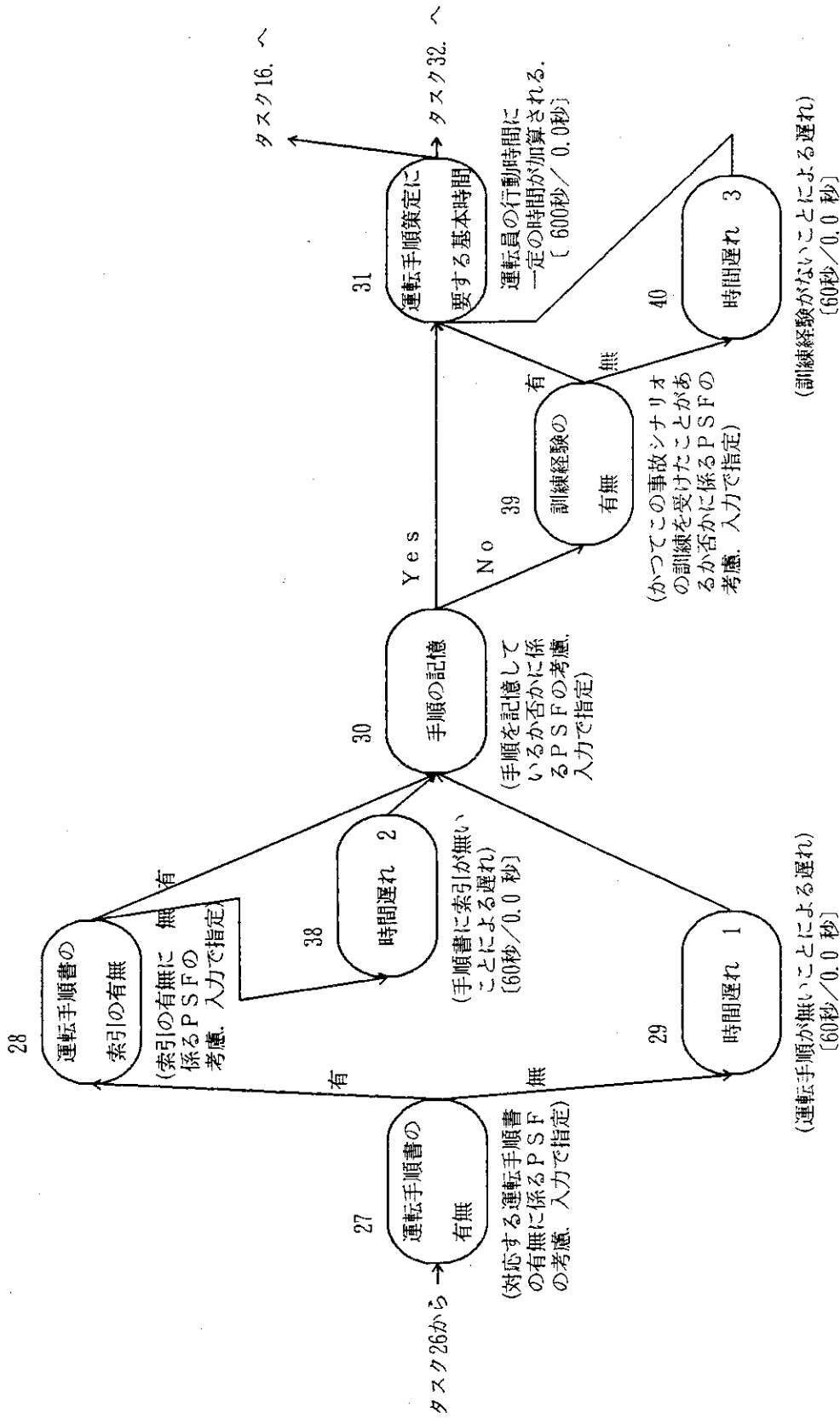
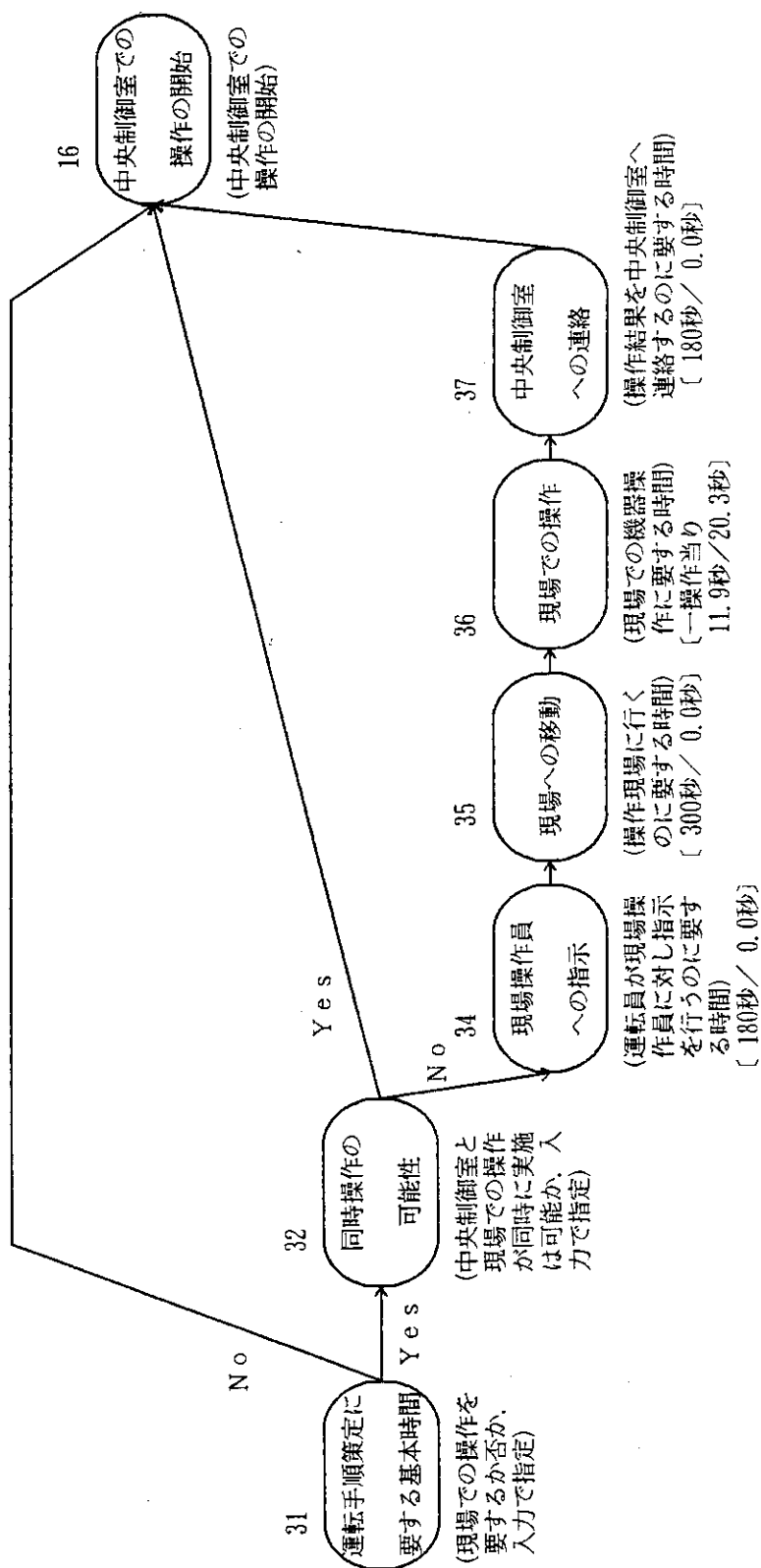


図3.6 OPSSでの意志決定簡略モデル(参考文献(3))



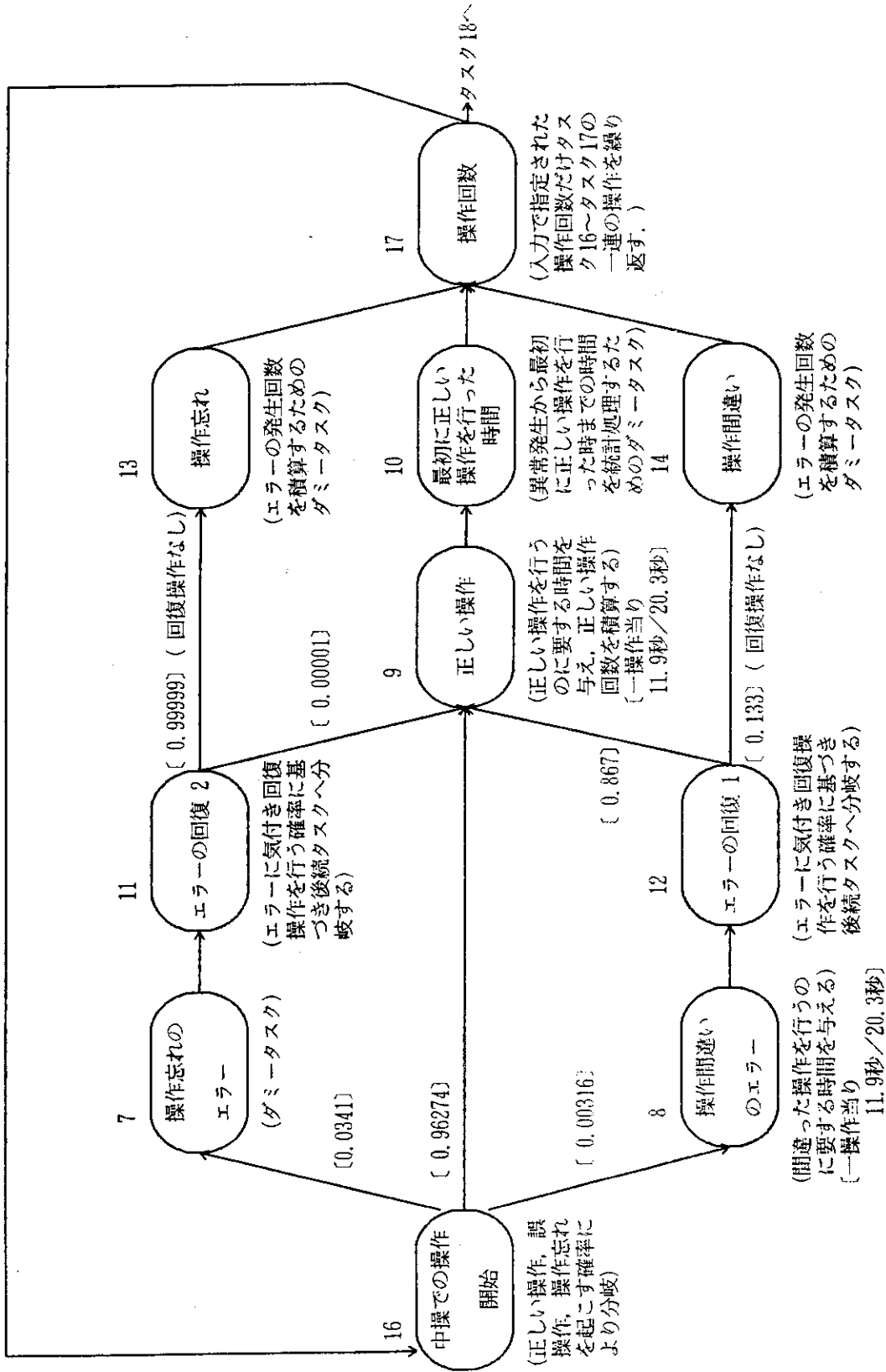
注) []内はタスク実行時間の平均値および標準偏差のデフォルト値を表す。

図3.7 運転手順決定に係わるPSFを考慮するためのネットワーク(参考文献(3))



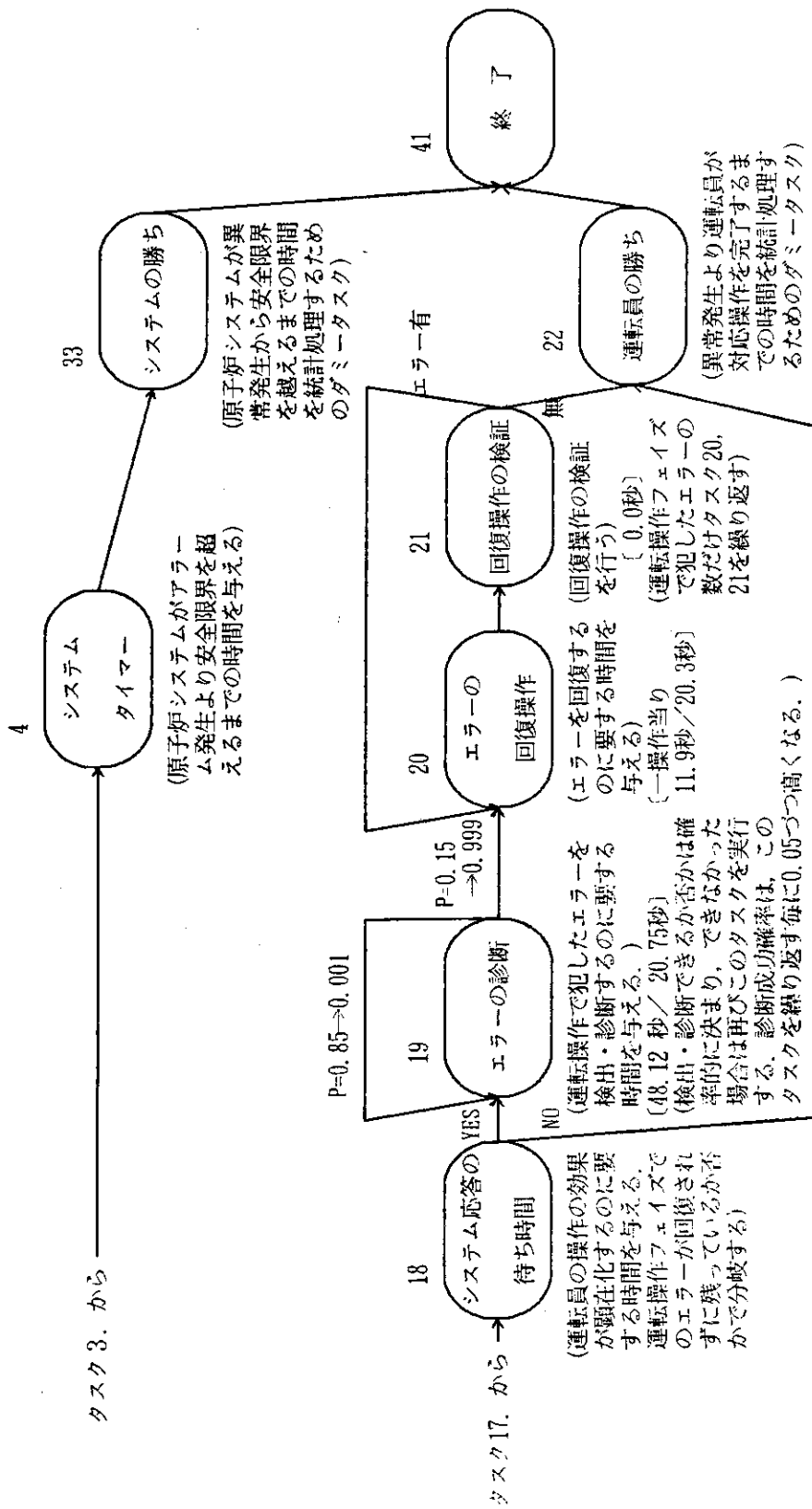
注) [] 内はタスク実行時間の平均値および標準偏差
のデフォルト値を表す。

図3.8 操作フェイズのうちの現場での操作を表わすネットワーク構造(参考文献(3))



注) []内は分岐確率またはタスク実行時間の平均値および標準偏差のデフォルト値を表す。

図3.9 操作フェイズのうちの中央制御室での操作を表わすネットワーク構造(参考文献(3))



注) []内はタスク実行時間の平均および標準偏差、または分岐確率のデフォルト値を表す

図3.10 過誤修復フェイズのネットワーク構造(参考文献(3))

4. Micro-SAINT 版 OPPS モデルの作成

Micro-SAINT を用いて OPPS モデルを作成するにあたっては、まず、NUREG/CR-3515⁽³⁾ (以下 ORNL レポートと呼ぶ) の Section A. 4 記載 (本編、付録 A に転載) の SAINT の入力データおよび SAINT のマニュアル⁽⁷⁾ を基に、OPPS モデルを詳細に解明した。次に Micro-SAINT の機能を用いてそれらを表現する方法を検討し、Micro-SAINT 上に OPPS モデルを構築した。以下に、Micro-SAINT 版の OPPS モデル作成上、特に検討を要した課題について述べる。

4. 1 タスク実行時間の取扱い

SAINT 版 OPPS モデルでは、タスク実行時間として正規分布で与えられる時間に最大値と最小値を設けたり、この時間をさらに定数倍した値が用いられている。Micro-SAINT では、これを通常のタスク実行時間の定義のし方では再現できない。そこで、Micro-SAINT で提供される変数定義機能および組み関数である正規分布関数 (normal) を利用し、さらに、if ステートメントによる最大値、最小値との比較、および定数との乗算を実行する処理を C 言語を用いて、タスク実行時間の平均値として関数定義する。さらに標準偏差をゼロとすることにより、その都度計算される実行時間の平均値そのものが、正規分布を持つようにできる。

Micro-SAINT 版 OPPS モデルの作成にあたっては、タスク 25 (Define Task)、26 (Formulate Procedure)、36 (Aux. Operate)、8 (Error of Commission)、9 (Correct Actions)、20 (Recovery Actions)、19 (Error Diagnosis)、23 (Observe) および 24 (Identify) の各タスク実行時間がこのような方法を用いて定義した。

4. 2 後続タスクへの分岐方法

SAINT 版 OPPS モデルでは、後続タスクへの分岐条件や分岐確率を定数によって明示的に指定している部分はわずかであり、ほとんどの部分で変数あるいは関数を用いて分岐を表している。

このような分岐は、Micro-SAINT で提供される変数定義機能および後続タスクへの分岐機能を利用して表現した。たとえば次ページに示したタスク 2 からタスク 5 あるいはタスク 6 への分岐は、高レベル指示計の有無に基づく分岐であるが、これを表現するため変数 $ai01$ を定義し、その値をタスク 1 の Ending Effect で設定し、タスク 2 では後続タスクの分岐法として Tactical (2.2 節の 1) の a) を参照) を用い、 $ia01 \leq 0$ ならタスク 5 へ、 $ia01 > 0$ ならタスク 6 へ分岐するような分岐条件を用いている。このように、分岐の条件を表現するのに用いられる変数の値は、タスクネットワークの中で分岐が現れる場所よりも前にあるタスク (大部分は分岐直前のタスク) の Beginning Effect (B.E.) あるいは Ending Effect (E.E.) で設定される。

Micro-SAINT 版OPPSモデルでは、このような変数を用いた分岐法が次に挙げるタスク間で使われている。

- タスク2→タスク5、6 (変数ia01を使用、タスク1のE.E.で設定)
- タスク23→タスク24、26 (変数ia02を使用、タスク23のE.E.で設定)
- タスク24→タスク25、26 (変数ia03を使用、タスク24のE.E.で設定)
- タスク27→タスク28、29 (変数ia04を使用、タスク27のE.E.で設定)
- タスク28→タスク30、38 (変数ia05を使用、タスク28のE.E.で設定)
- タスク30→タスク31、39 (変数ia06を使用、タスク30のE.E.で設定)
- タスク39→タスク31、40 (変数ia07を使用、タスク39のE.E.で設定)
- タスク31→タスク16、32 (変数ia08を使用、タスク31のE.E.で設定)
- タスク32→タスク16、34 (変数ia09を使用、タスク32のE.E.で設定)
- タスク17→タスク16、18 (変数sa06、sa09を使用、いずれもタスク17のB.E.で設定)
- タスク18→タスク19、22 (変数sa07を使用、タスク18のB.E.で設定)
- タスク19→タスク19、20 (変数sa01、sa02を使用、いずれもシミュレーションシナリオとタスク19のB.E.で設定)
- タスク21→タスク20、22 (変数sa07、sa08を使用、sa07はタスク18のB.E.、sa08はタスク21のB.E.で設定)

4. 3 統計量の算出

SAINT版OPPSモデルでは、運転員の安全関連行動のシミュレーションにおいて、ORNレポートの付録AセクションA.7に示されているような、以下の項目の統計処理(平均値、標準偏差、最大値、最小値等の算出)を行っている。

タスクネットワーク完了時間

運転員の安全関連行動が成功した回数

(原子炉システムが安全限界を越える以前に運転員が回復操作を完了するケース)

運転員の安全関連行動が失敗した回数

(運転員が回復操作を完了する以前に原子炉システムが安全限界を越えてしまうケース)

運転員が犯したオMISSIONエラーの回数

運転員が犯したCOMMISSIONエラーの回数

運転員が最初に正しい安全関連行動を取った時間

これらの統計量は、Micro-SAINTで提供される変数の定義・利用の機能、タスクのRelease Condition(R.C.)、if文による大小比較、実行時のSnapshot生成機能等を利用して計算される。なお、計算に使用する変数の値の設定、大小比較など、タスクネットワーク中での統計処理は、適切な位置にあるタスクのBeginning Effect(B.E.)あるいはEnding Effect(E.E.)として定義

する。以下に各統計量の計算方法の詳細を記す。

(1) タスクネットワーク完了時間の統計処理

- ・ “運転員の勝ち” タスク (タスク22) の E.E.として、

```
end22 = 1 ;
opwintime = clock ;
```

ここでend22 は運転員行動パスの終了を表す指標であり、“終了”タスク (タスク41) の R.C. で用いる。end22=1 は終了を表す。opwintime は運転員行動終了時間を表し、シミュレーション時間; clock と等しく設定することで、運転員行動時間が記録される。

- ・ “システムの勝ち” タスク (タスク33) の E.E. として、

```
end33 = 1 ;
syswintime = clock ;
```

ここでend33 は、システム応答パスの終了を表す指標であり、“終了”タスク (タスク41) の R.C. で用いる。end33=1 は終了を表す。syswintime はシステム応答パスの終了時間を表し、シミュレーション時間; clock と等しく設定することで、システム応答時間 (アラーム発生より完全限界を越えるまでの時間) が記録される。

- ・ “終了”タスク (タスク41) において、

```
R.C. として、 end22 & end33 ;
E.E. として、 if opwintime <= syswintime
                then clock = opwintime
                else clock = syswintime ;
```

end22 & end33 は、運転員行動パスおよびシステム応答パスの両方が終了することがこのタスクの開始条件となる。opwintime と syswintime のうち大きい方を、シミュレーション時間; clock へ代入する。

統計処理結果は、結果の分析モードのExecution Time Data で表示できる。

(2) 運転員の安全関連行動の成功/失敗回数の統計処理

- ・ “終了”タスク (タスク41) の B.E. として、


```

if opwintime<=syswintime
  then opwin=opwin+1
  else syswin=syswin+1 ;

```

“運転員の勝ち”タスク（タスク22）および“システムの勝ち”タスク（タスク33）でそれぞれ設定された opwintime および syswintime の大小を比較し、前者が小さければ運転員の勝ち、後者が小さければシステムの勝ちとして、それぞれの勝ち数に1を加える。

統計処理結果は、“終了”タスクの終了時に Snapshot Data として、ファイルに保存される。opwin 変数および syswin 変数の Snapshot Data ファイルはそれぞれ “opwin” ファイル、“syswin” ファイルである。

（3）運転員のオMISSIONエラー/COMMISSIONエラー回数の統計処理

- ・ “操作忘れ” タスク（タスク13）の E.E. として、

```
ommit=ommit+1 ;
```

- ・ “操作間違い” タスク（タスク14）の E.E. として、

```
commit=commit+1 ;
```

一回のシミュレーション実行における操作忘れおよび操作間違いの回数を積算するための変数 ommit および commit に、それぞれのエラーが発生した場合に1を加算する。

結果は、“システムの待ち時間”タスク（タスク18）開始時に Snapshot Data として、ファイルに保存される。ommit 変数および commit 変数の Snapshot Data ファイルはそれぞれ “ommit” ファイル、“commit” ファイルである。

（4）運転員が行った正しい操作と最初にそれを行った時間の統計処理

- ・ “正しい操作” タスク（タスク9）の B.E. として、

```
icorrect=icorrect+1 ;
```

一回のシミュレーション実行における正しい操作の回数を積算するための変数 icorrect に正しい操作を行った場合に1を加える。

- ・ “最初に正しい操作を行った時間” タスク (タスク10) の B.E. として、

```
if icorrect==1
  then firstrt=clock;
```

icorrect=1 の時、すなわち最初の正しい操作を行った時の時刻を firstrtとして記録する。

結果は、“システム応答の待ち時間”タスク (タスク18) 開始時に Snapshot Data として保存される。firstrt 変数の Snapshot Dataファイルは “firstrt” ファイルである。

4. 4 アラーム発生に関する考察

SAINT版OPPSモデルでは、シミュレーションの実行パスが運転員行動を表すパスとプラントシステムの応答を表すパスの2つに分れている。そして、後者のパスの最初のタスクである“アラーム”タスク (タスク3) を前者のパスの最初のタスクである“指示計のタイプ”タスク (タスク2) よりも先に実行するようになっており (付録Aのカード12300、12500で指定)、さらに、後者のパスの“アラーム”タスクが終了した時点で、もし前者のパスの“指示計のタイプ”タスク (タスク2)、“異常検知確率”タスク (タスク5)、“モニターによる異常検知”タスク (タスク6) あるいは“アラーム発生前異常検知”タスク (タスク15) のいずれかが実行されていた場合、そのタスクを中止し、前者のパスを“観察”タスク (タスク23) へ進めるようになっている (付録Aのカード 12600で指定)。これは、運転員がアラーム発生前に異常事象を検出しようとする行動をとっている際中に、もしアラームが発生した場合には運転員のそのような行動は意味がなくなり、運転員は認知プロセスを開始するからである。

Micro-SAINT 版OPPSモデルでは、運転員がアラーム発生前に異常を検知できなかった場合を次のように取り扱っている。

- ・ “アラーム”タスク (タスク3) において、

```
E.E. として、 alarmtime=clock;
```

- ・ “観察”タスク (タスク23) の B.E. として、

```
if alarmtime<=clock
  then clock=alarmtime;
```

これは、運転員行動パスが“観察”タスクへ至った時点ですでにアラームが発生し

ていた場合、シミュレーションの時刻をアラームが発生した時刻にセットし直す。

4. 5 ORNLレポートの記述に見られる矛盾点とその対処

ORNLレポートの付録Aの記述には明らかに幾つかの矛盾点が見られる。Micro-SAINT 版OPPSモデルの作成では、これらの矛盾する記述の中でどの部分を無視するか、あるいは合理的であるとして認めるかを次のように判断した。

(1) 変数sa08の扱い

付録Aに示したSAINTの入力データでは、

```
19800  ATA,21,STA,SA,,8,UF,7*
```

となっており、これは次の記述

```
03000  700  CALL GETSA (7, VALUE)
03100      USERF=VALUE+1
```

とあいまって次のことを意味する。すなわちタスク21の開始時(...,21,STA,...)、システム変数8 (... ,SA,,8,...) をユーザー定義関数7 (... ,UF,7*) で計算した値に置き換える (ATA,...)。ユーザー定義関数7では、システム変数7の値を求め (CALL GETSA (7,VALUE)) それに1を加えた値 (USERF=VALUE+1) を返す。これは、“回復操作の検証” タスク (タスク21) のB.E.として、

```
sa08=sa07+1;
```

とすることに等しい。しかし、sa08は、“回復操作の検証” (タスク21) から“運転員の勝ち” (タスク22) あるいは“エラーの回復操作” タスク (タスク20) への分岐条件として、制御室運転員による操作行動で生じたオMISSIONエラー回数(sa05)とコミッションエラー回数 (sa04) の和であるsa07と大小関係が比較されていることから、タスク20、21のシーケンスの実行回数を求めるカウンターのはずである。従って、

```
03000  700  CALL GETSA (8, VALUE)
```

と考え、Micro-SAINT版OPPSモデルでは、タスク21のB.E.として、

```
sa08=sa08+1;
```

とする。

(2) タスク21からタスク20、22への分岐条件

SAINTの入力データでは、

```
19700 CFI,21,22,AGA,7,8,SA,,20*
```

となっており、これはタスク21からタスク20へは $sa08 \leq sa07$ の条件で、タスク21からタスク22へは $sa08 > sa07$ の条件で分岐することを表している。しかし、この条件判定はタスク20が実行された後に行っているため、1回余分にタスク20、21のシーケンスが実行されることになる。従って、Micro-SAINT 版OPPSモデルでは、この条件分岐をそれぞれ、

```
sa08 <= sa07 - 1
```

```
sa08 > sa07 - 1
```

とする。

5 Micro-SAINT 版OPPSモデルの性能評価

参考文献⁽³⁾（以下ORN Lレポートと呼ぶ）の付録AセクションA.7（本編の付録C.3）には、沸騰水型原子炉（BWR）プラントにおける逃し安全弁（参考文献（3）では主蒸気逃し弁；Main Steam Relief Valve となっているが、以下 Safety Relief Valve；SRVと略す）誤開の故障シナリオを模擬するためのSAINTコードのシナリオデータが示されている。このデータを基としてMicro-SAINT 版OPPSモデルの性能評価を行った。

OPPSモデルは、解析しようとする事故・故障シナリオによってタスクネットワークの構造を変える必要がない。すなわち、ネットワーク内のいくつかの分岐条件およびタスク実行時間等を変更すればよいように作られている。変更すべき事項については、付録C.1のような質問状が用意されており、これに基づき、SAINTの入力データのどの部分をどの様に変更すればよいかのインストラクションが付録C.2である。この質問状に含まれる情報を以下、シナリオデータと呼ぶことにする。このシナリオデータの記述にも矛盾点が見られた。本章では、それらの対処について説明したあと、性能評価の結果について述べる。

5.1 逃し安全弁誤開シナリオの概略

(1) 異常発生直前の状態

プラントは、定格の90%出力で運転されており、運転員が、定期的なチェックで、システム全体が正常に作動していることを丁度確認したところである。すなわち、両再循環ポンプ、復水ポンプ、復水ブースタポンプが運転中であり、非常炉心冷却系(ECCS：Emergency Core Cooling System)および原子炉隔離時冷却系(RCIC：Reactor Core Isolation Cooling)が待機状態にある。

(2) 異常発生直後

SRV1基が、明白な理由もなく開設定圧以下で開く。運転員は、これに気づき、スイッチ操作で誤開したSRVを閉じることに成功するが、再び誤開する。

(3) 途中経過

運転員が故障に気づき、残留熱除去系(RHR：Residual Heat Removal)で圧力抑制プールを冷却し、SRVからの蒸気の漏洩で出た熱を取り除く。5分後に再び、SRVが開き、閉じようと試みるが失敗する。故障したバルブを閉止できないことが明らかになった時点で、原子炉および主タービンを手動でトリップする。原子炉停止に続き、RHRの残りの系統も圧力抑制プールの冷却にあてる。復水系を用いて、原子炉水位の維持を図る。

(4) 最終状態

原子炉は、開固着した弁からの蒸気漏洩で減圧し続ける。原子炉水位は安定している。2基の復水ポンプおよび復水ブースタポンプは停止され、両給水ポンプは、隔離される。プラントは温態停止で安定状態にある。

(5) 関連主要システム

異常に関連したシステムは、① 主蒸気系、② 復水給水系、③ 残留熱除去系とサービス水、④ 停止時ガス処理系および ⑤ 原子炉隔離時冷却系である

5. 2 逃し安全弁誤開シナリオデータの矛盾点とその対処

1) 運転員による異常事象の診断と運転手順書

質問6.および12.への回答および質問への回答に基づきSAINTコード入力データを変更するための手引き、さらにはSAINTコード入力データの間には整合性がとれていない。即ち、質問6.および12.の回答(付録C. 2参照)では、異常事象を診断するために手順書で指定されている確認すべき指示計の数は6個、および異常事象に対処するため必要な運転手順書の数は3冊とそれぞれ指定されている。これらの数(6と3)はそれぞれ、“観察”タスク(タスク23)と“手順の決定”タスク(タスク26)の各タスク実行時間に乗ぜられるべきである。しかし、付録C. 2に示した指示計の数および手順書の数に基づくSAINTコード入力データの指定は、前述した考察と矛盾したものとなっている。すなわち、指示計の数については、それをタスク23の属性値としているが、この属性値はSAINTコードの中で使用されていない。また、手順書の数は、タスク26ではなくタスク23の実行時間の乗数としており、タスク26の実行時間の乗数はデフォルトのままになっている。このようなことから、論理的には、前述の考察が正しいものとして、タスク23およびタスク26の実行時間を評価するものとする。

5. 3 逃し安全弁誤開シナリオを用いたテストラン

SRV誤開シナリオに基づくタスクネットワークを用いたMicro-SAINT版OPPSモデルのテストランの結果を図5.1および表5.1に示す。これらの結果は1000回のシミュレーション実行で得られた各データを統計処理したものである。また、表5.1はタスクネットワーク完了時間、運転員が正しい安全関連行動を最初にとった時間、運転員が安全関連行動に成功あるいは失敗した回数、および運転員が犯したコミッションエラーとオMISSIONエラーの各回数について、その平均値、標準偏差および最大値と最小値を示している。同表でカッコ内の値はSAINT版OPPSモデルの解析結果(ORNLレポートのp.90)である。

図5.1および表5.1の結果では、Micro-SAINT版OPPSモデルによるタスクネットワーク完了時間、および運転員が正しい安全関連行動を最初にとった時間がSAINT版OPPSモデルと比べて長くなっている。また、Micro-SAINT版OPPSモデルでは、運転員の安全関連行動の成功回数が減るとともに、オMISSIONエラー回数とコミッションエラー回数が共に増えている。これらの相違について、第一に考えられることは、4.6節および5.2節での指摘からも考えられるように、ORNLレポートに示されるSAINT版OPPSモデルへの入力データと同解析結果が1対1に対応しているかどうかが疑わしいことである。例えば、O

RNLレポートのp.90では、運転員が正しい安全関連行動を最初にとった時間の最小値が630.4秒と記述されているが、これはSAINT版OPPSモデルの入力データから判断する限り、あり得ないことである。何故なら、付録C. 3の質問4.への解答と、付録C. 2のSAINTコード入力データの変更手引から“モニターによる異常検知”タスク(タスク6)のタスク実行時間が3600秒の一定値であること、および付録C. 3の質問2.への回答から“アラーム”タスク(タスク3)のタスク実行時間(異常発生からアラーム発生までの時間)が37.7秒であること、を考え合わせると運転員はアラーム発生後に異常事象の発生に気付くことになる。さらに、付録C. 3に示した質問13.への回答では、“運転手順策定に要する基本時間”タスク(タスク31)のタスク実行時間が600秒であると示されていることから、制御室運転員が運転操作を開始する前に、少なくともタスク3の実行時間(37.7秒)とタスク31の実行時間(600秒)を加えた時間の637.7秒が経過していると考えられるからである。運転員が正しい安全関連行動を最初にとった時間に関するこの矛盾はORN Lレポートに明示的に示されていたために容易に見出すことができたが、同レポートに同様の不整合が存在するであろうことは、4.5節および5.2節で指摘した点から考えても否定できない。

図5.2はタスクネットワーク完了時間の累積確率を対数正規目盛を用いて表したグラフであるが、図中、破線で示したSAINT版OPPSモデルの実行結果とほぼ同じ傾向を示している。両者の定量的差異は、前述のORN Lレポートの記述とサンプル入力との間に見られる不整合等によって生じたものと判断できる。

次に、Micro-SAINT版OPPSの解析結果について検討を加える。

SRV誤開シナリオでは、OPPSモデルタスクネットワークの運転員行動パスはアラーム発生後、“観察”タスク(タスク23)、“手順の決定”タスク(タスク26)、ダミーのタスク27→28→30を経て、“運転手順策定に要する基本時間”タスク(タスク31)、制御室運転員によるスイッチ操作を構成するタスク群(タスク16とタスク17との間のループ)、“システム応答の待ち時間”タスク(タスク18)、制御室運転員によるスイッチ操作エラーの診断・検出タスク(タスク19の自己ループ)、および制御室運転員による診断・検出後のエラー修復のためのタスク(タスク20、21のループ)を通ることになる。これらのタスクのうち、タスク27、28、30はダミータスクであり、また、タスク31とタスク18のタスク実行時間は一定値になっている。これ以外のタスク(あるいはタスク群)のタスク実行時間は確率分布(正規分布)で与えられているが、これらの時間を統計処理したものが表5.2である。表5.2の平均値の欄に示される時間の和に、アラーム発生までの時間(37.7秒)、タスク31の実行時間(600秒)およびタスク18の実行時間(300秒)を加えた値(1742秒)は表5.1に示されるタスクネットワーク完了時間の平均値(1744秒)にほぼ等しい。

次に操作忘れあるいは操作間違いのエラー発生について検討する。この2つのエラーのシミュレーション1回当たり(SRV誤開シナリオでは、1回のシミュレーションで26回の操作を行うことになっている)の期待値は、それぞれ0.8866回($=0.0341 \times 0.99999 \times 26$)、0.0109回($=0.00316 \times 0.133 \times 26$)である。ところが1000回のシミュレーションでの統計値は、表5.1に示したように、操作忘れエラーは1.017回、操作間違いエラーは0.016回で、理論値との間の誤差は大きい。特に理論的に発生回数の少ない操作間違いエラーでの誤差が大きい。この点に

ついて、検討した結果は5.4節の2)で詳述する。またORNLレポートの結果との差も大きく、この原因として、分岐確率が本解析と異なっていたことが十分に考えられる。

次にエラーの発生がタスクネットワーク完了時間に与える影響について検討する。図5.1には、操作忘れあるいは操作間違いのエラーが1回でも発生したシミュレーションのタスクネットワーク完了時間の度数分布を斜線で示した。エラーが発生したシミュレーションは1000回実行中、604回であり、そのタスクネットワーク完了時間の平均は1813秒である。これに対して、エラー発生のない場合の平均値1644秒であり、その差は、エラーの診断・検知および修復に時間を要したことにより生じたと考えられる。以上2つの検討より、ORNLレポート記載の解析結果と本解析結果のタスクネットワーク完了時間の差異の一因として、エラー発生回数が、本解析のほうが多く、このためエラーの修復に時間を要し、本解析の実行時間の平均値が、NUREGレポートのそれに比べ大きくなったと考えられる。

5.4 Micro-SAINT の基本性能およびOPPSモデルのネットワーク表現の検討

Micro-SAINT を用いて、タスクネットワーク解析を行う場合に必要となる基本的な機能およびOPPSモデルで用いられているネットワーク表現で問題と考えられる点について検討した。その結果について以下に述べる。

(1) Micro-SAINT におけるタスク実行時間分布の理論分布への収束性

タスク実行時間が正規分布を成す操作のモンテカルロシミュレーションを行い、計算された実行時間分布の理論分布への収束性に関して乱数シード、シミュレーション実行回数をパラメータとして検討した。検討には、タスク実行時間が、平均値；30.0秒、標準偏差；5.0秒の正規分布を成すタスクを用いた。乱数シードとしては、1および15,000、シミュレーション実行回数としては、1,000回、5,000回 および 10,000回（一部30,000回実行のケース有り）をパラメータ値として選んだ。また乱数の質を検査するため、1個目～10,000個目の乱数を用いず、10,001個目からの乱数を用いたケースも含め、合計13ケース実施した。その結果を表5.3および図5.3～図5.7に示す。表5.3には、各シミュレーションにおいて計算されたタスク実行時間の平均および標準偏差を示す。さらに計算された実行時間分布が、正規分布を成しているか否かを定量的に評価できるコルモゴロフ・スミルノフ検定 (Kolmogorov-Smirnov Test) を行い、その結果も併せて示した。ここで1個目～10,000個目の乱数を乱数グループA、10,001個目～20,000個目の乱数を乱数グループBと呼ぶ。

乱数シードおよび利用乱数グループが同じケースでは、シミュレーション実行回数が多いほど計算されたタスク実行時間の平均値は、理論値へ良く収束している（最大誤差；0.07%）。これに対して、標準偏差の理論値（5.0秒）への収束性については、シミュレーション実行回数が増えるとともに向上するといった傾向はなく、理論値との誤差も、平均値のそれに較べ、最大2.5%と大きい。また、いずれのケースも理論値より計算値のほうが小さく、系統的な誤差を含んでいると考えられる。

次に実行時間分布の正規分布への収束性について検討する。コルモゴロフ・スミルノフ検定は、測定値の分布が理論上の分布にどの程度あてはまっているか（適合度）を定量的に検定す

る統計処理手法の一種である。適合度を表す尺度としては、データの分布と理論分布との偏差のうち最大の値を用いる。この最大偏差が小さければ小さいほど理論分布に適合しているといえる。このことより、次のことが言える。

- a) シミュレーション実行回数が多いほど適合度は高くなる。
- b) 乱数シードとして、15,000を用いた場合より1を用いた場合のほうが正規分布への適合度が高い。この傾向は、シミュレーション実行回数が少ないほど顕著となる。したがって、実行回数を多くできない場合は、シミュレーション結果の乱数シードへの依存性を検討する必要がある。
- c) 乱数として、乱数グループAを用いた場合より、乱数グループBを用いた場合のほうが正規分布への適合度は高い。この傾向は、シミュレーション実行回数が少ないほど顕著となるが、逆に実行回数が5,000回以上であれば、乱数の質は、解析結果にほとんど影響しないと考えられる。

コルモゴロフ・スミルノフ検定を用いた有意差の検定結果として、1%および5%有意水準の基準値(critical value)を表5.3に示す。最大偏差がこれらの値より大きければ、理論分布との間に1%あるいは5%の水準で有意な差があると言える。今回実行した13ケースはいずれも、1%の水準で有意な差はないと言う検定結果である。

図5.3にはコルモゴロフ・スミルノフ検定において正規分布への適合度が一番低かった乱数シード15,000、乱数グループAを用いたケースの累積確率分布を示す。横軸は、累積正規確率目盛、縦軸はタスク実行時間である。分布が正規分布であれば、グラフ上で直線となる。図中、実線で示したのが、平均30秒、標準偏差5秒の正規分布の理論値であり、これに近ければ近いほど正規分布に近いと言える。いずれのケースもほぼ直線上に、位置し、正規分布を成していると言えるが、直線の傾きが理論値に較べ僅かに緩やかである。これは標準偏差が理論値より小さいことを意味し、表5.3に示した結果と一致している。

図4.4~図4.7には乱数シード、乱数グループが同じであるケースをまとめてシミュレーション実行回数をパラメータとして、各ケースのタスク実行時間の度数分布を示す。乱数シードとして1を用いた場合のほうが見かけ上、きれいな正規分布を成していると言える。乱数シードが同じであれば乱数グループが異なってもほぼ相似の分布を成していることより、乱数の質には問題がないと考えられる。

(2) 複数タスクへの分岐割合の確率値への収束性

まず、1つのタスクから3つのタスクに確率的に分岐する単純なネットワークモデルを作成し、シミュレーション実行回数と各タスクへの分岐割合の確率値への収束性および乱数シードが収束性に及ぼす影響について検討した。

図5.8に示したタスクネットワークを用い、シミュレーション実行回数および乱数シードが分岐割合に与える影響を検討した。図5.8のネットワークでは、タスク“Prob.”より等

しい確率で、タスク“Task1”～タスク“Task3”のいずれかへ分岐する。“Task1”～“Task3”では、それぞれのタスクへの分岐回数を積算し、タスク“REC.”において、各タスクへの分岐割合が計算、記録される。このプロセスを10,000回繰り返し実行することにより、シミュレーション実行回数に対する分岐割合の収束性を調べることができる。その結果を図5.9および図5.10に示す。図5.11に示した結果は、乱数シード=1のケースである。図より、実行回数が約4,000回未満では、収束性が悪い。これに対し、乱数シード=15,000を用いた場合の結果が図5.10である。このケースでは、前者にくらべ、実行回数の1,000～2,000回で比較的早く収束しているが、4,000回以降の理論値への収束性は、前者に較べ良くない。

以上より、Micro-SAINTの確率的分岐割合の収束性は、乱数シードに依存し、シミュレーション実行回数も約4,000回未満では、収束性が悪いと言える。したがって、それが、解析結果に大きく影響を及ぼすようなタスクネットワークを用いた解析では、シミュレーション実行回数および乱数シードに関して感度解析を行い、収束性の確認を行う必要がある。

次に、分岐割合の理論値への収束性における分岐確率値の大きさとシミュレーション実行回数との関係について検討した。検討に際しては、後続の2つのタスクへ確率的に分岐する単純なネットワークモデルを用い、一方のタスクへの分岐確率を0.1, 0.01, 0.001, 0.0001の4通りに変化させ、100,000回のシミュレーションを行った。その結果を図5.11に示す。横軸は、シミュレーション実行回数、縦軸は、それまでに実行したシミュレーションでの分岐割合の平均値を理論値で除した値である。図より個々の分岐確率が0.1, 0.01, 0.001の場合、シミュレーション実行回数がそれぞれ、1,000回、10,000回、10,000回以上であれば、ほぼ理論値に収束しているのがわかる。これより、確率的分岐を含むネットワーク解析では、分岐発生回数の期待値が100回程度以上になるようにシミュレーション回数を設定すればよいことが分かる。なお、この検討では、乱数シードとして1を用いたが、15,000の乱数シードを用いたケースでは、ほぼ同様の結果を得たが、前述の乱数シードが収束性に及ぼす影響を考慮すれば、期待値が400回程度になるようなシミュレーション回数が適当と考えられる。

次に5.3節で述べたMicro-SAINT版OPPSモデルの解析結果において、計算されたエラーの発生回数と理論値との誤差について検討した。図5.12には、正しい操作、操作忘れエラー、操作間違いエラーの発生回数の理論値への収束性を示した。横軸はシミュレーション実行回数であり、各操作の発生回数は理論値で除した値である。図より、30,000回程度のシミュレーションで各エラーの発生回数は十分に収束していることが分かる。これより、二つのエラー発生回数と理論値の誤差は、シミュレーション実行回数の不足ではないことが判明した。そこで、タスク16“中操での操作開始”における後続タスクへの分岐の指定の順番を表5.6のように変更して、再度100,000回のシミュレーションを実行したところ、正しい操作、二つのエラーの発生回数と理論値との比は、三つのケースで大きく異なる結果となった。このことよりMicro-SAINTの確率的分岐を計算するアルゴリズムに問題があることが判明した。しかし、同プログラムは市販のPCソフトであるため、プログラムの内容を検討することは1ユーザとしては不可能であり、十分な原因説明には至っていない。

(3) OPPSモデルでの繰り返し操作の表現法の問題点

OPPSモデルでは“観察”タスク(タスク23)“手順の決定”タスク(タスク26)および

“現場での操作”タスク（タスク36）において、それぞれ観測すべき計測器数、参照すべき手順書の数および実行すべき操作数に応じて、正規分布等に従い計算されたタスク実行時間を定数倍して、個々のタスクの実行時間としている。このような定型的な一連の作業をタスクネットワークで表現する方法としては、図5.13に示した3通りの方法が考えられる。図中(a)は最も基本的な方法であり、タスクを必要な数だけ直列につなげる（直列型）。(b)はOPPSモデルで用いられている方法で、1つのタスク実行時間を定数倍する（定数倍型）。(c)は、1つのタスクを繰り返す方法（繰り返し型）であり、OPPSモデルの中の制御室での操作を表現するのに用いられている。これらの三方法について、比較検討した。

例題として、(1)で用いたタスク（タスク実行時間平均値；30.0秒、標準偏差；5.0秒）を2回続けて行う場合を想定し、上述の三通りの方法でこれを表現し、乱数シード=15,000を用い、10,000回のモンテカルロシミュレーションを実行した。その結果を表5.5に示す。参考のため、基本操作の諸量も同時に示す。

作業実行時間が正規分布を成すタスクを n 回繰り返す場合、全体のタスク実行時間は平均値が n 倍、標準偏差が $n^{1/2}$ 倍になることが、理論的に説明できる。“直列型”は最もオーソドックスな表現方法であり、平均値、標準偏差とも理論値と一致しているが、操作回数だけタスクをつなげるの必要があり現実的な方法ではない。これに対し“定数倍型”は複数回の操作を1つのタスクで表現しており、簡便ではあるが、計算された標準偏差が正しくなく、OPPSモデルで用いられているこの方法は、複数回の操作の表現法としては、不適切である。“繰り返し型”は簡便でありかつシミュレーション結果も正しいことより、複数回の操作は、この方法で表現すべきである。

表5.1 逃し安全弁誤開シナリオのシミュレーション実行における
主要パラメータの統計量(1)(1,000回実行)

	平均値	標準偏差	最小値	最大値
シミュレーション実行時間	1744. (1475.)	128.2 (134.3)	1492. (1159.)	2018. (2018.)
運転員が正しい安全関連行動を最初にとった時間	796.4 (728.3)	67.19 (48.31)	699.5 (630.4)	1034. (881.9)
運転員の安全関連行動の成功回数 (1,000 回中)	966 (999)	—	—	—
運転員の安全関連行動の失敗回数 (1,000 回中)	34 (1)	—	—	—
運転員が犯した操作間違い回数 (1 ジミュレーション当り)	0.0160 (0.006)	0.1255 (0.07727)	0.0 (0.0)	1.0 (1.0)
運転員が犯した操作忘れエラー回数 (1 ジミュレーション当り)	1.0170 (0.428)	1.1063 (0.6459)	0.0 (0.0)	4.0 (4.0)

単位：秒

表5.2 逃し安全弁誤開シナリオのシミュレーション実行における
主要パラメータの統計量(2)(1,000回実行)

	平均値	標準偏差	最小値	最大値
“観察”タスク (タスク23)の実行時間	109.5	69.7	24.00	349.1
“手順の決定”タスク (タスク26)の実行時間	29.24	6.63	17.58	42.42
中央制御室での一連の スイッチ操作に要する時間	539.7	69.62	378.5	707.9
中央制御室での一連のスイ ッチ操作におけるエラーの 検出・診断に要する時間	181.7	100.7	31.03	506.4
検出・診断後のエラー修復に 要する時間	33.26	19.54	5.97	86.00

単位：秒

表5.3 モンテカルロシミュレーションにおける
Micro - SAINTの正規分布再現性の検討結果

乱数シード	実行回数	平均値	標準偏差	コルモゴロフ・スミルノフ検定			備考
				最大偏差	1%有意水準	5%有意水準	
15,000	1,000	29.789	4.875	0.030	0.052	0.043	
	5,000	29.986	4.911	0.009	0.023	0.019	
	10,000	29.992	4.899	0.007	0.016	0.016	
	30,000	29.999	4.900	0.006	0.009	0.008	
	1,000	30.111	4.921	0.013	0.052	0.043	注1
	5,000	29.985	4.909	0.008	0.023	0.019	
	10,000	29.989	4.897	0.007	0.016	0.014	
1	1,000	29.963	4.890	0.012	0.052	0.043	
	5,000	29.996	4.976	0.007	0.023	0.019	
	10,000	29.997	4.942	0.005	0.016	0.014	
	1,000	30.041	4.946	0.007	0.052	0.043	注1
	5,000	29.995	4.909	0.005	0.023	0.019	
	10,000	30.008	4.941	0.005	0.016	0.014	

注1) 10,001個目からの乱数を使用。

表5.4 OPPSモデルの操作フェイズでの確率的分岐における
後続タスク指定順位の違いによる解析結果の差異

タスク16での 確率的分岐の後続 タスク指定順位	シミュレーション 1回当たりの 分岐回数理論値	100,000回の シミュレーション での計算値	計算値/理論値
操作忘れエラー	0.8866	1.0159	1.1458
操作間違いエラー	0.0109	0.0159	1.4560
正しい操作	25.1025	24.9682	0.9947
正しい操作	25.1025	25.0470	0.9978
操作忘れエラー	0.8866	0.9062	1.0222
操作間違いエラー	0.0109	0.0468	4.2982
操作間違いエラー	0.0109	0.0	0.0
操作忘れエラー	0.8866	1.1317	1.1637
正しい操作	25.1025	24.9683	0.9947

表5.5 繰返し操作のタスク実行時間の比較

	平均値	標準偏差	最小値	最大値	備考
基本操作	29.99	4.899	12.45	47.09	注
直列型	59.98	6.931	31.94	85.84	
定数倍型	59.98	9.798	24.90	94.19	
繰返し型	59.98	6.931	31.94	85.84	

注) 実行回数; 10,000、乱数シード; 15,000

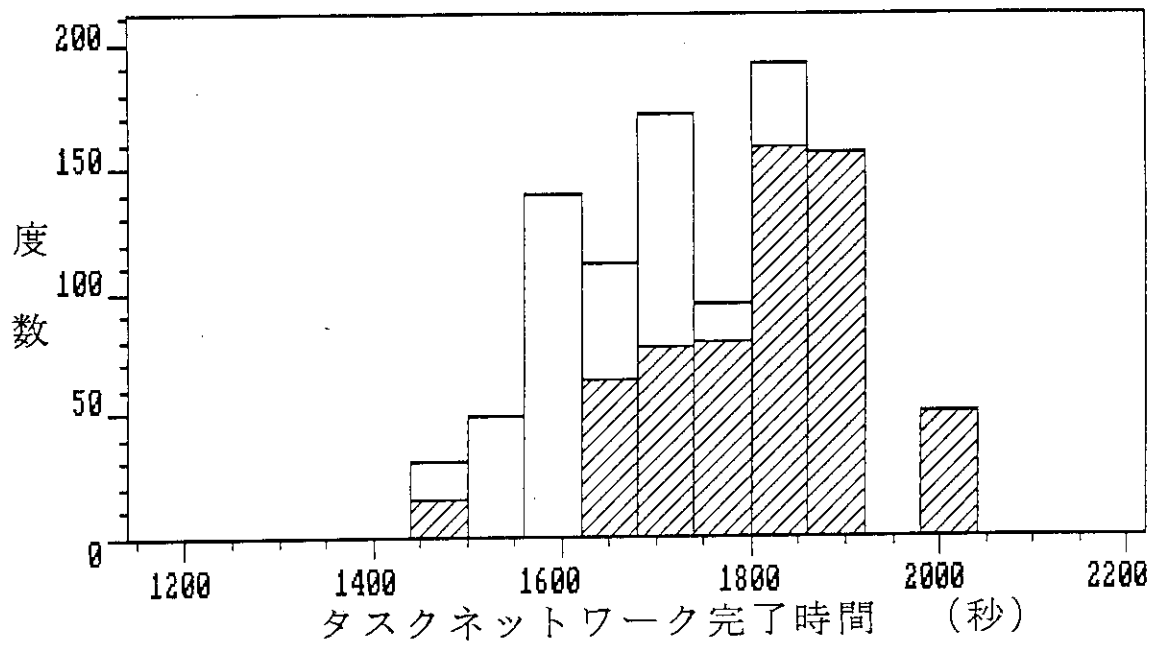


図5.1 逃し安全弁誤開シナリオのタスクネットワーク完了時間度数分析 (1000回の実行)

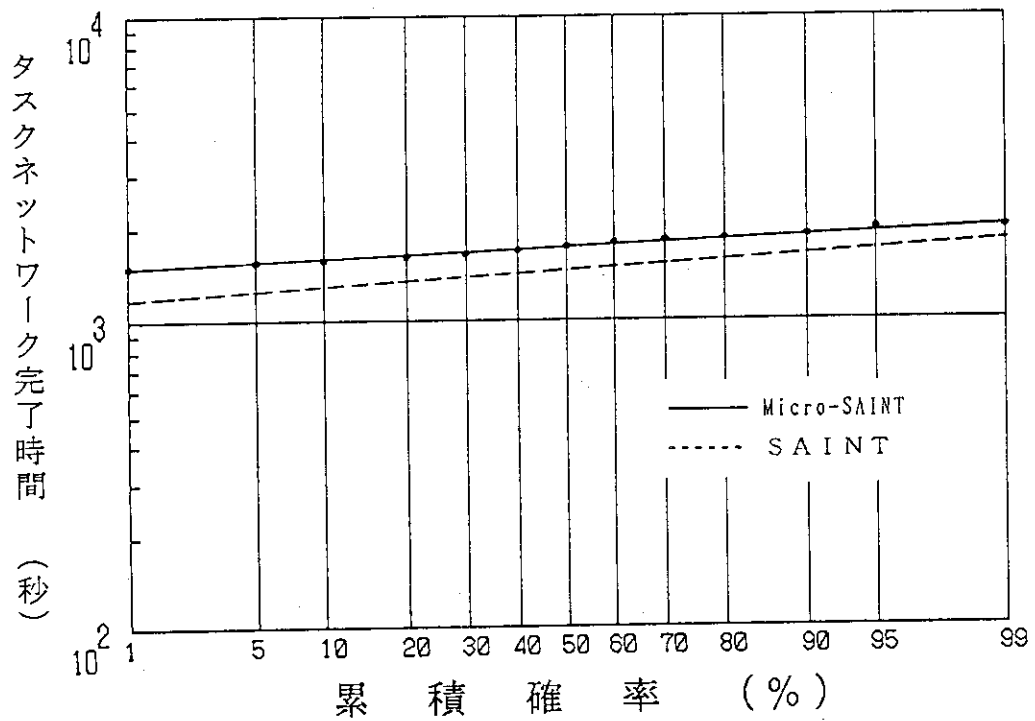


図5.2 逃し安全弁誤開シナリオのタスクネットワーク完了時間の累積確率分布 (1000回実行)

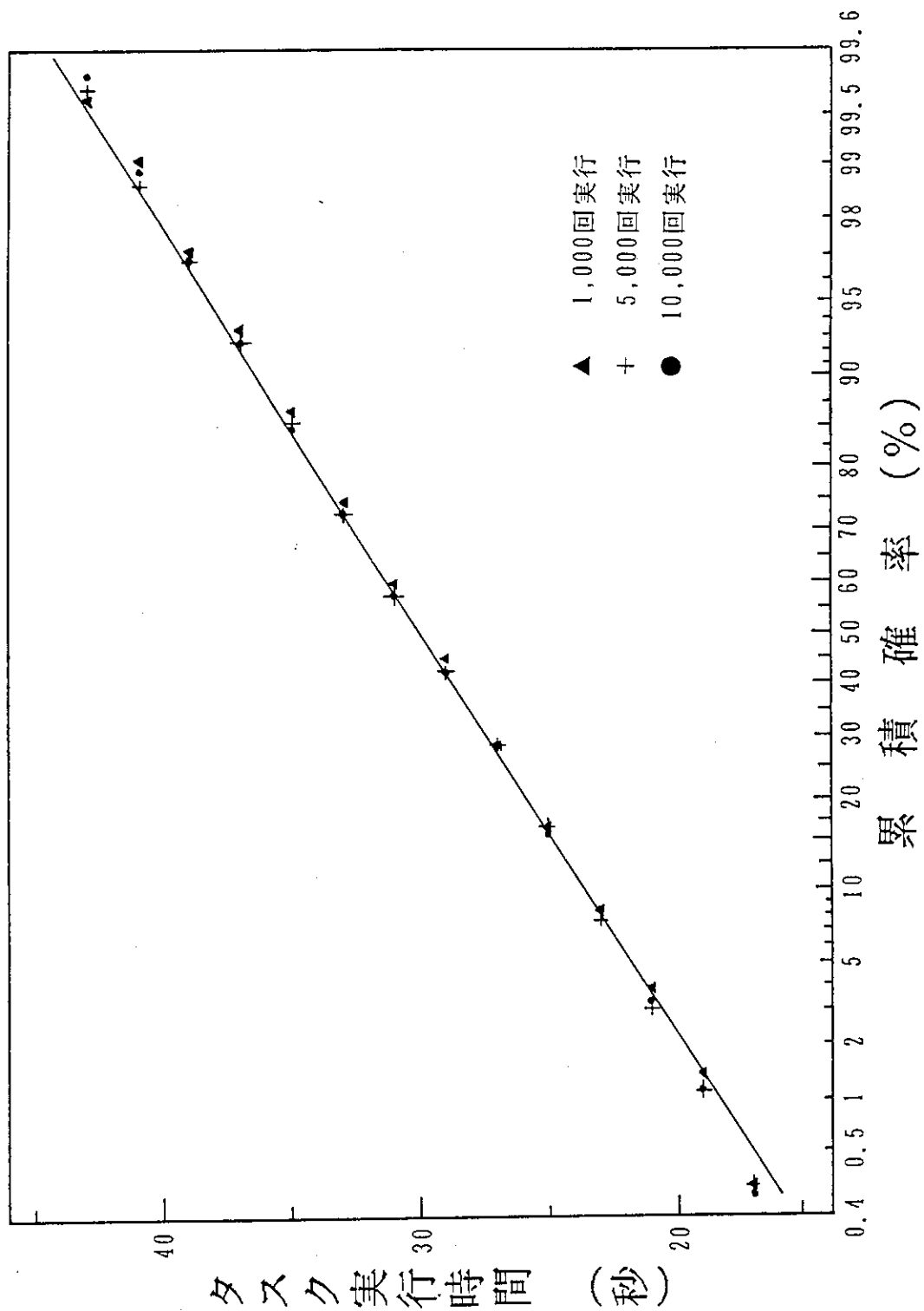


図5.3 タスク実行時間累積確率分布に及ぼす
シミュレーション実行回数(乱数シード; 15,000)

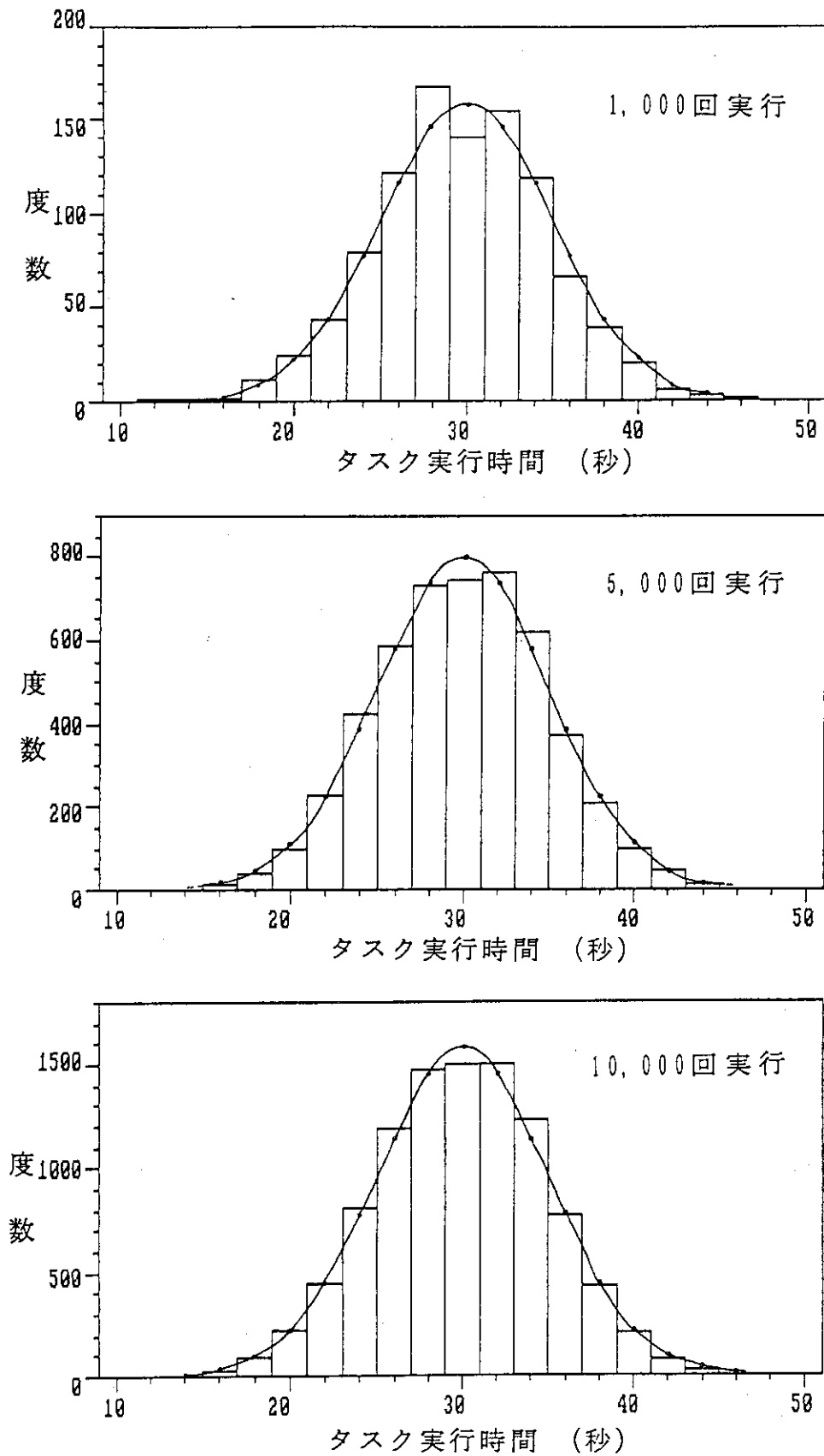


図5.4 タスク実行時間度数分布の比較(その1)
(乱数シード; 15,000, 1~10,000個目の乱数使用)

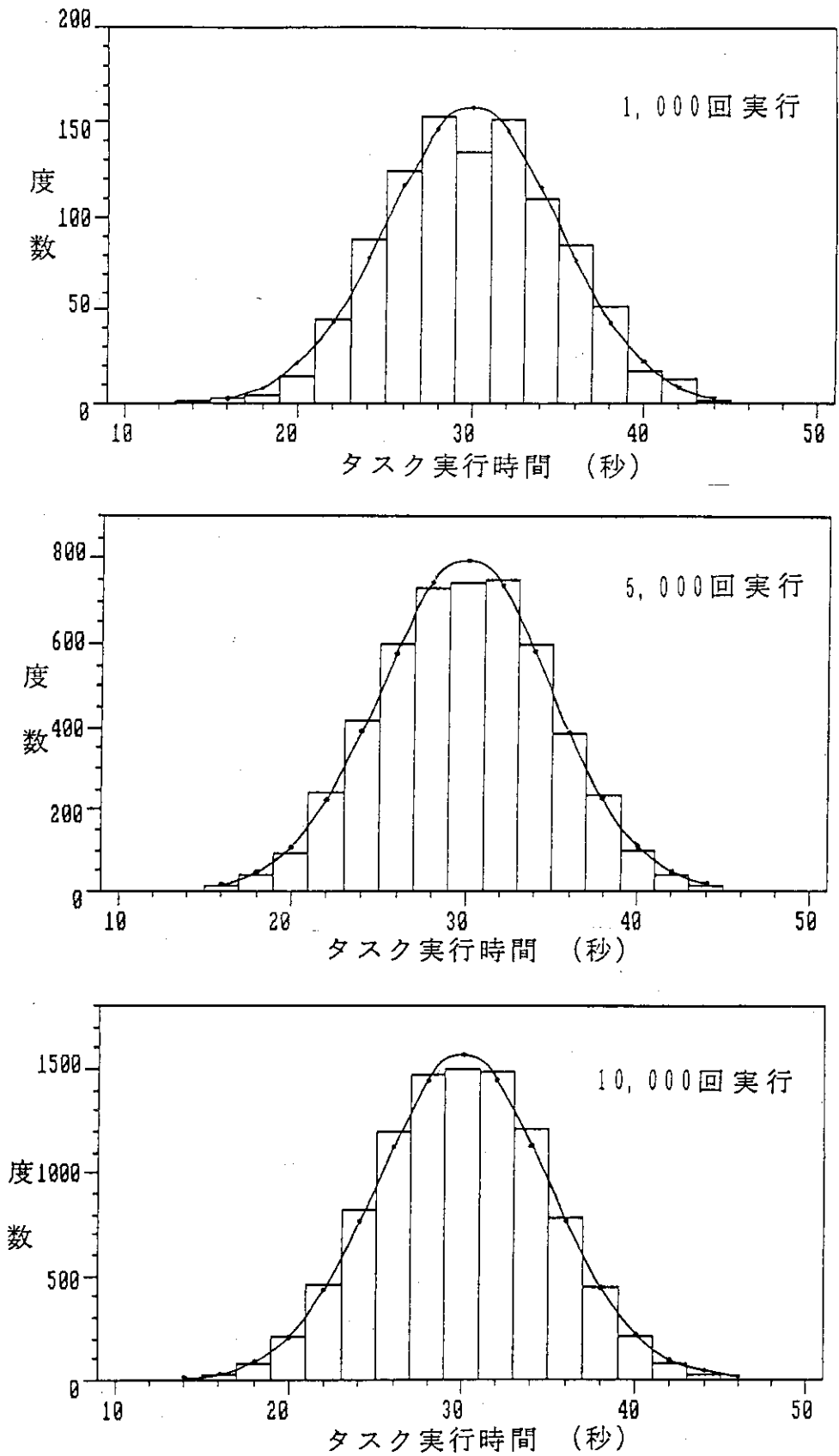


図5.5 タスク実行時間度数分布の比較(その2)
(乱数シード; 15,000, 10,001個目からの乱数使用)

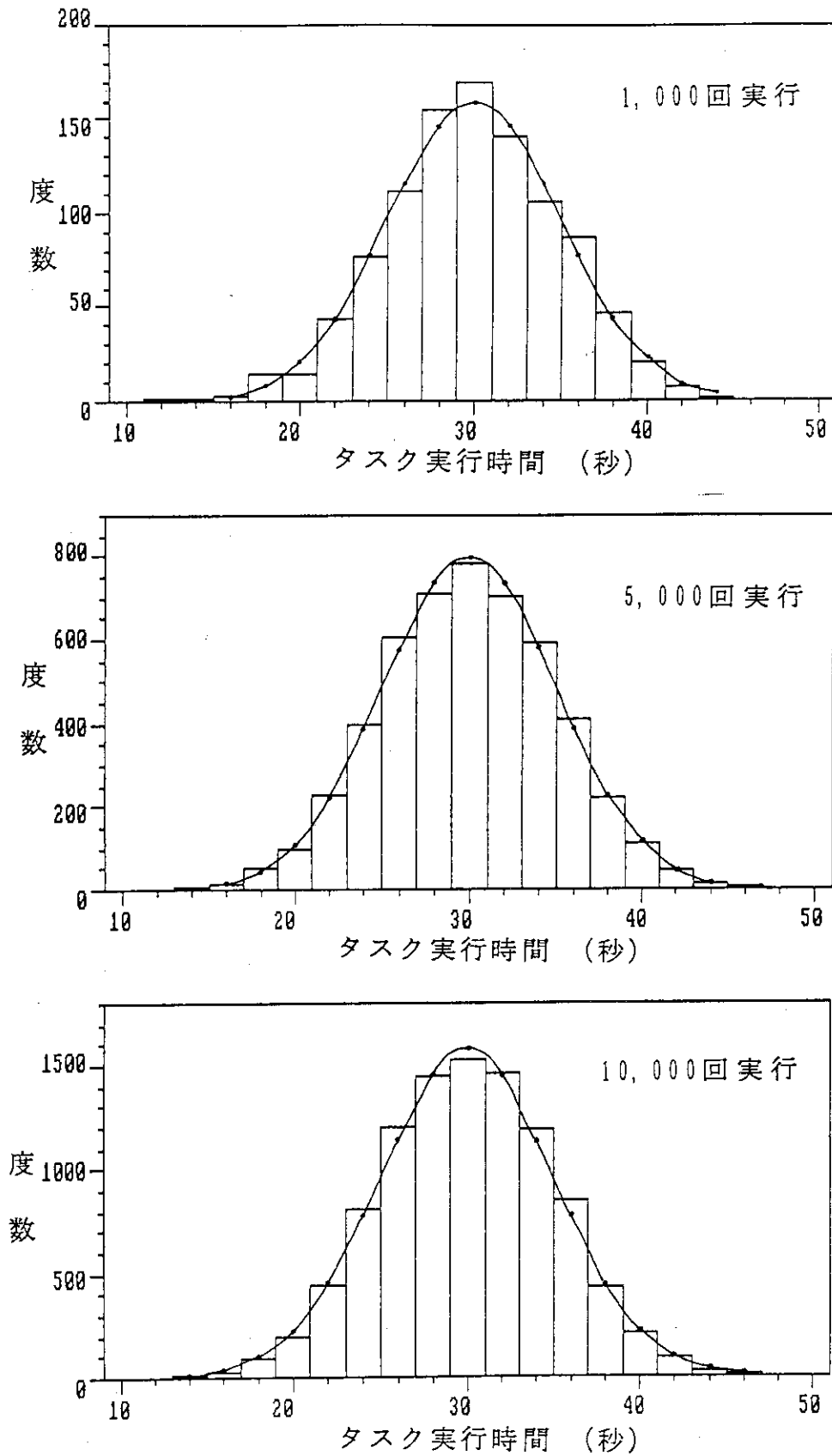


図5.6 タスク実行時間度数分布の比較(その3)
 (乱数シード:1, 1~10,000個目の乱数使用)

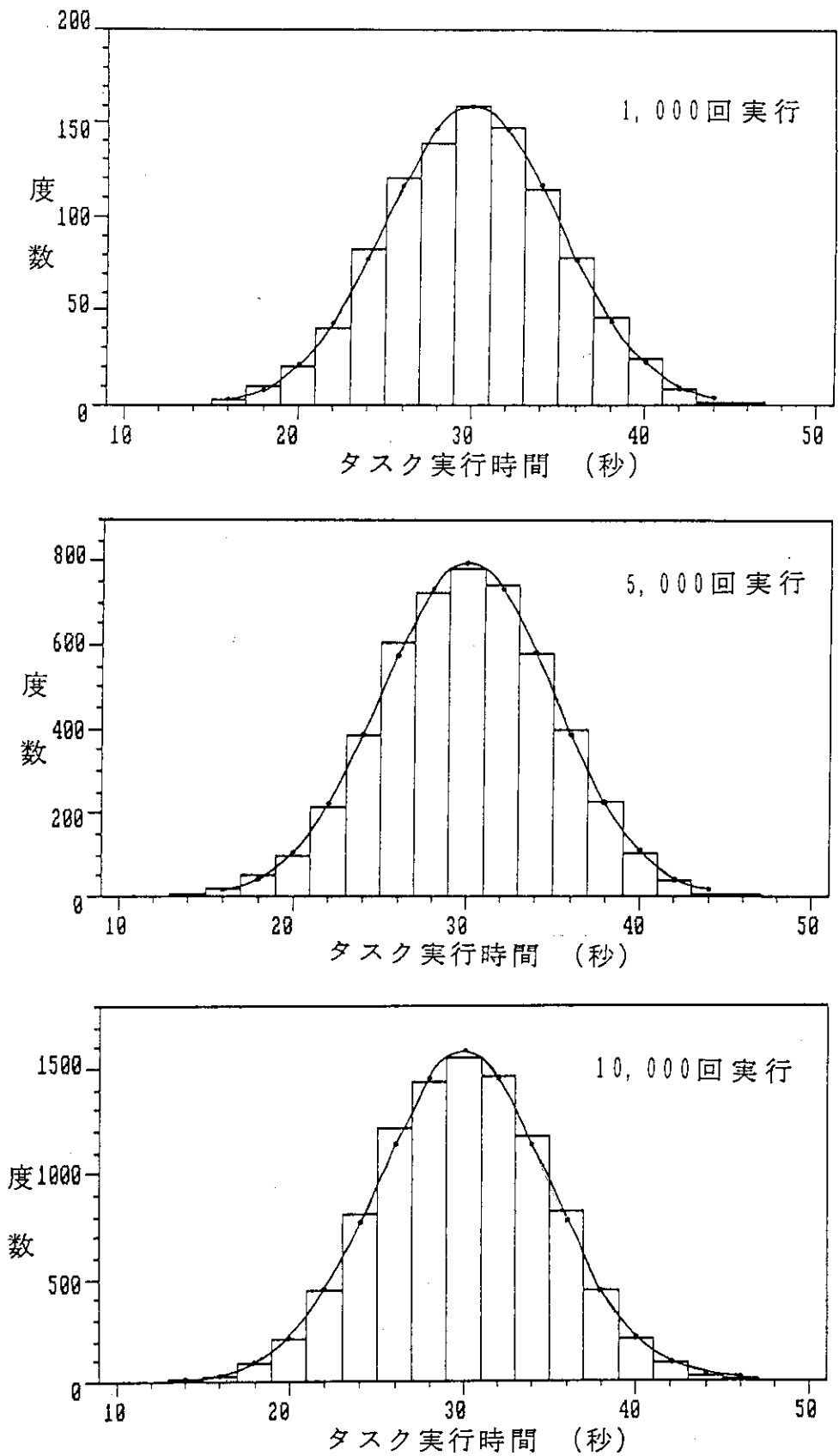


図5.7 タスク実行時間度数分布の比較(その4)
(乱数シード;1, 100,001個目からの乱数使用)

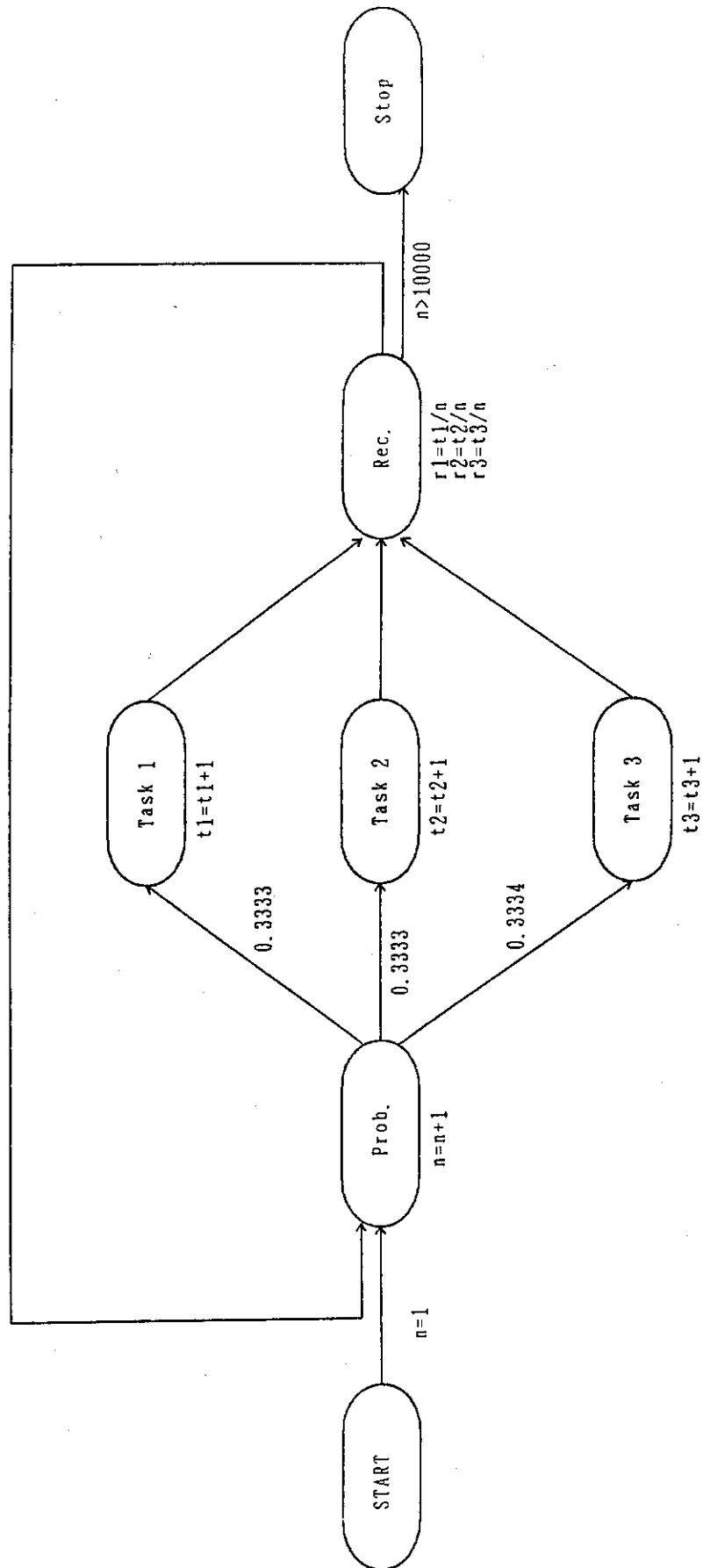


図5.8 確率分岐を表わすタスクネットワーク

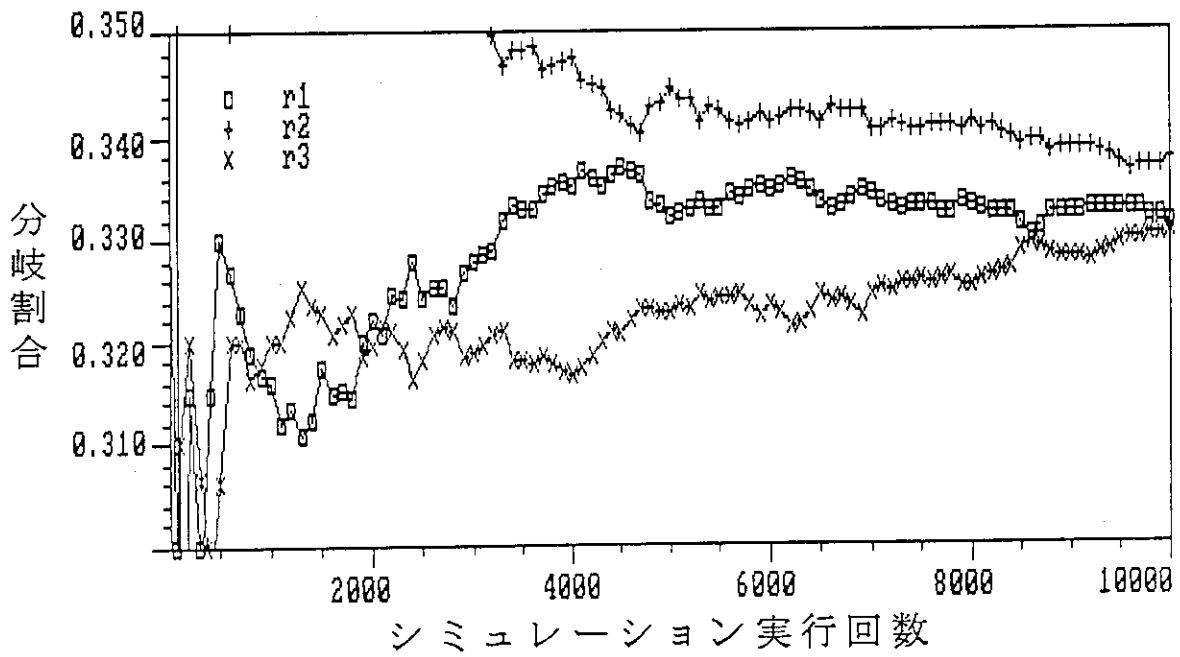
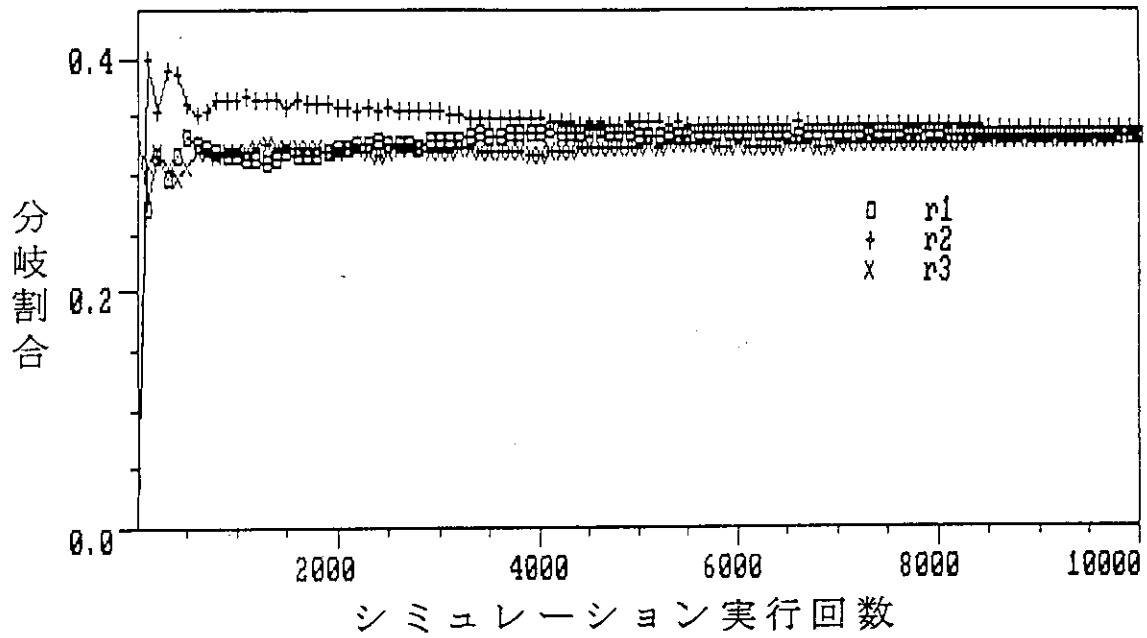


図5.9 シミュレーション実行回数と分岐割合の関係
(乱数シード; 1)

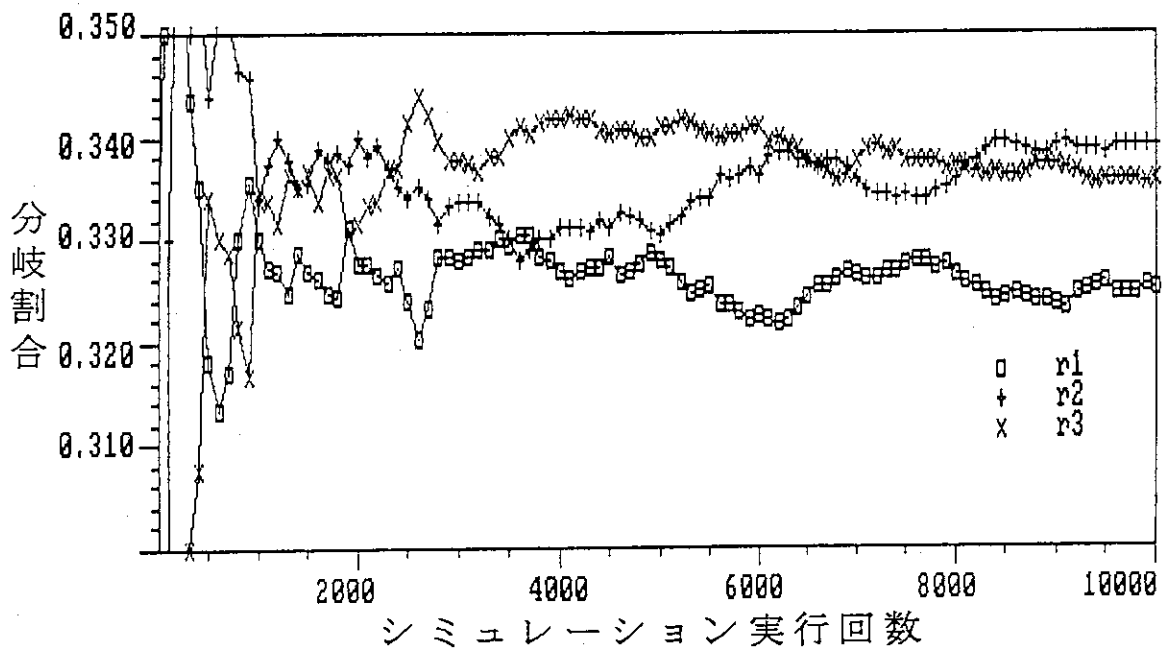
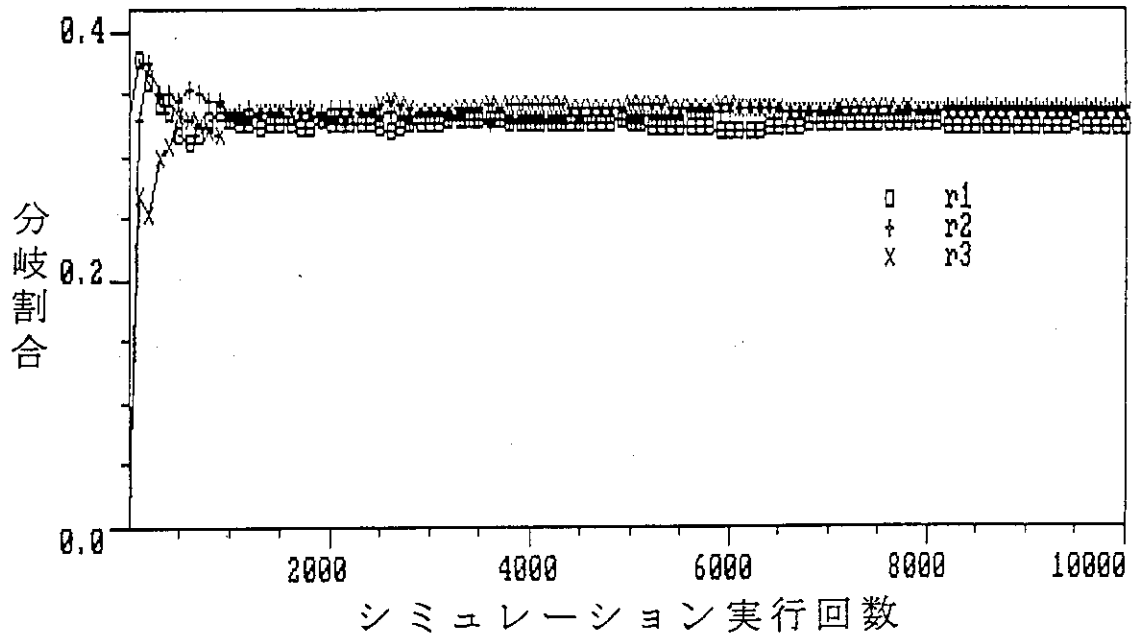


図5.10 シミュレーション実行回数と分岐割合の関係
(乱数シード; 15,000)

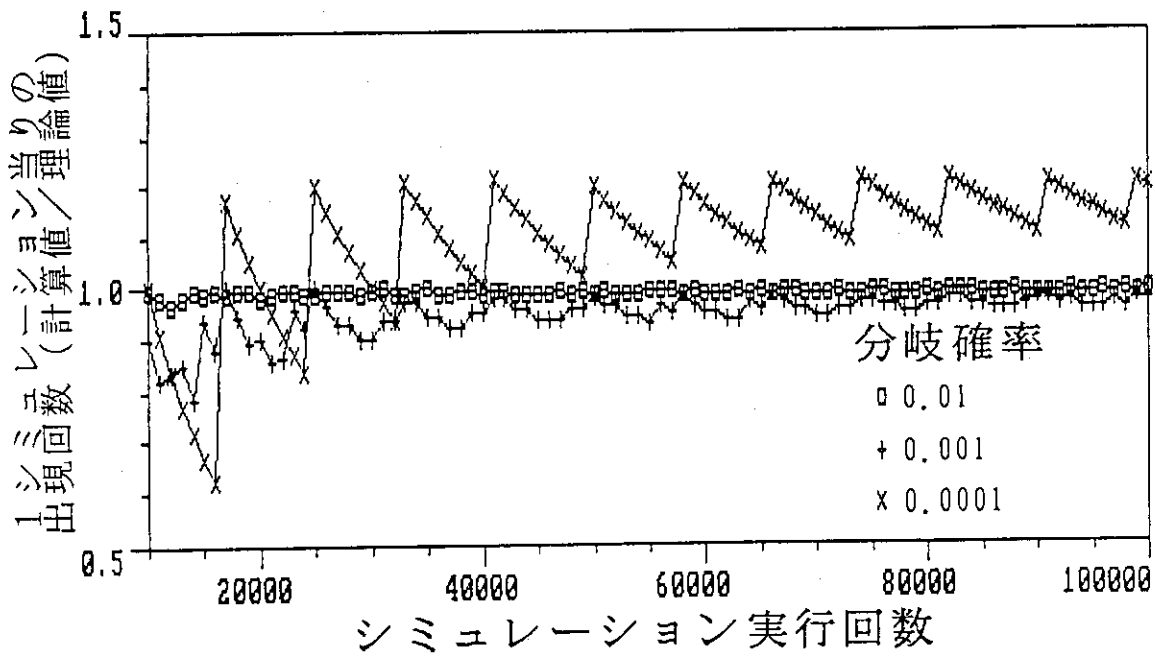
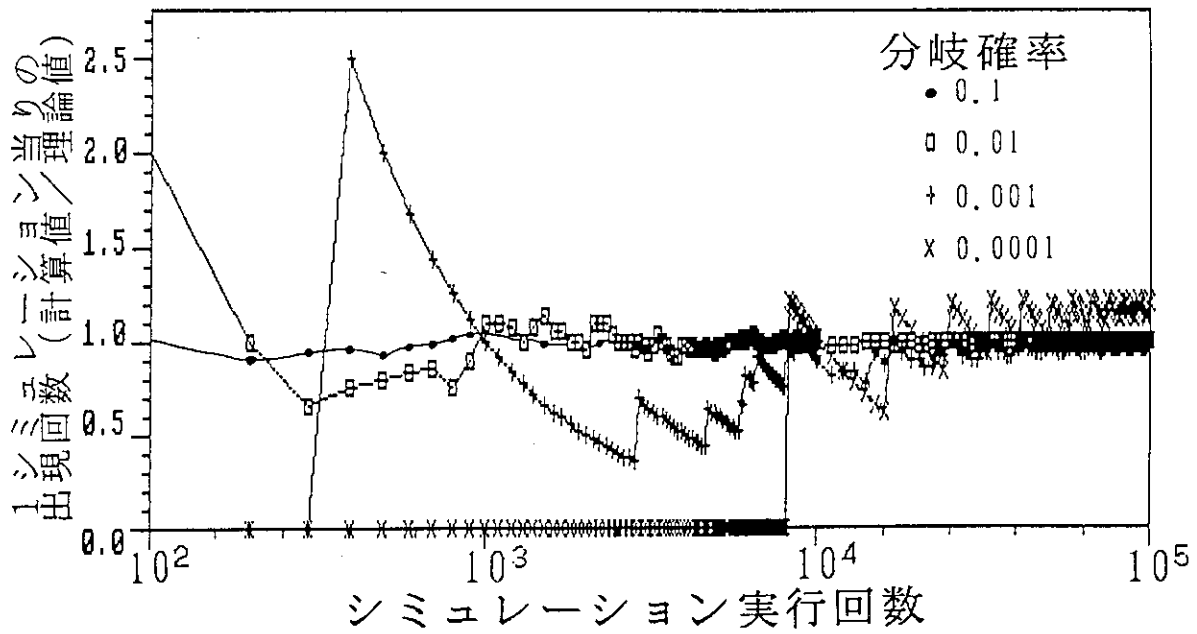


図5.11 分岐確率値の違いによるシミュレーション実行回数に対する収束性の差異

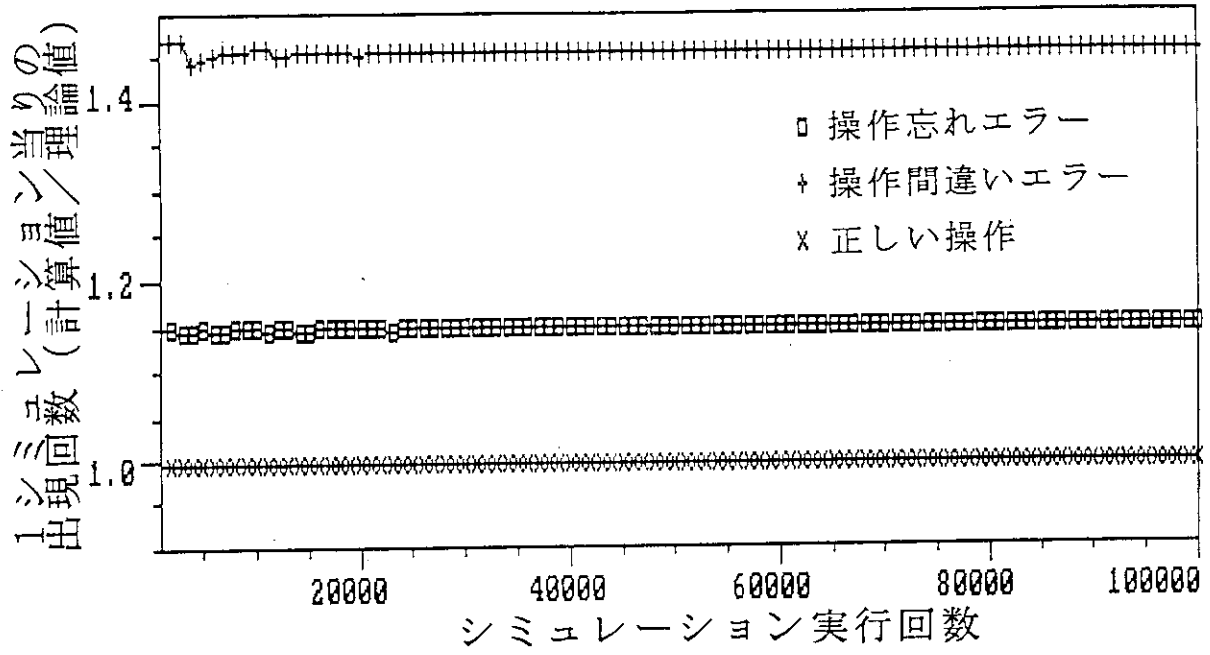
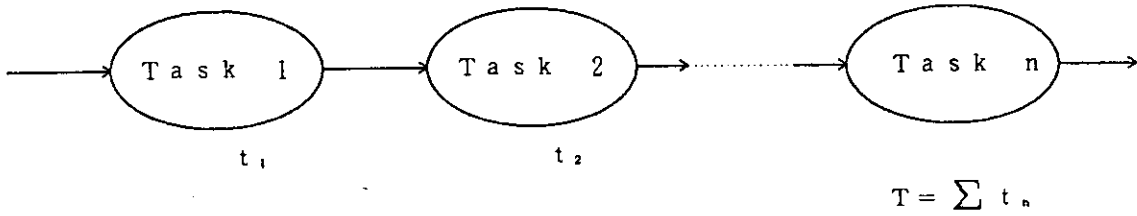
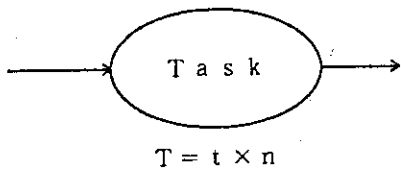


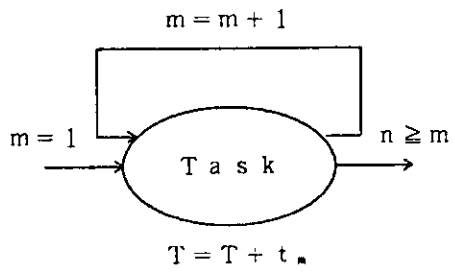
図5.12 OPPSモデルの操作フェイズでの確率的分岐における計算値の理論値に対する収束性



(a) 直列型



(b) 定数倍型



(c) 繰り返し型

図5.13 定型的な一連の作業のタスクネットワーク表現法

6. 結 論

原子炉運転員の認知的ふるまいを計算機で模擬する手法を開発するため、関連する既存の手法の性能評価を進めている。その一環として、ORNLが開発したOPPSモデルをPC用ソフトである Micro-SAINTを用いて整備した。整備した Micro-SAINT版OPPSモデルを用い、ネットワークシミュレーションの実行に影響を与える乱数シード、シミュレーション実行回数等の制御パラメータ、およびOPPSモデルを構成するタスクのタスク属性パラメータの値を変化させ感度解析を行い、OPPSモデルの評価を行った。さらに、Micro-SAINTの基本的な性能を評価するとともに、OPPSモデル内のネットワーク表現で問題と考えられる点について検討した。これより以下の結果を得た。

- (a) Micro-SAINT は、OPPSモデルを作成するのに必要な機能を有している。
- (b) Micro-SAINT を用いてモンテカルロシミュレーションを行った場合、乱数シードがタスク実行時間分布に影響を及ぼし、シミュレーション回数が少ないほど、それは顕著になる。したがって実行回数を多くできない場合は、シミュレーション結果の乱数シードへの依存性を検討する必要がある。
- (c) Micro-SAINT の確率的分岐割合のモンテカルロシミュレーションでの収束性は、乱数シードに依存し、シミュレーション実行回数も約 4,000回未満では収束性が悪い。したがって、確率的分岐割合が解析結果に大きく影響を及ぼすようなタスクネットワークを用いた解析では、シミュレーション実行回数および乱数シードに関して感度解析を行い、収束性を確認する必要がある。また、確率値が小さくなるにつれ多くの実行回数を必要とし、出現回数の期待値が、100~400 回程度になるシミュレーション実行回数が必要である。
- (d) Micro-SAINT の後続タスクへの分岐法の一つである確率的分岐において、確率値が小さくなるにつれ、計算の収斂値と理論値との間の誤差が大きくなる傾向がある。
- (e) OPPSモデルにおいて、繰り返し操作の表現法として、1つのタスクの実行時間を定数倍する方法を用いているが、この方法ではタスク実行時間が分布を持つ場合、標準偏差が正しく計算されずOPPSモデルの誤りである。
- (f) 繰り返し操作の簡便で正確な表現法としては、1つのタスクを繰り返し必要な回数だけ実行するようなタスク表現が適切である。

今後は、Micro-SAINT 版OPPSモデルを基に、認知的ふるまいの模擬手法が具備すべき要件の検討等に情報を得るための解析を行う予定である。

謝 辞

原子炉安全工学部人的因子研究室長 田辺文也氏には作業の実施および本報告書をまとめるにあたり貴重なコメントを頂いた。また、(株)アイ・イー・エー・ジャパンの阿部利男氏には、本作業を実施するにあたり多大なる御協力を頂いた。ここに深勘なる謝意を表する。

参考文献

- (1) Woods, D.D., et al.: Cognitive Environment Simulation: An Artificial Intelligence System for Human Performance Assessment, NUREG/CR-4862 (1987)
- (2) Cacciabue, P.C., et al.: A Cognitive Model in A Blackboard Architecture: Synergism of AI and Psychology, 2nd European Meeting on Cognitive Science Approach to Process Control, Siena, Italy (1989)
- (3) Kozinsky, E.J., et al.: Safety-Related Operator Actions: Methodology for Developing Criteria, NUREG/CR-3515 (1984)
- (4) Schryver, J.C.: Operator Model-Based Design and Evaluation of Advanced System: Computational Model, Proceeding of the IEEE 4th Conference on Human Factors and Power Plants, Monterey, CA, USA (1988)
- (5) 林 幹夫 他、: BWRの安全性に及ぼすヒューマンファクタの研究(Phase II)その2 - 認知実験評価のための認知過程モデル -, A32、日本原子力学会昭和63年秋の大会、(1988)
- (6) Wortman, D.B. and Duket, S.D.: The SAINT User's Manual, AMRL-TR-77-62 (1978)
- (7) Micro Analysis and Design,: Micro SAINT User's Guide,(1986)
- (8) Osalvendy, G 編集、大島正光監訳、: ヒューマンファクター 新人間工学ハンドブック 同文書院(1989)
- (9) Laughery, R., Drews, C., and Arcker, R.: A Micro SAINT Simulation Analyzing Operator Workload in the LHX Helicopter, the NAECON 86 Meeting, Dayton, Ohio (1986)

謝 辞

原子炉安全工学部人的因子研究室長 田辺文也氏には作業の実施および本報告書をまとめるにあたり貴重なコメントを頂いた。また、(株)アイ・イー・ユー・ジャパンの阿部利男氏には、本作業を実施するにあたり多大なる御協力を頂いた。ここに深慟なる謝意を表する。

参考文献

- (1) Woods, D.D., et al.: Cognitive Environment Simulation: An Artificial Intelligence System for Human Performance Assessment, NUREG/CR-4862 (1987)
- (2) Cacciabue, P.C., et al.: A Cognitive Model in A Blackboard Architecture: Synergism of AI and Psychology, 2nd European Meeting on Cognitive Science Approach to Process Control, Siena, Italy (1989)
- (3) Kozinsky, E.J., et al.: Safety-Related Operator Actions: Methodology for Developing Criteria, NUREG/CR-3515 (1984)
- (4) Schryver, J.C.: Operator Model-Based Design and Evaluation of Advanced System: Computational Model, Proceeding of the IEEE 4th Conference on Human Factors and Power Plants, Monterey, CA, USA (1988)
- (5) 林 幹夫 他、: BWRの安全性に及ぼすヒューマンファクタの研究(Phase II)その2 - 認知実験評価のための認知過程モデル、A32、日本原子力学会昭和63年秋の大会、(1988)
- (6) Wortman, D.B. and Duket, S.D.: The SAINT User's Manual, AMRL-TR-77-62 (1978)
- (7) Micro Analysis and Design,: Micro SAINT User's Guide,(1986)
- (8) Osalvendy, G 編集、大島正光監訳、: ヒューマンファクター 新人間工学ハンドブック 同文書院(1989)
- (9) Laughery, R., Drews, C., and Arcker, R.: A Micro SAINT Simulation Analyzing Operator Workload in the LHX Helicopter, the NAECON 86 Meeting, Dayton, Ohio (1986)

- (10) J. ラスマッセン 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)
- (11) Barks, D.B., Kozinsky, E.J., and Eckel S., : Nuclear Power Plant Control
Room Task Analysis: Pilot Study for Pressurized Water Reactors,
NUREG/CR-2598 (1982)
- (12) Barks, D.B. Gomer F., Moody, G.F. and Kozinsky, E.J., : Nuclear Power Plant
Control Room Task Analysis: Pilot Study for Boiling Water Reactors,
NUREG/CR-3415 (1983)

付録A SAINTのジョブ制御文および入力データ(参考文献(3))

IBM 370/3033 Job Control Language

FOR USE WITH SAINT

```

*P.:*
00100 //BEKSAINT JOB (21722,18),'SAVE6522,72 BIN C',TIME=(1,30),MSGCLASS=A
00200 /*JOBPARM LINES=10;CARDS=1000
00300 /*ROUTE PRINT RMT45
00400 // EXEC FORTHCLG,PARM.FORT=MAP,PARM.LKED='OVLY,LIST',LIB=FORT,
00500 // GOSIZE=384K
00600 //FORT.SYSIN DD *

* * * USER FUNCTIONS GO HERE * * *

04600 //LKED.HEXLIB DD DSN=TZA.SAINT.HEX1,DISP=(OLD,KEEP),UNIT=3330-1,
04700 // VOL=SER=ZX4444
04800 //LKED.SYSIN DD *
04900     ENTRY MAIN
05000     INCLUDE HEXLIB
05100     OVERLAY ALPHA
05200     INSERT ATASS,BETAXF,BUILD,CNCVT,CONDIT,CVT,DATIN,DET,DFAUS,DFAUT
05300     INSERT DISTR,DMODS,DSWT,ECHO,ECHOS,ERRIN,GEN,GTCHAR,IMODFN,INIT
05400     INSERT INITS,IRATT,ISATT,MAP,MODFN,MONIT,LPACK,LLABL,MSWT
05500     INSERT MTASK,NMOD,PERTXF,PLOTS,PNABA,POP,OUTPT,PROB,RCLEAR,REG
05600     INSERT SGEN,SSTAT,STATT,TASK,TCLEAR,UCOLL,UHSTO,UINPT
05700     INSERT UPLTS,UTIME,UVAR,VAR
05800     OVERLAY ALPHA
05900     INSERT ATSET,COLST,ENDIT,FILEM,GASP,GETIA,GETPR,GETRA,GETSA
06000     INSERT GETTC,HISTO,MODRF,NFIND,PRIOR,PUTIA,PUTPR,PUTRA,PUTSA
06100     INSERT PUTTC,QRANK,RMOVE,RPLOT,SCHAT,SCHED,SCOND,SSAVE
06200     INSERT TIMEQ,TMARK,UPDATE,USERF
06300     OVERLAY ALPHA
06400     INSERT SUMRY,UOTPT
06500 //GO.FT07F001 DD DUMMY
06600 //GO.FT01F001 DD DSN=&&TAPE1,UNIT=SYSDA,
06700 // DISP=(NEW,DELETE),DCB=(LRECL=136,BLKSIZE=3724,RECFM=VBS),
06800 // SPACE=(2400,136)
06900 //GO.FT02F001 DD DSN=&&TAPE2,UNIT=SYSDA,
07000 // DISP=(NEW,DELETE),DCB=(LRECL=136,BLKSIZE=3724,RECFM=VBS),
07100 // SPACE=(2400,136)
07200 //GO.FT03F001 DD DSN=&&TAPE3,UNIT=SYSDA,
07300 // DISP=(NEW,DELETE),DCB=(LRECL=136,BLKSIZE=3724,RECFM=VBS),
07400 // SPACE=(2400,136)
07500 //GO.FT04F001 DD DSN=&&TAPE4,UNIT=SYSDA,
07600 // DISP=(NEW,DELETE),DCB=(LRECL=136,BLKSIZE=3724,RECFM=VBS),
07700 // SPACE=(2400,136)
07800 //GO.FT08F001 DD UNIT=SYSDA,SPACE=(CYL,(1,1))
07900 //GO.FT09F001 DD DSN=&&TAPE9,UNIT=SYSDA,
08000 // DISP=(NEW,DELETE),DCB=(LRECL=136,BLKSIZE=3724,RECFM=VBS),
08100 // SPACE=(2400,136)
08200 //GO.FT05F001 DD *

```


OPPS Model SAINT Code

08300 GEN,SROA0,5,18,1983,1,2000,1,98529994,,Y
 08400 POP,,,9,10,,,,,2*
 08500 OUT,1,1,,,,,,,,,,,,,Y,N,Y*
 08600 DIS,1,CO,.15*
 08700 DIS,2,CO,.85*
 08800 DIS,3,CO,1380.*
 08900 DIS,4,NO,16.5,4.,73.,17.59*
 09000 DIS,5,NO,31.62,26.4,36.84,3.16*
 09100 DIS,6,NO,3.83,.07,12.,3.83*
 09200 DIS,7,NO,10.,5.86,14.14,2.51*
 09300 DIS,8,NO,11.9,1.0,70.,20.3*
 09400 DIS,9,NO,48.12,31.03,110.01,20.75*
 09500 DIS,10,CO,.5*
 09600 DIS,11,CO,60.*
 09700 DIS,12,CO,.6*
 09800 ISA,1,DS,1,2,DS,2*
 09900 ATA,1,,,,,1,SC,0*
 10000 PRO,5,,,6,.9999,15,.0001*
 10100 TAS,6,LOGREAD,1,,SC,3600*
 10200 ATA,23,,,,,2,SC,0,SA,,10,SC,20*
 10300 ATA,24,,,,,3,SC,1*
 10400 ATA,27,,,,,4,SC,1*
 10500 ATA,28,,,,,5,SC,1*
 10600 ATA,30,,,,,6,SC,1*
 10700 ATA,39,,,,,7,SC,1*
 10800 ATA,31,,,,,8,SC,1*
 10900 ATA,32,,,,,9,SC,1*
 11000 TAS,36,AUXOPER,1,,UF,9*
 11100 ATA,17,STA,SA,,6,UF,6,SA,,9,SC,14*
 11200 TAS,31,WAIT1,1,,SC,832*
 11300 TAS,18,WAIT2,1,,SC,70*
 11400 STA,1,M*
 11500 STA,41,,,FIR,STA,20,1000.,20.*
 11600 STA,10,,,FIR,STA,30,850.,10.*
 11700 STA,22,,,NUM,COM*
 11800 STA,33,,,NUM,COM*
 11900 STA,14,,,NUM,COM*
 12000 STA,13,,,NUM,COM*
 12100 TAS,1,START,0,,SC,0,,,SO*
 12200 DET,1,2,3*
 12300 TAS,2,INDTYPE,1,,DS,12,,0*
 12400 CFI,2,5,ALV,,1,IA,,6*
 12500 TAS,3,ALARM,1,,DS,10,,2*
 12600 TCL,3,6,23,15,23,2,23,5,23*
 12700 DET,3,4*
 12800 TAS,4,SYSTIME,1,,DS,3*
 12900 DET,4,33*
 13000 TAS,5,PROBDET,1,,DS,12*

OPPS Model SAINT Code (Continued)

13100 DET,6,23*
 13200 TAS,15,PREDET,1,,DS,11*
 13300 DET,15,23*
 13400 TAS,23,OBSERVE,1,,UF,8*
 13500 CFI,23,24,ALV,,2,IA,,26*
 13600 TAS,24,IDENTIFY,1,,DS,5
 13700 CFI,24,25,ALV,,3,IA,,26*
 13800 TAS,25,DEFTASK,1,,DS,6*
 13900 DET,25,26*
 14000 TAS,26,FORMATPR,1,,UF,10*
 14100 DET,26,27*
 14200 TAS,27,PROWRITE,1,,SC,0*
 14300 CFI,27,29,ALV,,4,IA,,28*
 14400 TAS,28,INDEXED,1,,SC,0*
 14500 CFI,28,38,ALV,,5,IA,,30*
 14600 TAS,29,DELAY1,1,,SC,60*
 14700 DET,29,30*
 14800 TAS,38,DELAY2,1,,SC,60*
 14900 DET,38,30*
 15000 TAS,30,RESPRO,1,,SC,0*
 15100 CFI,30,39,ALV,,6,IA,,31*
 15200 TAS,39,TRAINING,1,,SC,0*
 15300 CFI,39,40,ALV,,7,IA,,31*
 15400 TAS,40,DELAY3,1,,SC,60*
 15500 DET,40,31*
 15600 CFI,31,32,ALV,,8,IA,,16*
 15700 TAS,32,CONCUR,1,,SC,0*
 15800 CFI,32,34,ALV,,9,IA,,16*
 15900 TAS,34,COMM,1,,SC,180*
 16000 DET,34,35*
 16100 TAS,35,TRAVEL,1,,SC,300*
 16200 DET,35,36*
 16300 DET,36,37*
 16400 TAS,37,COMM,1,,SC,180*
 16500 DET,37,16*
 16600 TAS,7,ERROMIS,1,1,SC,0*
 16700 DET,7,11*
 16800 TAS,8,ERRCOMM,1,1,DS,8*
 16900 DET,8,12*
 17000 TAS,12,RECOVER2,1,1,SC,0*
 17100 PRO,12,,9,.867,14,.133*
 17200 TAS,9,OPERATE,1,1,DS,8*
 17300 DET,9,10*
 17400 ATA,9,,SA,,3,UF,3*
 17500 TAS,10,FIRSTRT,1,1*
 17600 DET,10,17*
 17700 TAS,11,RECOVER,1,1,*
 17800 PRO,11,,9,.00001,13,.99999*
 17900 TAS,13,OMIT,1,1,SC,0*
 18000 DET,13,17*

OPPS Model SAINT Code (Continued)

18100 ATA,13,,SA,,5,UF,5*
 18200 TAS,14,COMIT,1,1,SC,0*
 18300 DET,14,17*
 18400 ATA,14,,SA,,4,UF,4*
 18500 TAS,16,DUMOPER,1,1*
 18600 PRO,16,,,7,0.0341,8,0.00316,9,0.96274*
 18700 TAS,17,DUMFIN1,1,1*
 18800 CFI,17,18,AGV,14,6,SA,,16*
 18900 CFI,18,22,ALV,,7,SA,,19*
 19000 ATA,18,STA,SA,,7,UF,2*
 19100 TAS,19,DIAGPLAN,1,1,DS,9*
 19200 PRO,19,SA,,20,1.,19,2.*
 19300 ATA,19,STA,SA,,1,UF,1,SA,,2,UF,11*
 19400 TAS,20,OPERATE,1,1,DS,8*
 19500 DET,20,21*
 19600 TAS,21,VERIFY,1,1*
 19700 CFI,21,22,AGA,7,8,SA,,20*
 19800 ATA,21,STA,SA,,8,UF,7*
 19900 TAS,22,OPERWIN,1*
 20000 DET,22,41*
 20100 TAS,33,SYSWIN,1*
 20200 DET,33,41*
 20300 TAS,41,STOP,1,,,,,SI*
 20400 FIN*

*

Function USERF:

```

00700      FUNCTION USERF(IP)
00800      GO TO (100,200,300,400,500,600,700,800,900,1000,1100),IP
00900  100    CALL GETSA(1,VALUE)
01000      USERF=VALUE+.05
01100      RETURN
01200  200    CALL GETSA(4,VALUE)
01300      X=VALUE
01400      CALL GETSA(5,VALUE)
01500      Y=VALUE
01600      USERF=X+Y
01700      RETURN
01800  300    CALL GETSA(3,VALUE)
01900      USERF=VALUE+1
02000      RETURN
02100  400    CALL GETSA(4,VALUE)
02200      USERF=VALUE+1
02300      RETURN
02400  500    CALL GETSA(5,VALUE)
02500      USERF=VALUE+1
02600      RETURN
02700  600    CALL GETSA(6,VALUE)
02800      USERF=VALUE+1
02900      RETURN
03000  700    CALL GETSA(7,VALUE)
03100      USERF=VALUE+1
03200      RETURN
03300  800    X=RNORM(4)
03400      USERF= X * 2
03500      RETURN
03600  900    X=RNORM(8)
03700      USERF=X*10
03800      RETURN
03900 1000    X=RNORM(7)
04000      USERF=X*2
04100      RETURN
04200 1100    CALL GETSA(2,VALUE)
04300      USERF=VALUE-.05
04400      RETURN
04500      END

```

付録B OPPSモデルを構成するタスクの概要(参考文献(3))

(a) 異常検知フェイズのタスク

1) “スタート”タスク (タスク1)

ダミータスク。OPPSモデルタスクネットワークの開始点を表わす。本タスク完了後、ネットワークは運転員行動を表すパス(タスク2で始まるパス)とプラント過渡応答を表すパス(タスク3で始まるパス)の2つに分れる。しかし、OPPSモデルでは原子力プラントのモデル化は行われておらず、プラントの応答は、異常発生時から、運転員がこの異常に対処するために必要な安全関連行動に失敗することによってプラントが安全限界を超えるような事態が生じる時点までの単純な時間遅れによって表されている。

2) “指示計のタイプ”タスク (タスク2)

運転員がアラーム発生前に異常事態に気付くことに影響を及ぼす行動形成因子(PSF; Performance Shaping Factor)を表わす。ここで考慮しているPSFは、高レベル指示の有無であり、これが利用可能な場合には、アラーム発生前での異常を検知する可能性が生じる。OPPSモデルのユーザが高レベル指示有りを入力した場合にはタスク5(Prob. of Detection)へ、無しと入力した場合にはタスク6(Monitor Detect)へそれぞれ分岐する。

3) “異常検知確率”タスク (タスク5)

ダミータスク。OPPSモデルのユーザは本タスクにアラーム発生前における異常事象検出確率を入力する。この確率値に従って、本タスク完了後、タスク6あるいはタスク15へ確率的に分岐する。

4) “モニターによる異常検知”タスク (タスク6)

プラントの通常運転時において計器の記録を定期的にチェックする時間間隔を表す。この時間間隔は通常、1時間毎あるいは直交替毎(6ないし8時間)である。

5) “アラーム発生前異常検知”タスク (タスク15)

運転員が異常を検知するのに要する時間(デフォルト値; 60秒)を表わす。

6) “アラーム”タスク (タスク3)

異常事象発生からアラーム発生までの時間を表わす。この時間が運転員がアラーム発生前に異常を検知するのに要する時間よりも短い場合には、本タスクが完了した時点で、その時進行中の運転員行動パスにおける異常検知行動は中止され、認知プロセスが開始されることになる。通常、異常の検知はアラームが発生することによって行われる。これは瞬時に行われるので、OPPSモデルではアラーム発生による異常検知に要する時間は考慮していない。

(b) 情報の内部処理フェイズのタスク

1) “観察”タスク (タスク23)

運転員の認知プロセスの始まりを表すタスクで、運転員が異常事象を診断するために指示計のデータを認知することにより、これらのデータが特定のプラント状態を示しているか、あるいはより一般的な事象を表しているかを推論する。このタスク実行時間は、指示計データの認知に要する時間（デフォルトは、平均値；16.5秒、標準偏差；17.59秒の正規分布）に、運転員が診断に用いる指示計の数を乗じた値になる。OPPSモデルのユーザは指示計の数と、指示計データが特定のプラント状態を示しているか、あるいはより一般的な事象を表しているかを入力しなければならない。この後者の入力値に従って、本タスク完了後、タスク26あるいは24のいずれかへ分岐する。

2) “異常の診断”タスク (タスク24)

運転員が異常を示す指示計データを検証・類別し、この事象の特徴と厳しさを診断する。この診断行動において、問題の根本原因にまで遡って同定しなければならないと判断した場合（Yes/Noは入力）には、本タスク完了後、タスク25へ分岐する。一方、徴候ベースの診断のみで異常事態に対応できると判断した場合には、本タスク完了後、タスク26へ分岐する。

3) “タスクの決定”タスク (タスク25)

運転員が異常事態に対処するための運転手順を決定するため、問題の根本原因を同定する。

4) “手順の決定”タスク (タスク26)

運転員が操作手順を知るために、必要な運転手順書を参照し読む行為を表す。このタスク実行時間は運転手順書を読むのに要する時間（デフォルトは、平均値；10.0秒、標準偏差；2.15秒の正規分布）に、必要な手順書の数を乗じた値になる。本タスクの後には、手順書に係わるPSFを考慮するための一連のタスクが続いている。OPPSモデルでは手順書に係わるPSFとして、①手順書が文章として書かれているかどうか、②手順書に索引が設けられているかどうか、③運転員が進展中の事象に対処する手順を記憶しているかどうか、④運転員がこの事象を訓練で経験したことがあるかどうか、がモデル化されている。これらのPSFが存在しない場合には、各PSFに対応して（③と④は組み合わせて考慮される）、運転員行動パスに1分間の時間遅れが課される。

5) “運転手順書の有無”タスク (タスク27)

ダミータスク。手順書が文章として書かれているかどうかの分岐を表す。

6) “時間遅れ1”タスク (タスク29)

手順書が文章として書かれていない場合に運転員行動パスに1分間の時間遅れを課す。

7) “運転手順書の索引の有無”タスク (タスク28)

ダミータスク。手順書に索引が設けられているかどうかの分岐を表す。

8) “時間遅れ 2” タスク (タスク 38)

手順書に索引が設けられていない場合に運転員行動パスに1分間の時間遅れを課す。

9) “手順の記憶” タスク (タスク 30)

ダミータスク。運転員が進展中の事象に対処する手順を記憶しているかどうかの分岐を表す。

10) “訓練経験の有無” タスク (タスク 39)

ダミータスク。運転員が対応手順を記憶しておらず進展中の事象を訓練で経験したことがあるかどうかの分岐を表す。

11) “時間遅れ 3” タスク (タスク 40)

進展中の事象を訓練で経験したことがない場合に運転員行動パスに1分間の時間遅れを課す。

12) “運転手順策定に要する基本時間” タスク (タスク 31)

運転員が手順書に示されている運転操作手順を開始する前に、運転員行動パスに一定の時間遅れを課す。本タスク完了後の運転操作は、制御室における操作に加えて、制御室から離れた所での操作が必要かどうかによって、タスク 32 あるいは 16 へ分岐する。

(c) 操作フェイズのタスク

1) “同時操作の可能性” タスク (タスク 32)

ダミータスク。現場操作員による制御室外での操作が必要であるとする場合に、この操作が制御室での運転操作と同時に出来るかどうかの分岐を表す。

2) “現場操作員への指示” タスク (タスク 34)

現場操作員に制御室外での操作を伝達するのに要する時間 (デフォルトは、平均値; 180秒、標準偏差; 0.0秒の正規分布) を与える。

3) “現場への移動” タスク (タスク 35)

現場操作員が操作を行う現場へ移動するのに要する時間 (デフォルトは、平均値; 300秒、標準偏差; 0.0秒の正規分布) を与える。

4) “現場での操作” タスク (タスク 36)

現場操作員が現場で操作を遂行するのに要する時間 (デフォルトは、平均値; 11.9秒、標準偏差; 0.0秒の正規分布) を与える。OPPSモデルでは、この補助運転員による操作

行動のヒューマンエラーはモデル化されていない。

5) “中央制御室への連絡” タスク (タスク 37)

補助運転員が現場での操作の結果を制御室運転員に連絡するのに要する時間 (デフォルトは、平均値; 180.0秒、標準偏差; 0.0秒の正規分布) を与える。

6) “中央制御室での操作の開始” タスク (タスク 16)

ダミータスク。制御室運転員による運転操作の始まりを表す。運転員の操作は、正しい行動、オMISSIONエラーあるいはCOMMISSIONエラーの3通りが考えられ、OPPSモデルのユーザが入力するこれら3通りの行動に対応した確率値に (デフォルト値は、それぞれ 0.96274, 0.0341, 0.00316) 従って、本タスク完了後、タスク9、7あるいは8へ確率的に分岐する。なお、制御室における運転員の行動は、必要なスイッチ操作の回数だけ繰返される。(本タスクとタスク17との間のループとなる)。

7) “正しい操作” タスク (タスク 9)

制御室運転員の正しい操作を表し、操作に要する時間 (デフォルトは、平均値; 11.9秒、標準偏差; 20.3秒の正規分布) を与える。また正しい操作回数を数え上げる。

8) “最初に正しい操作を行った時間” タスク (タスク 10)

ダミータスク。制御室運転員が行うスイッチ操作において、運転員が最初に正しい行動をとったときの時間 (異常事象発生からの時間) が統計処理される。

9) “操作忘れのエラー” タスク (タスク 7)

制御室運転員のオMISSIONエラーを表す。

10) “エラーの回復 2” タスク (タスク 11)

ダミータスク。オMISSIONエラーが修復されるかどうかの確率 (デフォルト値は、回復; 0.00001、回復なし; 0.99999) に従い後続タスクに分岐する。

11) “操作忘れ” タスク (タスク 13)

ダミータスク。オMISSIONエラーの回数が記録され、統計処理される。

12) “操作間違いのエラー” タスク (タスク 8)

制御室運転員のCOMMISSIONエラーを表す。

13) “エラーの回復 1” タスク (タスク 12)

ダミータスク。COMMISSIONエラーが修復されるかどうかの確率 (デフォルト値は、回復; 0.133、回復なし; 0.867) に従い後続タスクに分岐する。

14) “操作間違い” タスク (タスク 14)

ダミータスク。コミッションエラーの回数が記録され、統計処理される。

15) “操作回数”タスク (タスク17)

ダミータスク。制御室運転員が行わなければならないスイッチ操作の回数を表す。この回数はOPPSモデルのユーザによって入力され、タスク16と本タスクとの間のループの回数となる。なお、このループ回数分の制御室運転員による操作行動が終了した時点で、運転員が犯したエラーが修復されずにそのままになっている可能性があるが、このエラーは後に続くタスクによって修復されることになる。

(d) 過誤修復のフェイズ

1) “システム応答の待ち時間”タスク (タスク18)

プラント安全系の作動における時間遅れを表すもので、バルブのサイクルタイム等の要因によって引き起こされる遅れを考慮している。この時間はOPPSモデルのユーザによって入力される。本タスク完了後、制御室運転員によるスイッチ操作のヒューマンエラーが修復されずに残っている場合にはタスク19へ、ヒューマンエラーがすべて修復されている場合にはタスク22へそれぞれ分岐する。

2) “エラーの診断”タスク (タスク19)

制御室運転員がスイッチ操作で犯したヒューマンエラーを診断・検出するのに要する時間 (デフォルトは、平均値; 48.12 秒, 標準偏差; 20.75 秒の正規分布) を与える。エラーを検出・診断できるか否かは確率的に決まり、できなかった場合は再びこのタスクを実行する。診断成功および失敗確率の初期値は、それぞれ0.15および0.85であり、診断に失敗した場合、次の本タスクの実行における診断成功確率は、このタスクを繰り返す毎に0.05ずつ高くなる。なお、OPPSモデルでは、本タスクからタスク20の修復操作へ進む時点で、制御室運転員が犯したエラーはすべて検出され、タスク20、21の修復操作/検証の段階で新たなエラーを犯さないことが仮定されている。

3) “エラーの回復操作”タスク (タスク20)

運転員が残っているヒューマンエラーを修復に要する時間 (デフォルトは、平均値; 11.9 秒, 標準偏差; 20.3秒の正規分布) を与える。

4) “回復操作の検証”タスク (タスク21)

運転員がヒューマンエラーの修復を検証する。

5) “運転員の勝ち”タスク (タスク22)

ダミータスク。運転員行動パスの完了に要した時間 (異常事象発生からの時間) が統計処理される。

6) “システムタイマー” タスク (タスク 4)

アラーム発生からプラントが安全限界を越えるまでの時間を表す。

7) “システムの勝ち” タスク (タスク 33)

ダミータスク。プラントのダイナミクスを表すパスの完了に要した時間 (異常事象発生からの時間) が統計処理される。

8) “終了” タスク (タスク 41)

ダミータスク。OPPSモデルタスクネットワークの終了点を表す。

付録C OPPS用事故シナリオ作成シート(参考文献(3))

C.1 事故シナリオ作成用質問状

The scenario is _____

The OPPS is _____

OPPS Scenario Analysis Questionnaire

Prealarm Phase

1. What is the probability of detecting the malfunction prior to the annunciator (default .0001) _____
2. What is the average time from disturbance initiation to alarm annunciation (conventional audible alert and light box)? (range 0 to xxxx seconds) _____ sec.
3. Is the pre-alarm indication of the disturbance a high level indication monitored continuously (e.g. MWe output)? Y or N
4. Is the pre-alarm indication logged or reviewed periodically? Y or N
If yes at what frequency (i.e. hourly, daily, etc.)? _____

Diagnosis Phase

5. Is the alarm annunciator legend associated with a specific condition or does it identify a general disturbance requiring more complex analysis? _____
general or specific
6. How many indications are specified in procedures to diagnose the disturbance? _____ #
7. Is the diagnosis terminated at the symptom level, or extended to the root cause? _____
symptom or root cause

Planning Phase

8. Are the procedures written? Y or N
9. Are procedures indexed? Y or N
10. Are the procedures memorized as part of the immediate actions of a sequence? Y or N
11. Is the scenario used in training? Y or N
12. How many procedures are used? _____ #

Operations Phase

- 13. What is the aggregate time delay before the procedure or procedure steps can begin? _____ sec.
- 14. How many operations are performed by control room operators? _____ #
- 15. Are switch operations to be performed remote from the main control room? Y or N
- 16. Are remote operator actions performed concurrently with the control room operator's actions? Y or N
- 17. How many operations are performed by remote operators? _____ #
- 18. What is the aggregate equipment delay time embedded in the procedure. _____ sec.
- 19. What is the expected average commission error probability? (default .00316 or enter #) _____
- 20. What is the expected average omission probability (default .0341 or enter #) _____

Process

- 21. What is the average time delay from alarm condition to violation of safety limits (i.e. before which the operators must complete their action)? _____ sec.

Note:

This limit should be based on estimates which take into account the variables of the scenario being evaluated.

C.2 事故シナリオに基づくOPPSモデル変更手引き

Operating Instructions

The purpose of this section is to describe to the user the values to be changed to customize the OPPS model to individual purposes. Several editors could be used to edit the SAINT code for the OPPS model. The purpose of this appendix is not to explain an editor but to describe how the model is altered for various inputs. The explanation will consist of the question from the OPPS Scenario Analysis Questionnaire (A-4), the default line to be edited, and what editing is required to incorporate the Questionnaire data in the model.

Prealarm Phase

1. The question is:

What is the probability of detecting the malfunction prior to the annunciator? _____

The default line is:

10000 PRO,5,,,6,.9999,15,.0001*

The probability is the " R_1 " variable from the question and value " R_2 " is one minus " R_1 ." Either one of these numbers can not be zero, and must be in decimal notation.

10000 PRO,5,,,6,. R_2 ,15,. R_1 *

2. The question is:

What is the average time from disturbance initiation to alarm annunciation (conventional audible alert and light box)? (range 0 to xxxx seconds) _____ sec.

The default line is:

09500 DIS,10,CO,.5*

The value "R" is changed to a real number and input.

09500 DIS,10,CO,.R*

3. The question is:

Is the pre-alarm indication of the disturbance a high level indication monitored continuously (e.g. MWe output)? Y or N

The default line is:

09900 ATA,1,,,,1,SC,0*

The value of yes is 0; the value of no is 1 (Y = 0, N = 1). The variable "I" is changed accordingly. "I" is an INTERGER.

9900 ATA,1,,,,1,SC,I*

4. The question is:

Is the pre-alarm indication logged or reviewed periodically?

Y or N

If yes, at what frequency (i.e. hourly, daily, etc.)? _____

The default line is:

10100 TAS,6,LOGREAD,1,,SC,3600*

The answer to the first part of question 4 only has input to line 10100 if the answer is no. If the answer is yes the time in part 2 of the question is converted into seconds and then input into position "I." If the answer was no then zero is input into "I."

10100 TAS,6,LOGREAD,1,,SC,I*

Diagnosis Phase

5. The question is:

Is the alarm annunciator legend associated with a specific condition or does it identify a general disturbance requiring more complex analysis?

general or specific

The default line is:

10200 ATA,23,,,,2,SC,0,SA,,10,SC,20*

If the selection of general of general is made, the variable "I₁" is equal to 0. Specific is input as a 1.

10200 ATA,23,,,,2,SC,I₁,SA,,10,SC,20*

6. The question is:

How many indications are specified in procedures to diagnose the disturbance? _____ #

The INTERGER specified is input into the "I₂" position on line 10200.

10200 ATA,23,,,,2,SC,I₁,SA,,10,SC,I₂*

7. The question is:

Is the diagnosis terminated at the symptom level, or extended to the root cause? _____ symptom or root cause

The default line is:

10300 ATA,24,,,,3,SC,1*

The INTERGER (I) is specified as 1 if the symptom level is chosen or 0 if the root cause branch is taken.

10300 ATA,24,,,,3,SC,I*

Planning Phase

8. The question is:

Are the procedures written:

Y or N

The default line is:

10400 ATA,27,,,,4,SC,1*

If the answer to the question is yes, the value for "I" is 1. An answer of no requires a 0 to be put into the variable "I."

10400 ATA,27,,,,4,SC,I*

9. The question is:

Are procedures indexed?

Y or N

The default line is:

10500 ATA,28,,,,5,SC,1*

If the answer to the question is yes, the value for "I" is 1. If the answer is no, then the variable "I" is 0.

10500 ATA,28,,,,5,SC,I*

10. The question is:

Are the procedures memorized as part of the immediate actions for a sequence?

Y or N

The default line is:

10600 ATA,30,,,,6,SC,1*

The instructions for the previous two questions hold true for this one.

10600 ATA,30,,,,6,SC,I*

11. The question is:

Is the scenario used in training?

Y or N

The default line is:

10700 ATA,39,,,,7,SC,1*

The instructions for the previous three questions hold true for this one.

10700 ATA,39,,,,7,SC,I*

12. The question is:

How many procedures are used? _____

The default line is:

3400 USERF=X*2

The value for the number of procedures (I) is input into this line.

3400 USERF=X*I

Operations Phase

13. The question is:

What is the aggregate time delay before the procedure or procedure steps can begin? _____

sec.

The default line is:

11200 TAS,31,WAIT1,1,,SC,832*

The time in seconds is input to the variable "I."

11200 TAS,31,WAIT1,1,,SC,I*

14. The question is:

How many operations are performed by control room operators? _____

The default lines are:

11100 ATA,17,STA,SA,,6,UF,6,SA,,9,SC,14*

18800 CFI,17,18,AGV,14,6,SA,,16*

The variable "I" is equal to 1 minus the number of operations (i.e. switch manipulations) made by operators (example: If the answer is 15, the I = 15 -1 or 14).

11100 ATA,17,STA,SA,,6,UF,6,SA,,9,SC,I*

18800 CFI,17,18,AGV,I,6,SA,,16*

15. The question is:

Are switch operations to be performed remote from the main control room?

Y or N

The default line is:

10800 ATA,31,,,,8,SC,1*

The value of "I" is 1 if the answer to the question is yes, and 0 if the answer is no.

10800 ATA,31,,,,8,SC,I*

16. The question is:

Are remote operator actions performed concurrently with the control room operator's actions?

Y or N

The default line is:

10900 ATA,32,,,,9,SC,1*

The instructions for the last question hold true for this question.

10900 ATA,32,,,,9,SC,I*

17. The question is:

How many operations are performed by remote operators?

 #

The default line is:

3700 USERF=X*10

The answer to the question is input into the variable "I."

3700 USERF=X*I

18. The question is:

What is the aggregate equipment delay time embedded in the procedure?

 sec.

The default line is:

11300 TAS,18,WAIT2,1,1,SC,70*

The time in seconds is input into the variable "I."

11300 TAS,18,WAIT2,1,1,SC,I*

19. The questions are:

What is the expected average commission error probability? (default .00316 or enter #)

What is the expected average omission probability? (default .0341 or enter #)

The default line is:

18500 PRO,16,,,7,0.0341,8,0.00316,0.96274

The error of commission is variable R_1 .

The error of omission is variable R_2 .

Variable R_3 is probability of correct operation. All variables are real numbers and $R_1 + R_2 + R_3 = 1.0$ and is in decimal notation.

18600 PRO,16,,,7,R₂,8,R₁,9,R₃*

Process

20. The question is:

What is the average time delay from alarm condition to violation of safety limits (i.e. before which the operators must complete their action)?

 sec.

The default line is:

8800 DIS,3,CO,1380.*

The variable "R" is the number of seconds from alarm to violation of safety limits. "R" is a real number.

8800 DIS,3,CO,R*

C.3 質問状の記入例(逃し安全弁誤開シナリオ)

The scenario is MSRV Fails
 The SROA is Scram Reactor

OPPS Scenario Analysis Questionnaire

Prealarm Phase

1. What is the probability of detecting the malfunction prior to the annunciator (default .0001) .4
2. What is the average time from disturbance initiation to alarm annunciation (conventional audible alert and light box)? (range 0 to xxxx seconds) 37.7 sec.
3. Is the pre-alarm indication of the disturbance a high level indication monitored continuously (e.g. MWe output)? Y or N
4. Is the pre-alarm indication logged or reviewed periodically? Y or N
 If yes at what frequency (i.e. hourly, daily, etc.)? hourly

Diagnosis Phase

5. Is the alarm annunciator legend associated with a specific condition or does it identify a general disturbance requiring more complex analysis?
 general or specific
6. How many indications are specified in procedures to diagnose the disturbance? 6 #
7. Is the diagnosis terminated at the symptom level, or extended to the root cause?
 symptom or root cause

Planning Phase

8. Are the procedures written? Y or N
9. Are procedures indexed? Y or N
10. Are the procedures memorized as part of the immediate actions for a sequence? Y or N
11. Is the scenario used in training? Y or N
12. How many procedures are used? 3 #

Figure A-10 OPPS Scenario Analysis Questionnaire for SRV Fails

Operations Phase

13. What is the aggregate time delay before the procedure or procedure steps can begin? 600 sec.
14. How many operations are performed by control room operators? 26 #
15. Are switch operations to be performed remote from the main control room? Y or N
16. Are remote operator actions performed concurrently with the control room operator's actions? Y or N
17. How many operations are performed by remote operators? 10 #
18. What is the aggregate equipment delay time embedded in the procedure. 300 sec.
19. What is the expected average commission error probability? (default .00316 or enter #) Default
20. What is the expected average omission probability (default .0341 or enter #) Default

Process

21. What is the average time delay from alarm condition to violation of safety limits (i.e. before which the operators must complete their action)? 1980 sec.

Note:

This limit should be based on estimates which take into account the variables of the scenario being evaluated.

Figure A-10 OPPS Scenario Analysis Questionnaire for SRV Fails (cont'd)