[99] 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

吉川 榮和^{*1}, 古田 一雄^{*2}, 中川 庸雄^{*3},
吉村 誠一^{*4}, 吉田 一雄^{*5}, 内藤 憲夫^{*6}

Review on Present State of Human Model Researches in Nuclear Engineering and the Prospect for their Industrial Applications

By Hidekazu YOSHIKAWA, Kazuo FURUTA, Tsuneo NAKAGAWA,
Seiichi YOSHIMURA, Kazuo YOSHIDA and Norio NAITO

Reviews have been made on the researches and developments for human models in the field of nuclear engineering. Until now, the related works have been made mainly for the modeling of plant operator and operator crew in the control room, but also there arise new tendencies of extending the modeling works for maintenance field as well as for personnel training purposes.

The whole range of human model research is divided into the five areas of (a) modeling for machine system, (b) measurement and analysis of human information behavior, (c) modeling of human internal information process, (d) modeling of human interaction with machine system, and (e) that of between human themselves. The real examples of the human model developments as well as their methods, applications, and the model validations are described, and then, the further subjects and efforts are pointed out which would be needed for the broader industrial application of the human modeling.

KEYWORDS : *human-machine system, man-machine system, human machine interaction, operator model, man machine interface, human models, human cognition, nuclear power plant, reactor operation, maintenance, training, nuclear engineering, educations*

I. はじめに

原子力プラントは、近代技術の粋を集約した巨大技術システムの典型で、いわば現代のピラミッドともいえる。最近、技術システムの巨大化に伴い、様々な側面で「技術と人間の関係」が社会問題化してきた。特に巨大技術システムの運用管理面では、ヒトと機械システムの接点(マンマシンインタフェース)のあり方を、ヒトの原理を中心に再考する「ヒューマンインタフェース」の視点がますます重要になった。

筆者らは、マンマシンインタフェース向上のための技術基盤として、機械と交流する人間行動の科学的捉え方、モ

デル化を「ヒューマンモデル」と呼ぶことにして、すでに「本誌」で1994年の時点の、原子力におけるヒューマンモデル研究の基本的な考え方と方法論、当時の内外の研究状況を紹介した⁽¹⁾。本稿は、約5年を経過した現在、ヒューマンモデル研究がその後どのような方向に発展したか、その成果と将来方向を再び展望する。

1994年の時点では、ヒューマンモデル研究は、欧米でのマンマシンインタラクション(人間と機械システムの相互作用)のコンピュータシミュレーションに関する幾多の先行研究に触発され、我が国の原子力発電に関わるヒューマンファクタ研究を行う公的機関において、いずれもヒューマンモデル研究をその重点テーマとして組織的な研究が着手された。なお、米国では、航空機のcockpitデザインは、パイロットの“ヒューマンモデル”シミュレータで設計していると、筆者(吉川)は最近、Sheridan教授(MIT)から伺った。動きの早い航空機の場合、パイロットには敏速な対応が必要で、反射行動的なのでモデル化もしやすい。しかし原子力の場合、プラント応答も遅く、運転員の対応には思考判断の要素が大きい。この辺が原子力のヒューマンモデルの難しいところである。なお、米国航空界でのヒューマンモデルではMIDASが有名で、これを原子力プラント用に改造する研究が報告されている⁽²⁾。

その後、欧米では、原子力開発の全般的停滞を反映して

^{*1} 京都大学大学院エネルギー科学研究科 (Graduate School of Energy Sci., Kyoto Univ.)

^{*2} 東京大学大学院工学研究科 (Graduate School of Eng., Univ. of Tokyo)

^{*3} (財)原子力発電技術機構ヒューマンファクターセンター (Inst. of Human Factors, Nucl. Power Eng. Corp.)

^{*4} (財)電力中央研究所 ヒューマンファクター研究センター (Human Factors Res. Center, Central Res. Inst. for Elec. Power Ind.)

^{*5} 日本原子力研究所 人的因子研究室 (Human Factors Res. Lab., Japan At. Energy Res. Inst.)

^{*6} (株)東芝 原子力技術研究所 (Nucl. Eng. Lab., Toshiba Corp.)
(1998年 10月29日 受理)

か、せっかくの先行研究もその後とくに見るべき発展も見られず、最近是我が国が、世界のヒューマンモデル研究を先導する観がある。我が国でのヒューマンモデルの研究開発は、元来の方角であった、プラント運転員の運転監視行動のモデリングと中央制御室でのマンマシンインタラクションのコンピュータシミュレーションばかりでなく、ヒューマンモデルを運転訓練や機器保守点検作業の教育支援システム(CAI)の開発へ応用する動きも見られるようになってきた。本稿では、我が国の最近の、このようなヒューマンモデル研究の現況を、その成果と今後の産業応用の可能性を中心に論じることとしたい。

II. 拡大するヒューマンモデルの枠組み

原子力におけるヒューマンモデルの対象は、プラントの中央制御室での運転員認知行動モデルの開発を中心課題として出発し、最近はこのもとに運転員のチーム行動のモデリングや、さらには保守作業員の機器分解点検組立作業のモデリングへも発展してきた。これらを含めた、原子力のヒューマンモデル研究の一般的な枠組みは、第1図のようになるが、そこには大別して次の5つの領域がある：①機械システムのモデル化、②ヒトの情報行動の計測、③人間の内部プロセスのモデル化、④機械とのインタラクションプロセスのモデル化、⑤人間同士のインタラクションプロセスのモデル化。以下、これらの研究領域を説明する。

1. 機械システムのモデル化

機械システムのモデルといえば、プラントを構成する個々の機器の工学モデルや、それらで構成されるシステムのダイナミックシミュレータがまず想像されるが、これらばかりでなく、機器の分解・組立のためのCADモデル、機

器故障の測定・診断モデルなどもこの範疇に入る。これらは機械の物理を数学モデルとして表現してコンピュータモデルとして構成するもので、いわば伝統的な工学領域でのモデリングである。「機械システムのヒューマンモデル」では、現実世界の人間と機械の種々のインタラクションにおいて、ヒトが機械をどのように頭の中でイメージし、操作しているか、機械に対してヒトが抱くメンタルモデルをモデル化する。メンタルモデルの表現では、機能・構造的側面、目標・手段の側面およびこれら相互の関連性、ヒトが機械を操作する時に、機械の物理的振舞いを、どのような状態遷移規則として捉えているかなど、明示的であれ、暗黙的であれ、ヒトの知識形態を、ヒトから引き出して、知識モデルとして表現する。

2. ヒトの情報行動の計測

これは現実世界の人間と機械の種々のインタラクションにおけるヒトの情報行動を、ヒトとヒトとのインタラクションも含めて、理解するための実験と計測である。ヒューマンモデル構成と検証のための観測データ取得ばかりでなく、コンピュータモデルとして構成するオンライン型ヒューマンモデル(後述)への、有効な入力情報の抽出にも関連する。

3. 人間の内部プロセスのモデル化

これは外界情報を、感覚器官を通じて取得し、知覚・認知して行動を出力する、人間行動の内部プロセスのモデル化であり、いわば「狭義のヒューマンモデル」である。著者らの既報⁽¹⁾では、この部分のモデル化で考慮すべき内部的な心理機構を、第1図のうち、知覚、思考、判断、意思決定に絞って論じているが、最近のヒューマンモデル研究では、ヒトの協同作業も問題となってきて、ヒトとヒトとのコミュニケーションのモデル化、人間行動の下地をなす情

第1図 原子力におけるヒューマンモデル研究の対象と要素

動などの感情要因や、他人の行動を理解する対人認知のモデル化もその範囲になってきた。

4. 機械とのインタラクションプロセスのモデル化

これは中央制御室での監視操作や、機器分解組立点検作業の際の、機械の「工学モデル」とヒトとのインタラクションプロセスを、①に述べた機械の「メンタルモデル」を用いて、前の③に述べるヒューマンモデルで解釈・使用できる形式にモデル化する領域である。

5. 人間同士のインタラクションプロセスのモデル化

これは特にヒト同士のコミュニケーションをヒューマンモデルの対象にする場合に必要である。個々のメンバーの役割分担や、例えば音声会話や身振り、表情などの、相互コミュニケーションの形態から、ヒューマンモデルのうちの対人認知モデルに使用される人間とのインタフェース情報を、規定・抽出・使用するプロセスをモデル化する。

現実の原子力ヒューマンモデル研究においては、上述の④の狭義のヒューマンモデルを中心に、これら5つの要素モデルを関連させたシステム化が行われている。また、コンピュータシミュレーションの形態には、④オフライン型(第1図の5要素の範囲内でのシステム化で、実際のヒトとは切り離されている場合)と、⑤オンライン型(ヒトの要素も入ってクロズドループになっている場合)の2通りがある。④の典型はプラントシミュレータと運転員モデルを接続した人間機械系シミュレーションであり、一方、⑤ではヒトとの対話がないと意味がない教育用CAIが実例である。④では必ずしもリアルタイムシミュレーションは必要でないが、⑤ではリアルタイム化が必須となる。

以下、第Ⅲ章においては、特にプラント制御室の監視制御行動の運転員モデルとマンマシンインタラクションの総合シミュレーションの研究開発動向について、我が国の代表的なプロジェクト研究事例を紹介し、一方、第Ⅳ章においては、その他の研究開発のうち、特に新しい応用を指向している研究事例を紹介する。これらの研究事例の紹介では、ヒューマンモデルの5つの要素で、どのような応用を意図しているか、具体的にどのようなモデル化の方法を用いているか、それぞれのヒューマンモデルの特質、またシミュレーションシステムが④のタイプか⑤のタイプか、述べる。

Ⅲ. プラント制御に関する運転員モデルの研究

1. 東京大学における状況

(1) 運転員認知シミュレーション(OCCS)

これまでにプラント運転員の認知システムをモデル化し、認知行動の計算機シミュレーションを行うシステム、運転員認知シミュレーション(OCCS)の開発を行ってきた。OCCSは人間機械系統合シミュレーションによって実

験的手法を補完し、プラント人間機械系の設計評価を行うことを主目的とするシステムである。OCCSのヒューマンモデル(HM)開発は意思決定の梯子モデルを記号処理技術によって計算可能にすることから出発したが、黒板制御モデルの採用によって認知モデルに必要な状況決定性を付与している。また複数の知識ベースと黒板を有し、集団行動へも適用可能である。

OCCSは、時間依存TMSによる翻意抵抗と複数資源モデルに基づく運転員の心的負荷の評価⁽³⁾、集団問題解決のモデル化と学習効果の分析⁽⁴⁾、異常診断認知実験によるモデル検証⁽⁵⁾、環境相互作用を考慮した運転員行動のシミュレーション⁽⁶⁾などの研究に適用され、人間機械系統合シミュレーションの有効性を確認するとともに、モデルの改良が行われた。なお、OCCSの詳細については既出の解説を参照されたい⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

(2) ヒューマン・コミュニケーション

情報技術の発展とともに、原子力をはじめとする高度科学技術システムでは高度の自動化が推進され、システムの信頼性向上に貢献する一方で、人間と機械の関わり方において従来見られなかった新たな問題が生じている。この問題の最大の原因は、現在のマンマシンインタフェースの機能が情報提示と指令伝達の域を大きく越えるものではなく、人間同士のコミュニケーションに見られるような相互理解が不足しているためと考えられる。そこでこれまで得られたHM研究の成果を活用し、この問題の解決を目指すことは意義のあることといえるだろう。

ここで人間と機械のコミュニケーションを考える前に、人間同士のコミュニケーションについて考えてみることにしよう。我々はなぜ人の言動を理解し、協調的行動をとれるのだろうか。それは我々各人が頭の中にHMを持っており、認知過程を心的にシミュレーションすることによって人の言動に説明を加えられるからと考えられる。HMは健全な人間なら誰もが持っているもので、認知システム工学の専門家だけのものではない。もちろん皆が同様なHMを持っているとは限らないし、素朴理論的HMは専門家のHMと異なるかもしれない。しかし我々はHMの心的操作を通して人の言動を理解しており、HMなくして円滑な対人コミュニケーションは望めない。

このようなHMを我々はどのように構築すべきか。人間以外の対象について、我々は対象の振舞いを長期に観察することによって対象の振舞いの特徴を記述する変数間の相関関係を発見し、次に得られた相関関係を因果的に解釈し、最後にその因果関係を自分の期待や意図に沿って目的論的、操作的に構造化する経過をたどって対象のメンタルモデルを構築する⁽⁹⁾。これは内部の仕組が覗けない対象について、外部から観測可能な情報のみに頼った間接的方法である。対象が人間の場合にもこのような行動主義的方法は有効だろうが、HMの場合にはこれよりはるかに直接的方法がある。それは人間の認知がそれ自身を内観できると

いう特性を利用するもので、これによってHM構築は行動主義的制約から自由になる。

我々は自分が今何を考えているかを認識できるし、現在の考えに至った認知過程を説明することもできる。このように我々の認知が自己言及的であることは、心理学、人工知能、社会学などの分野で以前から重大な関心と呼んできた⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。もちろん、我々が意識しているのは逐次的に行われる高次認知過程のごく一部に過ぎないし、その背後には意識に上らずに並列的に行われる膨大な認知過程が存在する。また意識されるのは認知過程そのものではなく、後見的説明であるともいわれており、心理学では内観報告の解釈に注意が必要とされてきた⁽¹²⁾。人間行動の決定機序を解明する際にはこれらを差し引いて考える必要があるが、コミュニケーションの場合には人間の認知が自己言及的であることは次の2点で決定的に重要な意味を持つ。

第1に、すでに述べたように自己の認知過程を内観することによって、外部観察に基づく推測に頼ることなしにHMを直接構築できることである。こうしてできたHMは自分の認知のモデルであってコミュニケーション相手のモデルではない。しかし人間であれば人も自分と同様に思考するはずだという思い込みに基づいて、自分のモデルを他人に適用して相手の言動を理解するのである。第2に、内観の結果を人に報告することによって、言動を決定するに至った自己の認知過程について直接的証拠が提供できる。その結果、表面的行動の観察とHMを使った推論にまかせるよりも、自分の言動の合理性を正しく理解してもらえる可能性は高まる。我々は自分の行動をどうしても理解してもらいたいとき、結論だけでなくその認知過程を他人に説明して相手の認知を自分と同調させようとする。

そこで発話コミュニケーションが後者の機能を有することを示唆する例として、2水槽系温水供給プラントDURESSを被験者2人で協力して運転してもらい、2人の発話を観測、操作実行、解釈、計画、注意、状況認識、動機づけの7種類の認知過程に関するものに分類した結果を第2図に示す。図は3チームの発話の合計を4つの実験シナリオごとに示しており、シナリオ1, 2は事前練習用マニュアルに記載のある異常のみを含む想定内シナリオであるが、シナリオ3, 4はマニュアルに含まれない異常を含む想定外シナリオである。解釈と計画の発話は外部から観察不可能な認知過程の深部に関する情報交換を担っているが、その全発話中の割合は54%とかなり高率であり、またこの割合は想定内のシナリオ1, 2(51%, 49%)よりも想定外のシナリオ3, 4(58%, 58%)で有意に高い。このように人間同士のコミュニケーションでは、認知システムに入力される情報の共有ばかりでなく、認知過程そのものの共有が重要な役割を担っており、想定外状況ではそれが一層重要なことがうかがわれる。

(3) HM研究の方向

以上より、機械と人間の協調的コミュニケーションを実

第2図 チームによるDURESS運転での発話

現するためには、機械が人間同様にHMを利用して人間の言動を理解できるとともに、自分の言動を理解してもらうための説明を行えるようにすることが不可欠のようである。これは機械がHMに基づいて人間と同じ方法で問題解決することを要求するものではない。むしろ多様性による高信頼性達成の点では、形式的で厳密な理論や網羅的探索など、人間の思考と異なり人間の思考を相互補完するようなモデルで問題解決させた方が望ましい。しかしコミュニケーションにおいては、人間のコミュニケーション原理に近くなければ相互理解が非常に困難になる。

HMをコミュニケーション資源とする技術開発の第一歩として、プラント運転員の意図理解の研究を行っている⁽¹³⁾。これは運転員が対象プラントや自分のタスクに関して持っている知識のモデルに基づいて、運転員が行った操作の目標と手順とを意図として同定する手法である。運転員の知識モデルは、対象プラントの挙動の形成機序を定性的な因果関係に基づいて記述した機構的知識と、運転操作タスクを手段目標関係に基づいて階層的に記述した操作的知識からなると仮定している。

意図推論は第3図に示す方法で行われる。まず、プラント状態の監視結果から運転操作の目標となりうる状態を数え上げて、ゴールスタックと呼ぶリストを作る。ゴールスタック上の目標に対して、これを達成する手順を知識モデルから生成する。この手順を運転員が実際にとった操作と比較し、運転員の意図の候補をデフォルトルールとして作成する。この候補を人間の認知特性を反映するヒューリス

第3図 意図推論の方法

ティックスによって順位付けし、真の意図を推定する。簡単なモデルプラントを用いて行った評価実験の結果、要求タスクに適合したゴールスタックの作成法と適切なヒューリスティックスを用いれば、60～80%の精度で正しい意図が推定できること、意図を順位付けする適切なヒューリスティックスが被験者・実験シナリオ間で比較的安定していることを確認している。

以上のような成果は、人間と機械の間のコミュニケーションにHMを役立てようとする試みにとっては明るい材料ではあるが、まだ研究は端緒についたばかりといつてよい。現状ではOCCSで開発されたモデルのごく一部の概念を考慮しているに過ぎないし、意図推論の方法にも改善の余地が大きい。また2層構造の運転員知識モデルは十分でなく、構成空間、因果空間、状態空間、目標空間の4層への拡張を提案している⁽¹⁴⁾。

さらに人間の言動の意味するところはそれが行われる状況に埋め込まれており、同じ言動であっても状況が異なれば意味が全く異なることがある。したがって、どれだけ詳細な状況が参照できるかが解釈にとって重要である。このモデルによる意図推論では、プラント状態の推移と過去に行われた操作しか考慮していないが、人間ではこれに加えて発話、位置、視線方向、身振りや顔の表情までコミュニケーションに利用しており、これらが形成する状況において人の言動が解釈される。しかし機械による状況のセンシングは貧弱であり、このために人間とのコミュニケーションに障害が生じることが少なくない⁽¹¹⁾。したがってHMや推論手法の改良ばかりでなく、状況という概念の明確化や効果的な状況センシング技術の開発も重要な課題であるといえよう。

2. 原子力発電技術機構における状況

原子力発電技術機構のヒューマンファクターセンターでは、通産省の委託事業の一部としてヒューマンファクター関連技術の開発を行っている。ここでは、ヒューマンモデルに関連するものとして、認知資源不足による過誤発生をモデル化したCAMEOとシミュレーションによってMMIの評価を支援するSEAMAIDの2件を紹介する。

(1) 認知資源不足による過誤発生モデル(CAMEO)

人間の情報処理過程では、「認知資源」を必要とする。ここで、認知資源とは、認知処理を遂行するのに必要な注意、努力、記憶容量等を含めた概念であり、「量」として取り扱えるものとする。また、難しい情報処理過程は多くの認知資源を必要とするが、認知資源量には限界があり、それを越えて使用することはできない。認知資源不足が発生すると、正常な認知処理ができなくなり、人的過誤(エラー)の発生につながる。CAMEO(Cognitive and Action Modeling of Erring Operator)⁽¹⁵⁾は、このような考えを基に開発したシミュレーション用のヒューマンモデルである。第4図にモデルの枠組みを示す。

原子力プラントの中央制御室で操作を行う運転員を考え

第4図 CAMEOの構成

た場合、感覚知覚モジュールが制御盤等のインタフェース(MMI)からの情報を取り込み、それを知覚バッファに一時的に格納する。感覚知覚モジュールは、視覚と聴覚で別のモジュールにしてある。このモジュールを実行するための資源が不足すると、知覚バッファの更新が不十分になり、情報の見落としが発生する。

判断モジュールは、ワーキングメモリー内の情報と、長期記憶内の「戦略(処理方法の定義)」を用いて、観察、診断、対応行動の決定、評価等を行う。決定された対応行動はワーキングメモリーを通して行動モジュールに渡される。十分な資源がない場合には、正しい戦略を用いることができず、短絡的な判断をしてしまう。

行動モジュールは、あらかじめ定義しておくアクションファイルを用いて、判断モジュールが決定した行動を実行する。アクションファイルには、必要な資源量、そのアクションの前にするべき操作(条件操作)、本来の目的の操作が定義されている。資源不足が起こると、条件操作の実行を忘れたり、より少ない資源量で実行できる別のアクションファイルを選択してしまう等のエラーが発生する。

与えられた総資源量の配分は、資源配分制御がコントロールする。すなわち、各モジュールからの必要資源量を集計し、その結果が総資源量より少ない場合は、要求通りの資源量を、総資源量より多い場合は、資源配分ポリシーによって配分量を決定する。資源配分ポリシーは、個人差を表すために導入したもので、一様配分、感覚知覚優先、判断優先、行動優先の4種類を用意した。

CAMEOは、リアルタイムエキスパートシステム構築ツールG2⁽¹⁶⁾を用いてEWS上に作成した。本モデルの妥当性は、意図的に難易度を調整した被験者実験とシミュレーション結果を比較して確認した⁽¹⁷⁾。CAMEOがエラーを起こさずに正しくタスクを遂行するために必要な最小資源量(必要最少資源量)の傾向が、難易度の高低と一致した。また、総資源量を減らしていくと、難易度が高い課題からエラーを起こしやすくなることも、実験の傾向と一致した。

CAMEOを用いて、インタフェース設計案評価を試みた。2ループの加圧水型軽水炉簡易モデルを用い、CAMEOが在来型のMMIと2種類のCRTを主体とするMMI(プラントパラメータを系統ごとに階層化した機能階層型と異常事象ごとに対応画面を用意したタスク型)を用いて課題に対応する様子をシミュレートした。評価指標としては、前出の必要最少資源量と認知裕度限界(資源不足が起こらない最少の総資源量)を用いた。第1表は認知裕度限界の例である。それぞれ値が小さいほど運転員への負担が小さい。課題としては、TRP0が最も簡単で、TRP2が逆に困難なこと、インタフェースとしては、タスク型のCRTインタフェースが最良であることを示している。

(2) シミュレーションによるMMI評価手法 (SEAMAID)

原子力プラントの中央制御盤の製作にあたっては、設計案の段階で検討評価を十分にを行い、質の高いインタフェースを製作することが肝要である。ここで紹介するSEAMAID(Simulation-based Evaluation and Analysis support system for Man-machine Interface Design)⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾は、EWS上で動作するシステムで、評価対象のインタフェースを通してプラントを運転する運転員の行動を模擬し、その様子から、インタフェース設計案の問題点抽出を支援するものである。模擬するインタフェースの変更が容易なので、設計時点で繰返し評価を行うことが可能である。

SEAMAIDは、機能的には、運転員の行う異常事象対応を模擬するシミュレーション部とシミュレーション結果を解析するエラー要因分析器に分かれる。シミュレーション部には、プラントシミュレータ、MMIシミュレータおよび運転員シミュレータがある。運転員シミュレータは、異常事象検知後の事象診断と運転手順書に忠実に従う運転員の対応行動を模擬する。シミュレーション中の運転員の位置、主要なプラントパラメータ、運転員から見たインタフェースの様子(運転員の視野)等を記録しておき、それを基に、エラー要因分析器がインタフェース評価のための情報を提供する。

運転員シミュレータは、第5図に示すように、Reasonが提唱した認知モデル⁽²⁰⁾に基づいている。このモデルでは、短期記憶を周辺記憶と焦点記憶に分けて考える。周辺

記憶に入る情報は、目や耳から入る外界の情報や次に実行すべきタスク名である。その中の重要な情報が焦点記憶に取り込まれ、処理される。焦点記憶は大きさに限りがある。したがって、この中の情報が増えると運転員に負担がかかった状態となり、好ましくない。

SEAMAIDでは、異常時の運転手順をペトリネットの形式で知識ベースに格納する。これらの手順の知識と焦点記憶内の情報とが比較され、一致すれば、その手順が実行される。この部分がルールベースエンジンである。一致しない場合は、診断エンジンが事象診断を行って対応手順を決め、ルールベースエンジンで処理できる情報(対応手順名)として、焦点記憶に返す。この時、「診断のために計器を見る」等の運転員の動作は、診断エンジンからの依頼で、ルールベースエンジンが実行する。このように、ルールベースエンジンと診断エンジンとの連携動作により、事象診断と手順書に従う対応行動が模擬される。

シミュレーションで得られた短期記憶内の情報量変化の例を第6図に示す。80~130sで情報量が増加しているが、このような部分で運転員は大きな負担を感じるようになる。

現在は、単独の運転員が異常事象に対応する様子が模擬できる。さらに運転員チーム行動の模擬ができるように改良を進めている。また、診断エンジンについては、京都大学吉川研究室の協力を得て開発・改良を進めており、現在までに事象診断時間のバラツキが再現できるようになって

第5図 SEAMAIDの運転員シミュレータ内の情報処理

第6図 焦点記憶(FWM)内の情報量変化の例

第1表 CAMEOによるシミュレーション結果(認知裕度限界)

課題	インタフェースの種類		
	従来型	機能階層型CRT	タスク型CRT
LOCA	105	85	85
CVCF	95	95	95
TRP0	65	50	40
TRP2	120	110	110

LOCA: 1次系漏洩の判別、 CVCF: 充てん制御弁開固着の判別
TRP0: 補助給水ポンプ自動起動確認
TRP2: 補助給水ポンプトリップ検知

いる。今後も改良を重ね、人間信頼性データ(異常事象検知後の経過時間と事象診断未終了の割合との関係)の計算を試みる予定である。

3. 電力中央研究所における状況

(勘)電力中央研究所ヒューマンファクター研究センターでは、高度化・多様化する原子力プラントの中央制御室におけるヒューマンエラーの発生過程を解明し、その防止対策に資するため、個々の運転員の思考過程や複数の運転員から構成される運転チームの意思形成過程をモデル化する研究(前者をオペレータ行動モデル、後者を運転チーム行動モデルと呼ぶ)、また、これらを統合し、計算機上に構築したシミュレーションシステムをSYBORG (Simulation System for the Behavior of an Operator Group)の開発を行っている⁽²¹⁾⁽²²⁾。

(1) 思考過程のモデル化

(a) 運転チーム行動モデル

原子力プラントにおいて、運転員は役割分担(当直長、原子炉運転員、タービン運転員など)に応じて情報を処理し、行動する。例えば、原子炉運転員/タービン運転員はそれぞれ原子炉側/タービン側の制御盤情報を入手・処理し、当直長に事実関係の報告や操作に関する意見を具申する。当直長はこのような情報を各運転員から入手・処理することにより、チーム全体の動きを統括し、チームとしての意見を取りまとめる。本研究では、このような各運転員やチームとしての振舞いを勘案し、第7図のような運転チーム行動モデルを考えた。

このモデルは、リーダー(当直長)と2人のフォロア(原子炉運転員、タービン運転員)で構成し、それぞれが情報を認知・判断する。また、2者間の会話や役割分担決めはヒューマン・ヒューマン・インタフェース(HHI)モデルで行う。発話管理は話し相手に声を届けたり、プラントの状態に関する重要な情報を会話の当事者以外にも聞かせる機能を持つ。競合解消は、話し合う2人の間で対応策が異なる

場合、どちらか一方の対応策を選択する機能を持つ。また、役割分担は、仕事の割り振りを決める機能を持つ。

(b) オペレータ行動モデル

運転チーム行動モデルを構成する要素がオペレータ行動モデル(リーダーと2人のフォロア)である。このモデルは第7図に示すように、注意力、思考、動作(フォロアのみ)、発話の4つのマイクロモデル(MM)と短期記憶、中期記憶、長期記憶で構成する。各構成要素の機能は以下の通り。

- ・注意力MM： 外部情報(盤/音声情報)に対するフィルタとして働く。
- ・思考MM： 外部情報と中期記憶、長期記憶を基に、現在何が起きているかを理解し、メンタルモデルを作成あるいは更新する。
- ・動作MM： 動作意図(例えば、ある操作を行いたいなど)の実行や反射的な動作(警報が鳴ったら見るなど)を行う。
- ・発話MM： 発話意図(例えば、警報の内容を確認してほしいなど)の実行や反射的な発話(確認要求に対する返事など)を行う。
- ・短期記憶： 注意力MMモデルと思考MMの間にあり、外部情報に対するバッファの役割を果たす。
- ・中期記憶： 外部情報に基づき、運転員の状態予測(メンタルモデル)が格納される。メンタルモデルは新たなイベント(警報など)が発生するたびに更新される。
- ・長期記憶： 警報の種類や操作の内容・タイミングなどが格納される。

(c) 運転員のメンタルモデル

トラブル発生時に運転員が何を考えて行動するかを正確に知ることは難しい。しかし、シミュレータ実験とその後のインタビュー結果などによると、運転員は「将来を予測し、事態の悪化を防ぐような対応操作を行う」ものと考えられる⁽²¹⁾。そこで、本研究では第8図のようなメンタル

第7図 運転チーム行動モデルSYBORGの基本概念

モデルを仮定した。すなわち、警報レベルのイベント(Event 1)が発生したとすると、運転員は自分の長期記憶を利用し、思考MMでメンタルモデルを生成する。この中で、事象の原因は何か(Cause 1 または Cause 2)、何も対応操作をしなければ、事象はどのように進展していくだろうか(Event 2, Event 3など)と考える。ここで、各イベントに関連する状態量は一般に複数あり、このうちで最も関連の強いもの(重要なもの)を主要状態量と名付け、運転員はこれを監視する。このようなイベントと関連状態量との関係あるいはどの関連状態量を主要状態量とするかは個人の長期記憶に依存する。ここで、運転員が行う対応操作として2種類の対応(当面の対応、緊急対応)を考えた。前者は、「警報が鳴った時、事象緩和のためにとりあえず行う対応」、後者は、「次のイベントが起きないように主要状態量がランドマーク値(この値も各人の長期記憶に保持される)になった時に行う対応」と定義した。

以上のモデル化に対する考え方によると、各マイクロモデルや記憶はプラントの状況に応じ、臨機応変に起動しなければならない。そこで、本研究ではこのような複雑なシステムの記述に適した OMT (Object Modeling Technique)を用いてシミュレーションシステムを構築した。

(2) シミュレーション結果

簡易BWRプラント(電気出力約58万kW、発生マルファ

第8図 オペレータ行動モデルのメンタルモデル

ンクシヨン数約20)を用いてSYBORGの検証実験を行った。用いたマルファクションは「復水ポンプ後の配管漏洩」であり、モデル、エキスパート、学生それぞれのチームパフォーマンスを比較した。なお、このマルファクションは、漏洩により復水器ホットウエル(HW)の水位が低下し、何もしなければ原子炉スクラムに至る事象である。結果を第9図に示す。モデルと被験者の対応操作上の大きな違いは、復水器HW水位を回復させるために行う「復水補給弁開」操作のタイミングである。モデルチームは復水器低警報が出てから上記操作を行った。一方、エキスパートチームはこの警報が出る前に当該操作を行った。これはエキスパートチームが最初の警報(タービン建屋漏洩警報)が出た時点で復水器HW水位低警報を予想し、早めの対応

第9図 シミュレーション結果(復水ポンプ漏洩事象)

を取ったためである。このように、モデルチームは警報が出てから対応操作を行うため、操作が後手に回る可能性があり、この辺に本シミュレーションモデルの一つの限界(あるいは解決すべき課題)がある。なお、各警報発生後、モデルは設計通り所定の対応操作を行っている。また、問題解決(復水器 HW 水位低警報クリア)までの時間はエキスパートと学生の間であった。以上により、SYBORGの動作に関し、おおむね妥当なシミュレーション結果が得られた。

(3) 今後の展望

トラブル発生時の中央制御室における雰囲気(霧囲気)が、通常時と違うことは容易に想像できる。また、このような雰囲気が高じて運転員の判断や行動に影響した例⁽²³⁾も報告されている。したがって、トラブル時における運転員の思考過程や行動を正しく評価するためには、このような雰囲気や自分の内部状態が運転員に与える影響、その結果としてのエラー、ならびにトラブル体験による運転員の知識の強化(学習)などを人間が本来持っている機能としてSYBORGに取り込んでいく必要がある。当センターでは、これら「情動」、「エラー」、「学習」を「人間らしさ」と捉え、モデル開発の第2段階として、これら人間らしさのモデル化検討を行っている。

これらの中から、一例として情動について簡単に紹介する。本研究では、情動メカニズムの基本概念を提案し、それに基づくフィールド調査を行った⁽²⁴⁾。その結果、同じ状況下でもそれに対する運転員の認知が異なると、異なった情動が生起することが判明した。また、文献調査からは、情動が免疫機構に似た生体防御機能を持ち、予測の有無が情動の生起やその強さの主たる支配要因であることが判明した⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾。

以上の調査を踏まえ、本研究では、情動を生体の免疫機構とのアナロジーで捉えることとした。すなわち、運転員が遭遇する事態を「病原体」、事態に対する予測を「抗体」、抗体がない(ないし、少ない)場合に発生する病気(病原体が増殖する)を「情動」と考え、情動の生起過程のモデル化検討を進めている⁽²⁶⁾。

情動や学習は人間の認知や行動を支配する基本的な要素であり、エラーはその結果である。このような機能を持ったSYBORGを開発することができれば、中央制御室におけるヒューマンエラーを実際的な観点から評価する有力なツールになるものと考えられる。

4. 日本原子力研究所における状況

(1) 開発の目的と概要

原研では、ヒューマンファクタ研究の一環としてマンマシンシステム(MMS)の評価に関する研究を実施している。そのなかで、評価のためのツールとして計算機を用いたマンマシンシステム動特性シミュレーションシステムJACOS(JAeri COgnitive Simulation system)の開発を進めている⁽²⁷⁾。開発の目的は、異常時の対応においてマン

マシンシステムのパフォーマンスに影響を及ぼす種々の要因を解明するのに役立つ情報を提供できる計算機プログラムを開発することにある。このシステムは、マンマシンインタフェース(MMI)の特性、運転員が持つ知識などを解析条件として、異常発生時において運転員が行う状況の把握、対応策の決定などの認知過程のシミュレーションを目指している。これまでにシステムの原型版を作成した。作成したシステムは、異常時の原子炉システムの挙動をシミュレーションする原子炉モデルとそのときの運転員の認知的振舞いをシミュレーションする運転員モデルで構成される。運転員モデルは、人工知能技術を利用して新たなプログラムを開発した。原子炉モデルとしては、詳細熱水力解析コードRELAP5/MOD2⁽²⁸⁾とPWR簡易シミュレータの計算プログラムを結合したプログラムを作成した。前者が原子炉システムの主要な核熱水力挙動をシミュレーションし、後者がBOP、ECCS等の周辺部の挙動をシミュレーションする。

現在、JACOSの実用に向けた研究の一環として、同システムを事故時手順の評価に適用するための検討を進めている。

以下に現状の運転員モデルの構造、知識表現と探索法、認知特性のモデル化を中心に運転員モデルの特徴を概説する。

(2) 運転員モデルの概要

JACOSでは、原子炉システムに異常が生じた場合、それに対処する必要性を検知し、どのように行動するかを決める認知的振舞いでの情報処理プロセスの枠組みは、Rasmussenの梯子モデル⁽²⁹⁾を基礎としている。このプロセスを、黒板を用いた分散協調推論手法(黒板モデルと略す)を用いて計算機上に実装した。この推論手法では、スケジューラが推論を実行するエージェントおよび黒板上の知識の生成/消去を一元的に管理する構造になっている。これにより、一連の認知的振舞いを複数のサブタスクに分割し、個々のサブタスクでの情報処理を別々のエージェントに割り当て、スケジューラが各エージェントの実行順序を制御することで一連の認知過程をシミュレーションすることができる。また、黒板には、各エージェントの入出力結果が書き込まれるが、書き込み可能情報数に上限を設けるとともに、黒板に書き込まれてから一定時間経過した情報は消去(参照不能とする)することで、黒板を短期記憶領域としてモデル化した。また、エージェントが推論時に参照する知識を格納する知識ベース(KBと略す)は、長期記憶に対応する。

具体的には第10図に示すように、一連の認知プロセスを、「監視」、「状態同定」、「目標設定」、「タスク選択」、「手順選択」の5つから構成されるものとし、それぞれに対応するエージェントを作成した。個々のエージェントが利用する知識は、シミュレーションする認知行動の形態にあわせて、2種類の知識表現でそれぞれのKBに蓄えられ、推論

IV. ヒューマンモデルの新しい応用展開

1. 人間信頼性パラメータ推定への応用

第Ⅲ-2(2)項でのSEAMAIDシステムの紹介の中にあった、京都大学で開発中の診断エンジンは、“狭義のヒューマンモデル”の運転員モデルとして用いることができる。これはCRTベースのインタフェースを介して運転員が異常の検知と異常の根本原因を同定する過程の認知行動をモデル化するもので、G2でプログラム化されている⁽³¹⁾。この診断エンジンのモデル構成の概要を第12図に示す。その特徴は大略、以下の通りである。

- (1) マンマシンインタフェース(MMI)に表示されるプラントパラメータとこれの組合せで構成される異常仮説とをノードとし、ノード間のリンクで構成される異常仮説検証のための因果ネットワークを、プラントサブシステムごとに適当に分割し、異常診断知識ベースに蓄積(長期記憶に対応)
- (2) 頻度による賭(Frequency gambling)を記憶想起のメカニズムとして、MMI上のパラメータ選択と異常仮説の想起を行うと仮定
- (3) プラントパラメータおよび異常仮説のノードに主観的確信度を与える。各仮説ノードの確信度は、各プラントパラメータに対するメンバシップ関数から、ファジイ論理で求める。

Wuらは、実験室規模のプラント異常診断模擬実験⁽³³⁾の被験者データ(被験者はメーカの原子力プラント制御技術者)をもとに、原子力のプラントPSA/HRAに用いる人間信頼性パラメータであるHRA曲線(Human Cognitive Reliability Curve: 人間の認知信頼性の時間依存性曲線、いわゆる時間-信頼性トレードオフ)について、実験データから導出したHCR曲線と、診断エンジンをプラントシミュレータに接続したシミュレーションによるHCR曲線とを比較している⁽³¹⁾。この実験とヒューマンモデルによるシミュレーションの対比の1例を第13図に示す。これは、PWRの加圧器制御系異常の場合で、図中の横軸は、同一事象について、異なった被験者、あるいは同じ被験者の異なった試行から得た、異常を検知してから、その異常の根本原因を正しく同定するまでの時間を、元の実験デー

第12図 診断エンジンの構成と処理フロー

第13図 HCR曲線の実験と診断エンジンによる計算との比較

タとして、これを各実験データのメディアン(この単位は時間で正規化したものである。また、縦軸は非対応確率、すなわち非信頼度に相当する。このHCR曲線の勾配が急なほど、誰がやっても、また同じヒトが何度試行しても同じ結果を示し、一方、この勾配が平坦に近いほど、ヒトにより、また、同じヒトでも試行のたびに結果が変動することを意味する。第13図での勾配の比較より、診断エンジンによるシミュレーション結果は、実験で観察される変動性を比較的再現している。この場合、人間行動のランダム性は、(a)プラントパラメータの確認頻度やその順序の相違、(b)パラメータの異常兆候から想定される複数の異常仮説をいずれから検証し始めるかの相違、(c)一つの仮説成立の確認後に他の仮説の成立も確認する慎重さの有無、などの要因で生じるが、診断エンジンを用いて、このような変動性を入れたモンテカルロシミュレーションにより、実験データの傾向を再現できることを示した。この研究は、診断エンジンの実験検証の側面もあるが、このようにヒューマンモデルで人間信頼性解析用パラメータが推定可能な見通しを初めて示したものだといえる。

2. 音声認識を用いた認知過程推定

第Ⅱ章の第1図に示した枠組み中の、ヒューマンモデルに関わる情報行動計測の研究事例に移る。情報行動の計測では、機械がヒトの内面過程をどれだけ追跡推定できるかが課題になる。

高橋らは認知課題試行中の、被験者の複数生理指標(心電図、皮膚電位、呼吸曲線など)を同時オンライン計測し短時間波形の特徴的変動をもとに、ニューラルネットで認知状態をリアルタイム識別して、ヒトの内面状態が、(a)情報受入れに集中、(b)思考に集中、(c)行動開始の意思決定、のいずれかを区別可能な見通しを示した⁽³²⁾⁽³³⁾。また、最近、黒岡らは脳波解析により、ヒトの問題解決過程で、(a)正解にたどりついたか、(b)解決の糸口は掴めてもなかなか正解にたどり着けないか、(c)皆目、解決の糸口すら見えない、が識別可能なことを示した⁽³⁴⁾。

しかし、生理指標の計測では、認知行動時の心的状態の区分は可能としても、具体的に「何を考えているのか」はわからない。また電極を多数張り付けるのはヒトにとって負

担である。

そこで、音声認識装置を用いて、ヒトの発話から「何を考えているか」を推定する実験研究を、最近、小澤らが行っている⁽³⁵⁾。プラント異常診断知識の体験型CAIを目標とするもので、音声認識装置、異常を発生させるプラントシミュレータと接続した教示用インタフェースで構成する。訓練生がインタフェース上のパラメータ変化を調べながら、選択したパラメータの変化具合の判断を話すと音声認識装置が発話認識し、訓練生の選択したパラメータの履歴と、それに対する発話が、(ヒューマンモデルとしての)「認知過程推定器」に取り込まれ、解析されて、訓練生がどの程度、異常の根本原因を絞っているかを、時々刻々、推定する。このヒューマンモデルは、第IV-1節でのWuらのモデルと同様な、プラントパラメータ間の因果ネットワークを基本に、インタフェース上で訓練生が選択したパラメータを注目しているパラメータとし、次いで選択したパラメータに対する異常仮説の確信度を発話形式から推定する。すなわち、ヒトの操作や発話がヒューマンモデルの入力となり、「何を考えているか」を推定して出力する、オンライン型のモデルである。最近の音声認識装置の急速な進歩を考えると実現も困難でないが、知的CAIとしては、その推定結果に応じヒトに適切なアドバイスを返す機能が必要である。

3. 保守作業への応用

保守作業への応用では、第III-2(2)項に紹介したSEA-MAIDでプラントシミュレータを外したシステム(DIAS)がある。中川らは、原子力発電所変圧器保護リレー盤の室内配置および操作パネル盤の改造に、実際にDIASを使用した⁽³⁶⁾。これは、保守作業手順をベトリネットモデル化して、保守員の作業時の動きを忠実にシミュレーションし、その過程のヒューマンエラーの可能性をエラー確率、エラーをした場合のプラントへの影響を多角的に評価するものである。原子力発電所だけでなく一般プラントには多数の保守用操作盤があるが、これまで特に有効なヒューマンエラー防止対策がされているわけでないので、DIASのような方向は産業応用が多いものと思われる。

原子力発電所の保守作業では、機械システムの定期的分解点検が義務づけられており、原子力発電所機器の保守点検技術の訓練が、保守訓練センターで行われている。プラントには定期点検の対象機器の種類と数の多いことから、それぞれ異なった機器の構造理解、分解・組立手順の修得用にVRシミュレーションによる疑似体験型訓練が有効として、VRを用いた機器の保守訓練システムが提案されている。石井、山本らは、保守作業での「ヒトと機械のインタラクション」のモデル表現法としてベトリネットモデルを応用している⁽³⁷⁾⁽³⁸⁾。現状のVR技術ではリアルな力覚や触覚のフィードバックが実現困難で、感覚的なスキルの訓練には限界があるとの指摘もあるが、実作業前のリハーサル訓練、分解点検につきものの異常箇所の同定、原因究明の各

種検査機器の取扱い方などの修得、離れた場所間の連携作業の訓練などに、VRシミュレーションの活用は有効であろう。

V. 結 び：産業応用へ期待と課題

以上、最近の原子力ヒューマンモデルの研究開発の進展を、我が国の代表的事例を中心に、その目標、方法、その進捗度と将来展望を述べた。最後に、今後の産業応用の観点から、原子力ヒューマンモデル研究開発の全般を通じて、ヒューマンモデルの分類、マンマシンシステム評価への技術課題、モデル検証について述べる。

原子力分野のヒューマンモデル研究は、プラント制御室の運転員あるいは運転クルーを対象にしたモデルに止まらず、保守分野などへも広く展開されている。ヒューマンモデルは、様々な分類が可能であるが、産業応用の観点からは、静的モデルと動的モデルとに区分できる。

静的モデルは、各種の作業環境下で観察される人間(運転員、作業員など)の行動を分類し整理したモデルであり、例えばラスムッセンの提唱した運転員の3つ(スキルベース、ルールベース、知識ベース)の行動モデル⁽³⁹⁾などが該当する。このような静的モデルは、マンマシンシステム設計の概念的な枠組みを決定する初期の段階で応用可能である。例えば、前記した運転員の行動モデルは、原子力プラントの自動化範囲とそのレベル、CRT表示装置等を含む中央制御盤への提供情報の内容、運転支援情報の内容などの決定段階で参考となる。また、保守作業現場における作業員の行動形成要因を分類・整理した結果などは、いわゆるヒューマンモデルとはいいがたいが、人的過誤防止の観点から、現場機器の設計やその配置などへの知見として利用できる。

他方、動的モデルは、運転員の認知モデルに代表されるように、人間の認知行動をモデル化したものであり、例えば第III章で紹介されている多くの研究事例が該当する。これらの動的モデルは、プラントダイナミックスのシミュレーションモデルおよび、マンマシンシステムの設計データベースと結合し、設計されたマンマシンシステムの評価に應用することが期待される。例えば、中央制御室の新しい制御盤の設計・評価では、最終段階においてプラントシミュレータを利用して、実機運転員によるユーザビリティ評価を行うことがあるが、時間的制約から評価ケースを絞り込む必要が生ずる。これらの段階で上記の動的モデルを効果的に導入できれば、評価の範囲・深さは大幅な向上が期待できる。

評価可能な範囲は、一般的には、プラント運転の大半を占める通常時(起動・停止時を含む)、および希ではあるが短時間に的確な判断と対応が要求される異常時・事故時とが含まれる必要がある。

評価内容としては、①CRT等の表示装置・操作スイッチなどを含む制御盤の空間的な配置とワークロードとの関

連, ② 運転操作手順とプラントパラメータへの影響, ③ プラント警報・プロセス状態情報・運転支援情報など提供情報の範囲・内容・表現形態・タイミング等と運転員の状況認識能力との関連など, が定量的に把握可能となれば, ヒューマンモデルの適用範囲は, 大幅に拡大されることが期待できる。

次に, ヒューマンモデルをマンマシンシステムの評価に応用する上での技術課題について述べる。

まずは, モデル化範囲の拡大である。現段階では, 小規模の設計評価に応用されつつあるプロトタイプは存在するが, 実機設計の評価に応用可能な本格的な認知モデルは, 今後の開発に期待するところが大きい。

次には, 認知モデルの対象者の拡大である。認知モデルの開発対象は, まずは運転員個人であろうが, いうまでもなく運転クルーは, 複数の運転員で構成された集団であり, ベテラン・若手が存在し, これらの中には管理上の階層関係も存在する。したがって, これらの関係・成員の特性を含む, 現実的な集団を対象とした認知モデルの開発が望まれる。

最後は, 開発したヒューマンモデルの検証である。開発したモデルが, どの程度実際の運転員の認知的な振舞いを模擬できているかを, 実証することが必要である。吉川, 古田が指摘⁽¹⁾しているように, ヒューマンモデルの検証には, 物理的モデルの検証とは異なる多くの困難が伴うが, まずは小規模でも特定の分野を対象にして実証することが, 重要な課題ではなかろうか? 検証とモデル改良を重ね, モデルの有効性を示し, 段階的に対象領域を拡大していくことにより, 順次実設計評価への応用が普及していくものと期待される。

— 参 考 文 献 —

- (1) 吉川榮和, 古田一雄: 原子力誌, 36 (4), 268~278 (1994).
- (2) Corker, K. M.: *Proc. ANS Topical Meeting on Nucl. Plant Instrumentation Control and Man-Machine Interface Technol.*, Knoxville, (1993).
- (3) Furuta, K., Kondo, S.: *Int. J. Man-Machine Studies*, 39 (3), 473 (1993).
- (4) 古田一雄, 他: ヒューマン・インタフェース研究論集, 4 (2), 91 (1995).
- (5) 古田一雄, 他: 原子力誌, 38 (1), 65 (1996).
- (6) Furuta, K., et al.: *Proc. Int. Conf. on Probabilistic Safety Assessment and Management*, Crete, Greece, 15 (1996).
- (7) 古田一雄, 吉村誠一: *Human Technol.*, 1 (8), 121 (1997).
- (8) 古田一雄: 人工知能誌, 13 (3), 20 (1998).
- (9) 古濱 寛, 他: 第12回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論集, 329 (1996).
- (10) 芦阪直行: “意識とは何か”, 岩波書店, (1996).
- (11) Suchman, L.: “*Plans and Situated Actions*”, Cambridge Univ. Press, (1987).
- (12) 海保博之, 編: “プロトコル分析入門”, 新曜社, 58 (1993).
- (13) 古田一雄, 他: 人工知能誌, 13 (5), (1998).
- (14) 古田一雄: *Human Interface N & R*, 12 (4), 443 (1997).
- (15) Fujita, Y., et al.: *Proc. PSAM-II*, San Diego, USA, 20~25 Mar, 1994, Vol.2, p.060-13 (1994).
- (16) G2 リファレンスマニュアル, 伊藤忠テクノサイエンス, (1993).
- (17) Sakuda, H., et al.: *Proc. 1996 ANS Int. Topical Meeting on Nuclear Power Plant Instrumentation, Control and Human-Machine Interface Technologies*, Pennsylvania, USA, 6~9 May 1996, p.1167 (1996).
- (18) Yoshikawa, H., Nakagawa, T., Nakatani, Y., Furuta, T., Hasegawa, A.: *Contr. Eng. Practice*, 5 (3), 417~425 (1997).
- (19) 中川隆志, 他: 計測自動制御論集, 33 (8), 834 (1997).
- (20) Reason, J.: “*Human Error*”, Cambridge Univ. Press, (1990).
- (21) 吉村誠一, 高野研一, 佐相邦英: 計測自動制御論集, 31 (2), 227~235 (1995).
- (22) 吉村誠一, 高野研一, 佐相邦英: 計測自動制御論集, 31 (10), 1754~1761 (1995).
- (23) 柳田邦男: “恐怖の2時間18分”, 文芸春秋, 50~53 (1983).
- (24) 長谷川尚子, 吉村誠一: 原子力プラント運転員の情動が認知行動に及ぼす影響, 電中研調査報告, S97001, (1997).
- (25) 吉村誠一, 長谷川尚子: *Human Interface N & R*, 12 (4), 469 (1997).
- (26) Hasegawa, N., Yoshimura, S.: *Human Machine Cooperation for Emotion Support*, *Trav. Humain*, to be published.
- (27) Yoshida, K., et al.: *J. Nucl. Sci. Technol.*, 33 (2), 110 (1996).
- (28) Ransom, V. H., et al.: *NUREG/CR-4312*, (1985).
- (29) Rasmussen, J. (海保博之, 他訳): “インタフェースの認知工学”, 啓学出版, (1990).
- (30) Lind, M.: *Riso-M-2357*, (1982).
- (31) Wu, W., Nakagawa, T., Yoshikawa, H.: *Proc. Int. Topical Meeting on Safety of Operating Reactors*, Oct 11~14, 1998, San Francisco, p.79~86 (1998).
- (32) Takahashi, M., Wu, W., Yasuta, A., Yoshikawa, H., Nakatani, Y., Nakagawa, T.: *Proc. Cognitive Systems Engineering in Process Control*, Nov.12~15, 1996, Kyoto, p.26~33 (1996).
- (33) 高橋 信, 北村雅司, 吉川榮和: 計測自動制御論集, 30 (6), 548~562 (1994).
- (34) Kurooka, T., Kisa, M., Yamashita, Y., Nishitani, H.: *Proc. 7th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symp. on Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Systems*, Sep.16~18, 1998, Kyoto, p.539~544 (1998).
- (35) 小澤尚久, 下田 宏, 吉川榮和: 音声認識を用いた認知状態推定手法のリアルタイム化, 電気学会研究会資料, NE-98-16, (1998).
- (36) Nakagawa, T., et al.: *Proc. 7th Int. Conf. on Human-Computer Interaction (HCI International '97)*, San Francisco, California, USA, p.233~236 (1997).
- (37) 石井裕剛, 手塚哲央, 吉川榮和: 第14回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論集, p.479~484 (1998).
- (38) 山本倫也, 市口誠道, 三谷拓也, 手塚哲央, 吉川榮和: 第14回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム論集, p.453~458 (1998).
- (39) Rasmussen, I.: *IEEE Trans. SMC*, SMC-13 (3), 257 (1983).