

原子力発電所におけるヒューマンファクター 特にマンマシンインターフェースや 高度情報処理技術の原子力産業への適用

Human Factors in Nuclear Power Plant
with Focus on Application of Man-machine Interface
and Advanced Data Processing Technologies to Nuclear Power Industry

北村 正晴 (Masaharu Kitamura)¹

要約 大学においてヒューマンファクター (Human Factors) に関わる研究を行っている研究者と原子力安全システム研究所の技術システム研究所の原子力発電に経験の深い技術者との間で、両者の実りある相互作用を目指して進められてきた協同研究について報告する。取り上げた課題は(1)原子力プラントの事故時における対応、(2)保守支援のためのシステム、(3)原子力プラントの安全機能、(4)マン・マシンインターフェースのユーザ参加による設計、(5)いわゆるナチュラリスティックデザインメイキングの現場への適用、及び(6)観測データからの法則の発見であって、多岐にわたる研究が行われている。

Abstract We discuss issues involved in a collaboration that has been promoted between university-based researchers who work on human factors and experienced engineers engaging in nuclear power generation in the Institute of Nuclear Technology of the Institute of Nuclear Safety System, Inc., aiming at the productive interaction of both. Issues discussed include: (1) measures taken at the time of an accident in nuclear power plants; (2) system for supporting repair and maintenance; (3) safety function of nuclear power plants; (4) design of man-machine interface by user participation; (5) application of so-called naturalistic decision-making on site; and (6) discovery of rules from observed data. Diversified research is under way.

1. はじめに

(株)原子力安全システム研究所 (INSS) の技術システム研究所に「ヒューマンファクター研究会」が平成7年に開設されてから今日に至るまで、大学においてヒューマンファクターに関わる研究を行っている研究者と技術システム研究所の原子力発電に経験の深い技術者との間で協同研究が進められてきた。

原子力発電所におけるヒューマンファクター (特にマンマシンインターフェースや高度情報処理技術の原子力産業への適用) に関する諸問題の研究は電

力会社、原子力プラントメーカーやエンジニアリング会社、大学及び国立研究機関等で行われてきた。しかしながら従来の研究開発においては、現場での応用を目指す電力会社及びメーカー側における研究と、基礎的研究を指向する大学等の研究の間には無視できないギャップがあって、両者の協調関係は必ずしも十分とはいえなかった。

本研究は、大学等の研究者には発電所の現状についての的確な認識を、電力会社の現場技術者には最新の研究の理解を求め、両者の実りある相互作用のもとに、原子力発電技術の向上を促すことを目的としており、従来、各機関でなされてきた研究の枠組

¹ 東北大学 大学院 工学研究科

みを超えた特色ある成果が期待される。

2. 事故時の対応について

2.1 原子力プラントの安全確保（特に事故時における対応について）

大谷昌徳（INSS 技術システム研究所）

この報告の重点は電力会社が 2000 年度を目標に整備しているアクシデントマネージメント（Accident Management）を含む事故時の運転操作・対応の説明である。

原子力プラントにおいては決定論的手法によって、多重障壁を設け、機器に多重性を持たせて安全確保を図っている。すなわち、燃料ペレット、燃料被覆管、原子炉の圧力バウンダリー、それから格納容器という形で多重障壁を設けて放射能を閉じこめている。燃料から放射能が外部に放出されないように、さらに最終的には燃料から放出されても放射能が格納容器内に閉じこめるという考え方である。先ず、燃料の被覆管が破損しないようにし、さらに、万一事故が起こっても燃料で構成されている炉心が損傷しないようにする。

平成 4 年に原子力安全委員会から、「・・・これらの諸対策によってシビアアクシデントは工学的には現実には起こるとは考えられないほど発生の可能性は十分小さいものとなっており、原子炉施設のリスクは十分低くなっていると判断される。アクシデントマネージメントの整備はこの低いリスクを一層低減するものとして位置付けられる。したがって、当委員会は、原子炉設置者において効果的なアクシデントマネージメントを自主的に整備し、万一の場合にこれを的確に実施できるようにすることは強く奨励されるべきである」との強い要望があった。それを受けて、電力会社は 2000 年度までにいわゆるアクシデントマネージメントを整備し、それを実施する体制を整えようと努力しているところである。

さて、決定論的手法では、ある特定のシナリオを考え、それに対応する時間的な余裕があるかどうかを検討し、時間余裕がないものについては自動化す

る。時間余裕があれば運転員の操作に頼ってもよい。

運転員が自ら認識して判断して、何らかの対応をするのに見込む時間余裕は、10 分を目処にしている。ドイツの例では、30 分としている。反応度事故に対しては、当然、炉心の固有の特性で、すなわち反応度の negative feedback で事故を終結させる。いわゆる設計基準事象に当たるものについては、自動化と運転操作のミックスで当たる。アクシデントマネージメント整備の対象となっているシビアアクシデントは、設計想定で考えているものに比べると時間余裕がもっと多い。つまり、炉心が空だきになって炉心が崩壊する事象は、1 時間あるいは 2 時間かかって溶けるので、運転員操作に頼る。運転員以外の人的なリソースには必ずしも頼らない。最後の障壁である格納容器にいたっては、数万立米の体積を持つので、はるかに時間余裕があり、1 日ないし 2 日程度の時間を要して損傷に至る。

現行のマニュアル類では、比較的速い事象で軽度のものに対しては、当然、中央制御室の運転員だけで対応する。丹羽主任研究員の研究している事故時手順書の表示システムはこの領域を対象としている。現在整備済みの事故時の手順書でも、炉心損傷防止に多少触れている。今回は、更に炉心損傷が起こった後も含めて手順書を整備するために、制御室に対しても支援組織に対しても何らかのガイドラインを用意することになっている。

安全注入系が働くような規模の事故を想定すると、破断箇所から水がどんどん出ていくが、最終的には安全注入系及び高圧注入系が作動して、炉心は冠水し冷却されて、それ以上の大事には至らない。設計基準事故ではそのようなシナリオで評価することになっている。

シビアアクシデントの場合には一次及び二次冷却系が機能を失い、格納容器内で複雑な事象が起こる。炉心が溶け、原子炉容器の底へ崩落し、容器の底が抜けて落ち、溶けた炉心とコンクリートの反応が起こって放射性物質を含むエアロゾルが発生する。そこにも水があれば水蒸気爆発が起こる可能性もある。また、炉心が溶ける過程において、ジルコニウムが水蒸気と反応して水素ガスが出る。格納容器に対する負荷としては、発生した水蒸気による加圧に

加えて水素ガスが爆発的に燃焼する。格納容器が破れるとチェルノブイリ事故のように外部に放射能が放出される。格納容器を守るために水蒸気を冷やして取り除こうとすると水素の分圧が上って水素ガスの爆発が起こる状況になるかも知れない。このように現象が複雑に絡む。

現在検討中の、設備の変更を含むアクシデントマネジメントの方策は次の 11項目から成り立っている。

1. タービンバイパス系の活用
2. 代替再循環
3. 格納容器内自然対流冷却
4. 代替補機冷却
5. クールダウン及び再循環
6. 緊急 2次冷却系の多様化
7. 格納容器内注水
8. 格納容器内液相部への蓄熱
9. 1次系の強制減圧
10. 水素の計画燃焼（大飯 1，2号炉のみ）
11. 号機間電源融通

アクシデントマネジメント整備に当たっては、従来の手順書との整合性を考慮する必要がある。非常に複雑なことを扱うので、支援組織にはガイドラインを与えねばならない。実際に監視するのも、例えば格納容器内の圧力・温度とか、損傷炉心の状況であるとか、水素ガスの濃度であるとか多岐にわたる。格納容器スプレーが使用できなければ消火水をスプレーに用いる。その場合、格納容器内の水位が高くなりすぎると、安全系の機器が浸水するので、注入に当たっては水位を監視する必要がある。状態量等の監視に当たっては、コンピュータを活用するほか、補修グループからの連絡も必要である。また一方、中央制御室も同時に監視しているから、密接な連絡を取らねばならない。必要な操作方法を見つけ、操作すべき段階に至れば、それについて総合評価を行う。総合評価にあたっては、良い効果と悪い効果を総合的に見て判断し、中央制御室に操作指示を出す。ただし、時間的余裕がなく、到底格納容器を守り切れない場合には、中央制御室は支援組織の指示を待たなくてよい。シビアアクシデントが起こっている状況下では、国等の緊急助言組織も出てくるであろうから、そこからの指示もあると思われる

が、電力会社としては自らの責任で事象を終結させる義務があるので内部で完結するシステムを採用することにしている。

このガイドラインには判断に必要なデータベースを用意している。INSSでもそのようなデータベースのより一層の充実を図るべく解析を実施している。アクシデントマネジメント整備完了の目標は 2000年であるが、個々のプラントについては、定期検査ごとに、必要な工事を進めているので、すでに整備が完了しているプラントもある。

2.2 Recognition Primed Decision Making の事故時人間評価への適用

榎木哲夫（京都大学 大学院 工学研究科）

大谷昌徳（INSS 技術システム研究所）

1. 問題点（大谷）

まず背景として、原子炉の炉心が溶けるようないわゆる苛酷事故の対応を考える。非常に低頻度の事故であるから、経験した人はいない。使える資源も当然限られている状態において臨機応変の対応が必要になる。水素爆発など複雑な現象が非常に短い時間に集中する可能性もある。電力会社においてはアクシデントマネジメントのためのガイドラインを整備しつつあるというのが現状である。

実施する体制としては、従来の中央制御室だけで実施する手順書に基づく運転操作ではなく、別途支援組織により状態を監視し、その結果から先を予測して判断し、中央制御室へ操作の指示を出す。その形自身が Recognition Primed Decision Making (RPDM) に似ている。

実際に経験できないことに加え、万一起こった時には精度よく対応しなければならないのでガイドラインは作っても、教育とか訓練を通して常に実用的で実践的な改善を心掛ける必要がある。しかしながら、現実の事故には幅があり、それを出来るだけ網羅した形で考えねばならないので、今回の研究を通して、できるだけ定量的に改善の効果を把握する手法を見出せないかと考えている。すなわち、この研究は、このような困難な問題、特に意志決定の問題の解決を究極のターゲットとしている。

2. 対策（榎木）

工学研究では、Recognition Primed Decision Making の仕組みを意志決定支援システムあるいはそのエージェントを称する推論エンジンとして使っていくという意味は薄く、むしろ熟練者の実時間意思決定の仕組みを説明するためのモデルとしての位置付けから、人間の働きをより確実なものにするために支援し、環境を整備するという視点での研究が行われるのである。

支援組織からアクシデントマネージメントを実施するための具体的な指令が中央制御室に送られるのであるが、それは非常に過酷な状況下での緊急性（多くの場合心理的なもの）が要求される。その緊急性をどう理解するかというのが共同研究の課題である。まずフィンランドの研究者 Pyy 氏が提唱する意志決定分析の方法を使ったアクシデントマネージメントの評価を説明しておく。Pyy 氏の研究は事故の発生から炉心損傷が起り、さらに格納容器の損傷に至るまでに、必要な処置をするのにどれだけの時間が確保できるか、あるいは保証されるか、を分析する研究である。我々は、支援組織及び中央制御室にとっての緊急性とは一体何か、もう少しリアルスティックに検討したのである。

事故の原因になる事象が発生してからある時間が経過して始めてその兆候が観測される。いくつかの兆候を集めて、どの程度critical であるのかという緊急性を支援組織及び中央制御室に対して的確に知らせられるような支援を考える。これが状況認識 Situation Awareness の支援という対応である。現時点における緊急性は、いったん過去にさかのぼって何時、そしてなぜ異常が発生したのか、どんな異常が発生したのかを確かめ、このまま放っておけばどうなるかということ的確に projection した上で認識される。とかく今までは緊急性を認識させるには警告を発すればそれでいいという、非常に事象駆動的な支援の設計という視点が強かったが、むしろ長い時間の文脈の中で、現時点における緊急性を認識させるには、どのタイミングで、さらにどのような種類の警告として提示すればよいかを問題にする。

実際に決定を行う機構のモデルの仕掛けを説明する。プラントの監視結果から、現在適用可能なアクシデントマネージメントの候補が代替案を含んだ形

で考慮される。そして、監視パラメータは真の状態に対して実際に観測される兆候を表す変数である。これらの監視パラメータに基づいて利用可能なアクシデントマネージメントのどれを適用するのがいいかを定める。実際のモデリングの詳細は INSS が担当している。

2.3 Post Trip Monitor の概念設計について

川辺康晴（INSS 技術システム研究所）

Post Trip Monitor の概念設計についての京都大学エネルギー科学科吉川研究室との共同研究の概要を述べる。

この研究の背景は次のとおりである。原子力発電所では運転員は事故時に速やかな対応が出来るように訓練されてはいるが、事故は予期していないときに突然起こるので、その時には運転員に強いストレスがかかる。特に、緊急停止直後には、運転員はまず警報や主要なパラメータを確認し、そこから事象を同定する。その結果、該当する手順書を探索し、それに基づいて事故時の運転操作を実施することになる。このときストレスを緩和し、運転操作の負担を軽減することによって事故時運転操作の信頼性の向上を図る目的で、この Post Trip Monitor の研究開発を計画したのである。具体的には、機械が自動的に事象を同定し、それに対応する手順書を表示させるものである。INSS では、既に手順書表示の機械化に着手しているので、この研究では事象同定の自動化を進めることになる。

本研究のアプローチとしては、熱水力解析データを利用した支援を考えている。これは従来、設計時等に安全解析に用いられて来た熱水力解析データを、事故時の運転員支援に活用するものである。使用する熱水力解析コードは RELAP5 である。このコードはプラントの熱水力挙動を詳細に計算することが出来る。これを用いることによって従来以上に詳細に事象を同定することが可能であると考えている。どれぐらいの規模で、どこで起こっているかを含めて事象同定できるよう研究を進めている。詳細に事象が同定できれば、当然、その後の事故収拾作業の計画が立案しやすくなる。

Post Trip Monitorにおける基本的な、事象同定のための基準としては実機プラントの設計データから作成した警報データとプラントのプロセスパラメータを使うことにしている。警報データとはコードのデータの中でしきい値や論理演算などによって設定されたもので、発信した警報の番号（便宜的にふった番号）と発信時刻をログファイルに出力したものである。プロセスパラメータはプラントの物理量及び制御信号を計算したものである。発信する警報をその組み合わせ及び時系列パターンの2種類のデータとして捉え、事象同定に役立てることを検討している。

基準と実際の信号との比較で、機械に事象同定を行わせるのである。その基となるべき、主要計装情報については2種類の方法を検討している。一つは記号とパターンマッチングによる方法で、約30種類の主要なプラントパラメータに対し図形の特徴を記号化して、データベース化する。いま一つは周波数パターンの特徴を捉えてマッチングをとるものである。安全解析コードにより事前に解析したものに対して、離散化し記号化したデータベース及び周波数領域に変換したデータベースを構築する。警報に対してはニューラルネットワークを製作する。プラントで事故が起こった場合には、プロセスパラメータと事前に準備しておいたデータベースとをパターンマッチングし、事象同定を実施する。

運転員が事象同定に活用している情報である警報パターン、警報名、警報の発信時刻に着目し活用する。オフラインで準備しておいた警報データとニューラルネットワークによる事象同定の方法をも検討中である。この研究においては熱水力解析データを用い、前述の警報番号と発信時刻の組み合わせのデータベースを作っている。現在、約150のケースについてデータ処理中である。

最後に、事象同定の結果を総合的に評価し、最終的な事象同定を行う。その事象同定結果に対応する手順書を運転員に表示することによって事故時の運転を支援するのである。

2.4 原子カプラントの自動化レベル

稲垣敏之（筑波大学 電子・情報工学系）

原子カプラントで異常が起こったときの手順書を改善すべきであるとするれば、どういうところから改善すべきか、又、ある現象が起こったとき、その現象に基づいて、定められた手順を遂行する際に、人間の負荷はどのように時間的に変化していくかを問題にする。限られた時間内にその手順を終わらねばならない。若しも途中で予期しないことが起こったときに、その手順を遂行するのがどれくらい遅れる可能性があるか？その過程で人間を支援するのは、情報処理の部分と決定操作の部分とされているが、それぞれをどのように支援するのか、それを自動化のレベルという観点から考える。例えば、大量の情報があって、それを全部コンピュータで処理し、現在何が起きているかということ人間に提示するというのは情報処理の段階で自動化のレベルが高い。その上で、判断あるいは行動に結びついて行く。しかし、情報処理の部分と制御の部分とを分離して議論してよいとは限らない。これは、双対制御（dual control）の考え方、すなわち、同定と制御を完全に分離したものと考えないことにも似通っている。

基本的に全部人間がやるべきものとして手順が定められている場合を想定すると、時間経過につれて、どのレベルで、どの時点で、どれ位の負荷のピークが人間にかかりうるかが問題となる。その場合に、もしもどこかの部分に自動化システムによる支援を導入すれば、人間の負荷をどれだけ減らすことが出来るかが考察の対象となる。しかし、自動化システムに故障が起こったとすると、人間がそれに対応しなければならぬ。そのことによって却って人間の負担が増えることも考えられる。

これらの問題を検討するためのモデルを作成中であるが、今日の時点ではまだ完成していない。かなり難しいということが実は分かってきた。それで、正常時と非常時のうち、今回は非常時を考えることとする。別の文脈で、実は正常時と非常時を対比させて考えるのが私自身の目的で、操作の時系列をネットワークの系列で表現することを検討中である。

あるタスクを完結させようとするとき、人間はどのタイプの計器を使って、幾つぐらいの量をモニターしなければならないか、もしも状況の判断が困難な事態が生じた時、その困難を克服するために更になにをすべきかが問題である。基本的なタスクが成功しなかったら「何をすべきか」というタスクをその中に埋め込む。また、プラントが何らかの理由でオペレータが期待している挙動を示さなかった場合にも同様の処置をする。人間が状況を認知し、判断して操作するには確率的に必要な時間をモデルに取り入れてみたいと考えている。現在は人間がしている手順を、近い将来どのようなタイプの自動化に切り替えることが可能かを検討する。

上記の研究をコンピュータ・シミュレーションでやる理由は次の通りである。一般に、ヒューマンマシンシステム研究における実験は、被験者を用いて行う。しかし、ヒューマンエラー発生状況のすべてが認知実験で適切に再現できるとは限らない。例えば、事象事例を解析していると、パイロットやオペレータの警戒心が欠如していたために状況認識が喪失されたケースが見られるが、実験に際して、「今回は警戒心が欠如した状況で対応するようにしてほしい」と被験者に要請することは不自然であり、実現も困難である。人間の警戒心が欠如していると、おそらく状況の認知が少し遅れるであろう。認知が遅れるだけではなく、何が起きているかという判断も遅れるかもしれない。このような状態にあるときに異常が発生すると、それへの対応はどのように行われ、どのような負担がかかり、どのようにエラーが発生するか、などを再現するひとつの方法として、コンピュータ・シミュレーションが有用であろうと認識している。

人間への支援を行う上で、自動化システムをタスク系列のどこの部分に入れるかについては、比較的簡単にプログラムで書くことができる。また、自動化システムのプロトタイプを作ることなく、その自動化システムの有効性を解析・評価することもできる。しかし、問うべき問題は、人間のワークロードの時間的推移である。もしもワークロードが高くなりすぎている時点（あるいは低くなりすぎている時点）があるとすれば、そこで様々なヒューマンエラーの発生やタスク達成上の不都合が生じうる。そ

のような時点でのワークロードを下げようとする（あるいは適正なレベルまで上げようとする）なら、それは自動化システムの設計にどのように反映されなければならないかが重要な問題であり、それへの示唆を与えることができる手法に高めるべく、検討を続けている。

3. 保守支援システムに関する研究

3.1 INSS における保守支援関連研究の現状

花房英光（INSS 技術システム研究所）

東海発電所の1号機の運転が開始された 1966年から 1996年までの31年間に国内で発生した 885件の報告対象事象の分析が電力中央研究所で行われ、その結果が5月に報告された。それらのうちヒューマンエラー（HE：Human Error）を含むものは193件で、エラー行為の発生した作業は「保守」が約6割、「運転」が約2割で、「締め付けトルクの管理の不備」や「誤接続・誤配線」などの些細なエラーが多かった。ユニット・部品の取り違いや運転操作・手順の誤りが最近、増加の傾向にある。

以下 INSS における保守支援の研究について述べる。先ず、昨今の原子力発電所における保守作業の現状は次の通りである。電力会社の保守部門は、保守作業を統括会社に請負わせ、統括会社は協力会社に委託請負契約し、さらに、協力会社の下に一次・二次の孫請け会社等があって、実際の作業はその末端の部分で行われている。また、電力会社においては多数の担当部門の間で連絡をとりながら、点検工事を行っており、その場合、電力会社の保守員が直接作業をする機会は殆どない。

保守に関しては次の3項目を重要問題としている。

1. 教育訓練：臨場感の備わった保守作業の教育訓練の支援
2. 技術力の継承：熟練技術者のノウハウを継承するための支援
3. HEの低減：タスクエラーの評価及びコミュニケーションエラーの分析

以下、各項目について具体的に述べる。

1. 教育訓練の支援

関西電力の場合、この数年来、原子力発電所の新設がなく、また運転保守の充実に伴ってトラブル経験も少なくなってきたり、保守要員については世代交代が進んでいるため、熟練者が減少し、応急処置のための支援方策と臨場感をもった教育訓練支援が望まれている。そこで、臨場感をもった教育訓練支援のシステムとして、3次元コンピュータグラフィックス技術を用いたシステムを試作した。試作したシステムについて、机上教育に利用可能であり、また、システムは実際には人がアクセス出来ない機器等の教育・訓練等に活用可能できるとの評価を得た。

2. 技術力継承を支援するシステムの開発

古田教授（東京大学 新領域創成科学研究科）の指導を得て開発しているシステムであり、本年度は有効性及び必要な改良点等をアンケートによって評価している。この内容について、次項3.2に述べる。

3. HEを予測し低減する方法の開発

昨年度は予測に基づくHE低減法の検討を行った。すなわち、HEが発生する可能性のある現場を予測し、あらかじめ対策を講じてHE発生の低減を図るのである。

この研究においてタスクエラーを評価する方法の枠組みは7ステップからなっている。

- (1) タスクを階層に分ける
(この分析方法はHTA: Hierarchical Task Analysisとして知られている)
- (2) 重要度の高いタスクの選定
- (3) スリップ、ミステイクや違反に陥りやすいタスクの同定
- (4) 機能が低下する原因 (PDF: Performance Degradation Factor) の同定
- (5) リスクの高いタスクのHTA
- (6) 予測的HE分析 (PHEA: Predictive Human Error Analysis)
- (7) エラーを低減する方策の発見

以上が保守支援関連研究の概要である。

3.2 保守技術力継承支援システムの評価について

花房英光 (INSS 技術システム研究所)

原子力分野においても、ここ数年プラントの建設の機会が減少し、また運転・保守の充実によりプラントのトラブルも減ってきている。それに伴って若手技術者が知識・技術力を習得するチャンスが少なくなってきたり。そこで、電力会社においても熟練技術者の知識等を若手技術者に継承させる有効適切な方策が必要とされている。本研究においては、熟練技術者の高度な技術力の基礎となる機器設備の造りに関する知識、及びトラブル対応の経験から得られた知識を若手技術者が習得し、継承するための支援システムの開発を行っている。

ここで高度な技術力とは、安全を確保するために発生したトラブルの原因を究明し、さらにはトラブルの発生前の予兆を発見するという技術力のことであって、この技術力はトラブル経験等の熟練技術者の個人的な知識、運転保守業務に関する知識、機器設備の構造に関する知識等に基づいている。従って高度な技術力を習得し継承するために、運転保守業務に関する知識については、保守訓練センター等で技能についての教育・訓練が行われている。しかし、機器設備の造りに関する知識やトラブル経験等の知識は断片的であり体系化されにくいという理由で、これらについての教育・訓練の支援はほとんど行われていない。そこで、この2つの知識（機器設備の造りに関する知識とトラブル経験等の知識）に着目し、継承を支援するシステムを検討し、試作した。

支援システムは熟練技術者の知識をデータベースとして内蔵し、その知識を閲覧するソフト及びワープロ感覚で知識を記入するソフトから構成されている。システムの基本的な表示画面としては、左上に直感的に分かり易いように機器構成部品を外観図や部品図で示し、左下には機器構成部品に関連する熟練技術者の知識を一覧として表示する。画面右側は知識に関する情報が表示されており、右上は、着目知識と着目知識の根拠となる知識、そして着目知識から導出される知識、つまり知識のリンク関係が示されている。また、同様に画面には、着目知識の詳細

細情報が示されている。また、機器構成部品に関する画面は、クリックブルマップになっており、目標とする部品をクリックすることによって目的とする知識を閲覧することができる。機器構成部品の画面が、外観図や部品図では全体の機器構成がわからない、そこで機器構成部品の全体を表示できるように画面の切り替え機能を用意し、機器構成部品の全体を階層的に表示することができる。また、着目知識に対する画面においても前後のリンク関係だけでなく、着目知識に対して根拠となる知識を遡及して閲覧することができる。さらに、熟練技術者の知識をデータベースに取入れるには、知識の追加により、画面の指示に従って、HTML (Hyper Text Mark-up Language) エディタを呼び出し、ワープロ感覚で記述したテキスト等のHTMLファイルをこのシステムの中に蓄積するという方法をとっている。

支援システムに要求される機能としては「熟練技術者の知識をデータベースとして容易に記録し、若手技術者がそれらを手軽に利用できること」であり、これらに焦点を当てた評価が行えるように考慮している。このため、利用者向けの練習用の標準問題を作り、実際に利用者にシステムを試用してもらった後に、アンケートによりシステムの使い勝手、有効性、改良点の評価を求める方式を取った。対象としたのは一次冷却材ポンプの現場保修技術者、その他、現場保修経験者合計10名の方に協力してもらい行った。標準問題は機器設備の作りに関する知識を閲覧し「一次冷却材ポンプの要求容量の根拠」を答えるもの、トラブルに関する知識を閲覧し「1シーリングにグリスを塗りすぎた場合に発生するトラブル事象の原因」について答えるもの、さらに知識をシステムに記入し、蓄積するための課題から構成される。このような標準問題に回答した後、インターフェース、機能、データの構成や表現に関わる項目、およびテキストとの比較による利便性を総合的に評価する項目についてアンケートによる評価を求めた。

データ構成、表現方法については知識データ数が低い評価を受けた、これは今回使い勝手等の評価を目的にしており、データ数として130個程度しか準備していなかったことから当然の結果と考える。その他、詳細説明の表現、知識の分類、機器構成部品表現、設計表現、トラブル表現等については良好な

評価を得た。システムとしての評価は、全体的として肯定的な結果であった。また、同時に、システムに対する問題点や要望事項も抽出しており、その中には、データベースエディタが必要であるとか、キーワード検索機能が必要であるとか、テキストによる説明のほか図が多くあったほうがよいとか、保守手順との関連性も示すべきであるという意見があった。また着目知識から導出知識の展開も閲覧できれば学習しやすいのではないかと等々の意見があった。

現在、それらの評価をまとめて実用化のための改良及び充実を行っている。具体的にはマニュアルの充実、オープニングガイダンスの追加、データベースエディタ機能の充実、アイコン等表示機能の充実、印刷機能の追加、文字検索機能の追加、そしてデータの充実も図っている。将来はシステムの高度化として、3次元コンピュータグラフィック等を利用した保守手順の表現方法、さらに、最新の情報技術の適用によって重要情報の獲得手法を改善するための検討などを行って、システムに反映させたいと考えている。

以上、パーソナルコンピュータ上で作動する教育・訓練に活用できる技術力継承のための学習支援システムを開発する事ができた。またシステム評価を実施し、全体的に肯定的な結果を得られ、またシステムの改良すべき点の抽出ができた。今後は更に保修訓練センターや現場への適用のための改良、充実を図っていく予定である。

4. 安全機能

4.1 プラント安全機能の導出手法に関する研究

五福明夫 (岡山大学 工学部)

プラントの安全機能概念の導出に関する INSS の丹羽雄二主任研究員との共同・協力研究の現状について報告する。

安全機能概念とは、原子力プラントの異常時に安全性を担保する対応操作のための概念であり、古くから提唱されている。安全機能がどのように規定されれば、最も事故収拾に効率的であるかを考察する

(これを「安全機能の導出」と呼ぶ)安全機能に関する研究は1980年頃から行われ、W. R. Corcoranらの提案¹⁾がよく知られている。彼らは、それまでの安全評価手法や文献に基づき、事故時におけるプラントの運用に適用させることを目的として、安全機能概念を整理し、その運転支援への有効性を示唆した。また、安全機能概念を適用した兆候ベースの運転支援手法も検討されている²⁾。

安全機能は、それらの機能を達成していればプラント状態(異常原因やその影響)を完全には把握していなくても、プラントの安全性を確保できる点で注目すべき概念である。しかしながら、W. R. Corcoranは、安全評価の方法論的知見からそれまでの安全設計に基づいた知識を整理して経験的に安全機能を導いており、各機能を独立と考えている点が問題である。また、定義された安全機能を達成していればプラントの安全性が確保されるかの完全性は充分検討されたわけではない。一方、各安全機能間の関係も、挙動に基づいた検討もある³⁾が検討範囲が限定されている。さらに、どちらかと言うと設計の立場から提唱されている安全機能概念を、プラント運転員が設計者と同じように理解しているかは検討されていない。

本研究では先ず、安全機能を統一的に導出できる手法を検討した。その成果として、後述する原因-手段分析を提案している。また、運転員が持つ安全機能の概念に関するイメージ(メンタルモデル)はインタビュー方式により抽出できるが、客観的な抽出とするためには機械化する必要がある。この目的で、原因-手段分析を対話型に実施するツール(質問システム)を現在構築中である。

メンタルモデルとして運転員の安全機能概念が抽出できれば、以下のような効果が期待できる。もし運転員のメンタルモデルに関して共通的な構造が出てくれば、安全運転のための支援システムへ応用できよう。最近研究の進んでいる適応型インターフェースにおいては、運転員の認識、行動、及び視点などを考慮して、効果的な運転員支援を実現しようとしているが、この適応型インターフェースを構成するツールとしても利用できる。すなわち、運転員も人間であるから認知的な資源の制約があり、情報取得の面あるいは診断を行う能力などによる制限があ

るが、これらの制約を補う支援が出来るのではないかと考えられる。さらに、理想的な安全機能概念の構造があれば、運転員にその構造を教育訓練することもでき、CAIとしてプラントの安全性に関する理解や安全運転のための操作手段に関する教育に利用できるのではないかとと思われる。

本研究では、システム的な分析に耐える方法として、原因-手段分析を提案している。原因-手段分析においては、一番望ましくない異常を頂点としてその原因をトップダウン的に分解し、考えるパスを列挙していく。ここで、望ましくない異常を回避する手段を発見したとき、それを安全機能とする。例えば、原子力プラントにおいて回避しなければならない重大事象は、管理されない放射能のプラント外部への放出である。環境への放射能放出という異常事象に対しては、格納容器の隔離失敗という原因が想定され、これに対しては格納容器の隔離が一つの安全機能であると考えられる。原因-手段分析手法により、格納容器を対象として「放射性物質の環境への放出の防止」という最終目標を阻害する原因について展開を試みたところ、W. R. Corcoranらの提唱する10の安全機能のうち、「重要サポート系の維持」と「間接的放射能放出の防止」以外の8安全機能が導出できた。また、それぞれの安全機能間の関係は、独立並列なものではなく複雑な構造を持つことが判明した。

現在開発している対話型の質問システムでは、原因-手段分析における分解の着眼点をうまく見つけだし、それに対する質問を自動的に生成し、運転員がその質問の回答を入力するという手順を繰り返すという形で原因-手段分析を進めていく。ここで、質問システムの質問生成アルゴリズムは一般の対話システムにも応用できるので、システム自体はできるだけ汎用的なものとする。一方、自然な対話を目標とすると自然言語処理を必要とするが、完璧な自然言語処理は実現が困難であるので、今回は安全機能に関する概念の抽出に絞って、処理の簡略化を図りプロトタイプシステムを開発した。

質問システムは、(1)構文や語彙のデータベース部、(2)質問制御部(回答文分析部、質問文生成部)、および、(3)原因-手段階層表示制御部から構成される。構文データベースには、動詞をキー

ワードとし、その動詞（とその類似語）を用いた回答文において必要な情報の種類を登録する。例えば、「(開放) : (物質), (From場所), (To場所)」である。質問制御部では、運転員の回答文を分析して次の質問文を生成する。このうち回答文分析部では、回答文を単語の集合に変換し、動詞に注目して登録構文と照合する。この結果、回答文に欠落した情報の種類が判別される。質問文生成部では、欠落情報に基づいて次の質問文を生成する。また、原因-手段階層表示部では、原因-手段分析の過程を構造表現する。

今後の展開として、運転員から安全機能に関する概念が導出可能な実際的な質問システムに発展させ、運転員の安全機能に対するメンタルモデルを導出する計画である。また、現在までの分析は格納容器を主な対象としてきたが、将来は格納容器以外にも発展させたい。

文献

- 1) W. R. Corcoran, et al.: Nuclear Safety, Vol. 22, No. 2, pp. 179-190 (1981) .
- 2) N.K. Simon, et al.: Proceedings of ANS annual meeting, Los Angeles (1982) .
- 3) 丹羽ら: INSS Journal, No. 3, pp. 230-247 (1996) .

4.2 原因 手段分析による安全機能の導出のための質問システムについて

五福明夫（岡山大学 工学部）

前項4.1で説明した原因 - 手段分析を行うための質問システムの拡張について報告する。本拡張システムは、INSSにおいて数ヶ月間の試用を経て問題を修正し、その後、運転員の安全機能に関するメンタルモデルの抽出等に应用する計画である。

まず、安全機能の概念、原因 - 手段分析、質問システムについて、それらの概要を説明する。安全機能の概念は以前から提唱されて来た。また、安全機能をベースにした運転支援手法も考えられて来た。しかし、安全機能は第一義的には運転経験に基づい

て整理されるべきものであるが、概念が十分整理されていない。さらに安全機能ベースの運転手順を作る側と使用する側（運転員）の乖離があり、プラントの運転員が緊急時に安全機能という概念に基づいて運転をしているかどうか疑問である。そこで、安全機能ベースの運転支援システムを考えるに当たって、まず、運転員の安全機能に関するメンタルモデルを明確にすることが必要である。

この研究においては、安全機能概念に関するメンタルモデルを抽出する目的で、原因 手段分析をユーザに対するインタビュー形式で行う質問システムを作り、それに基づいて運転員のメンタルモデルを検討する。通常人間が行うインタビューでは、質問者のインタビューの進め方が作為的になりがちであるが、ここではそれを防止しまたユーザが変わっても同じ状況では同じ質問を発するために、質問システムを計算機上のツールとして作成する。

さて、原因 手段分析法は、好ましくない結果から出発して、そこから遡及して原因を分解し、対応策を質問によってつきとめようというものである。最終的に、その原因を回避できる手段が発見されればそれを安全機能と定義する。但し他の終了条件として、機器故障やヒューマンエラーなどの要因により安全機能に到達しない場合には、そこで分析を終了する。

質問システムの全体構成は、構文や語彙のデータベース、質問制御部、概念構造表示部から成る。まず、原子力プラントの運転に関する語彙を場所、物質や変数などのカテゴリーに分類してデータベース化する。日本語の場合にはキーワードとして動詞が重要であるので、各々の動詞に付随すべき必要な情報の種類を明らかにして構文データベースを作成する。質問制御部では、回答文を分析してその回答文に対する質問を自動的に生成する。概念構造表示部では、ユーザ側から引き出した回答の過程を概念構造と考え、その構造を図式的に表示する。

前回報告以後の改良点は以下述べる通りである。まず、完全な回答文では複数の情報が通常含まれるが、前回報告した質問システムでは情報の欠落を1つとしていた。そこで、複数の情報が欠けている場合には、文脈の通った回答文が得られるまで反復して質問できるようにした。また、ユーザは回答途中

でそれまでの回答を撤回する場合があることがわかったので削除機能を加えた。さらに、概念構造が大規模であることが予想されるので、保存できるようにするとともに、画面のスクロールを使って大規模な概念構造を表示できるようにした。さらに、自然言語処理に対してもある程度の対処をした。すなわち、日本語の場合には単語の分割にも難しい問題があるが、複合した単語を分割せずに処理出来るようにした。

今後INSSにおける試験を行い、システムを改良する予定である。例えば、代表の見出し語は現在約100語、類義語を含めて200程度登録してあるが、まだ不十分なので、語彙を追加しPWRのプラント運転に十分なところまで充実させる。そのうえで、実際のPWRユーザ（運転員）自身のメンタルモデルを抽出し、その結果に基づく安全機能を導出・提案したい。なお長期的には、安全機能導出の適用範囲を格納容器以外に広げ、補助建屋その周辺にも拡張したい。

5. ユーザ参加型の設計

5.1 原子力プラントの運転情報提示におけるユーザ指向設計

高橋 信（東北大学 大学院 工学研究科）

原子力プラントの運転情報提示におけるユーザ指向設計の研究について報告する。

内容は作業モードの定式化、ユーザである運転員の要求を明確な形で具体化するインターフェースの設計、及びプロトタイプシステムとその評価から成り立っている。

われわれの立場としては、実際に運転員が行っている多様な作業モードを明示化して検討し、インターフェースの設計指針を考えることが重要と考えている。全体的な方法論としては、先ず実際の運転員の作業モードを十分に現実を反映する形でモデル化する必要がある。いま一つは、そこから導かれる要請や指針を拘束条件として考慮し、これに沿った情報提示形態を検討することである。最終的にはTop-down型の設計方法が望ましいが、現状におい

てはBottom-up的なアプローチも併用する。

具体的な作業モードのモデル化にはDynamic Environmental Supervisionを用いる。重要な点は、実際には、運転作業を構成するタスクが直列的に行われるのではなく、複雑な相互作用を持ちつつ準並列的に処理されるということである。

それらのタスクはProactiveとReactiveに分類できる。異常診断および対策の決定・実行がReactiveなタスクで通常監視、強化監視、補修はProactiveとなる。これがモデル化の基本となる。

問題解決のためには、現時点の状態に着目する解析方法と過去の事例データを参照するという戦略がある。多様なタスクの遂行に対して必要な情報が、適切な内容と構造と形式を具備した形で提供されることが必要である。

ここで現実の問題から乖離しないようシステムの使用者である運転員の要求仕様を明確化し、更に規範的に合理性、合目的性の高い設計の具体化を最初に行う。すなわち、運転員からの個別的要求を規範的な設計指針との統合化という観点から整理・再構成するのである。先ず、要求仕様の明示化のためには、すべての作業モードで効率的な支援情報提供がなされることが必要である。すなわち、各項目について重要情報へのアクセスが容易で、操作が明快であることなど運転員の認知的負担の軽減に配慮しなければならない。次に、情報の提供は運転員の認知的モード（人間の制御モード）に整合した方式で行われることが必要である。認知的モードとはErik Hollnagel教授の提唱したscrambled mode, opportunistic mode, tactical mode及びstrategic modeを指す。

第3の要求仕様として、各作業時におけるプラントの状態を検索する際の時間的、空間的及び機能的な便宜を確保することが必要である。重要なポイントはインターフェースの有する複雑性をどう低減するかということである。複雑性の生じさせる要因は、Dynamism, 相互作用の複雑さ、不確定性及びリスクの存在という4項目である。

以上の設計指針に従って、運転支援情報提供サブシステムとして、プロトタイプシステムを構築し、規範的指針に対してどれだけ要求を充しているかという観点からの評価を行った。

このプロトタイプはプラントのマクロ状態のマクロ的表示を一瞥して把握できるように図形で表示し、定常状態から逸脱すると、その程度に応じて図形が歪むようになっていく。また階層表示によって機能的な Navigation を可能にしている。時間的履歴情報は輝度の変調として画面に保存される。さらに予測機能を備え、複雑性の低減を図っている。このようにして運転員の支援に寄与することが期待される。

5.2 現場 Interface への展開

丹羽雄二（INSS 技術システム研究所）

原子力発電所の中央制御室のHMI（Human Machine Interface）に関して、ユーザ参加型の設計に基づいたシステムを作る提案である。ユーザ自らが積極的に設計に参画することにより、運転員と親和性の良いシステムが構築できることが期待できる。このシステムの設計にあたっては、ユーザ要求を明確にした、URS（User Requirement Specification）をユーザ自らが作成する必要がある。この私案について紹介する。ここで提案するURSとして主要なものは、

- (1) 運転中の殆どの業務をサポート出来る設計であること。
- (2) 運転員の認知的負荷が軽いこと。
- (3) 行動をHMIの表示情報により容易に想起出来ること。
- (4) 既存の事故時手順書と相補的であること。

である。(1)から述べると、事故時支援が現在の主流になっているが、運転業務は殆どが定格運転（100%負荷運転）の状態監視が主なものである。そこで、事故時支援とともに、予防保全的に役立つHMIも現場運転員にとって重要なものといえる。

次に(2)について考察してみる。運転員はチームとして何を意味の共有の手段にするかということ、系統図（P&ID）と言える。何か問題に行き当たった時、運転員が参照するのは系統図（P&ID）である。インターフェース設計に当たってはP&IDを表示の基底としたものが望ましい。基底ということは、HMIの画面上に常に表示されていることを示す。

URSの(2)と満足するシステムのソフトウェア要件として、次のものが考えられる。

例えば表示の要求時に、状態が規定するパターンと典型的な事故についての状態パターン（事前にコード等で解析しておく。）をP&IDと重畳表示することにより、運転員認知的負荷を軽減することが期待できる。同時に、事故や機器故障の起こった位置の特定も可能である。これは一例にすぎないがURSからシステムのソフトウェア要件が、導出可能であることを示している。

今回は特に(4)について、考察を行った。従来からINSSでは事象ベース事故時手順書の表示の機械化について研究して居り、メーカーでも安全機能ベース手順書の表示の機械化について研究しているが、これらが発電所に設置された場合、運転事故時支援用のHMIは要らなくなるという議論も出てくる。しかし、Graphic情報による支援（HMI）と相補的にこれらの手順書機械化システムを運用していくと運転の信頼性も向上するという結論を得た。事象ベース事故時手順書から安全機能ベース事故時手順書の移行においては、その移行条件のブレークダウンを見ると、安全機能状態のプラント系統と関連した表示や、「資源」というものを意識しなければならない重大な事故時の「判りやすい」情報の提示が欠けているように思われる。これらを支援する画面をHMI設計に反映することにより、手順書と共存可能なHMIが構築出来ると考えられる。

5.3 インターフェースのユーザ参加型設計の実験用加速器への応用

高橋 信（東北大学 大学院 工学研究科）

GUI-based evolutionary development（ユーザ参加型設計）を高速中性子実験室における加速器システムのインターフェースに適用した具体例を紹介する。これを対象に選んだ理由は

- (1) 身近にあるかなり複雑なシステムで、運転にはかなりの経験が必要とされること、及び
- (2) 実際にその運転に携わる熟練者の方の協力が得られることである。

このイオン加速器はイオン源からのビームを、複

数のポートに置かれたターゲットの一つに導くため、複数のパラメータを同時に調整する複雑な運転操作を必要とし、それは制御理論における多変数の最適化問題に該当する。目的のターゲットまでのビームの輸送過程においては収束とオリエンテーションという二つの問題があるが、それを表示する機器がなく、オペレーターが頭の中でそれを構成しながらビームの輸送を制御しなければならない。これを支援する目的でエキスパートにインタビューして得た結果 (FB/FF (feed back and feed forward)) に基づいて、付加的でGraphical な User Interface を付け加えていく過程をここに紹介する。

先ず最初に、ビデオとインタビューによってユーザの作業行動を観察し、第一段階の作業遂行モードのモデル化を行った。このモデルはあくまでも初期のインターフェース設計のたたき台になるものである。この作業遂行モードのモデルに基づきインターフェースにおける基本的な要件を抽出し、プロトタイプを作成した。このプロトタイプを運用の中で実際に使って、ユーザからの主観的要求事項に基づいて、要求仕様を更に明確化するというフィードバックサイクルを継続的に3回行って、インターフェースを改善してきた。

最初の出発点としてユーザ認知行動モデルを用いてモデル化を行い、これに基づいてVersion 1 Interfaceを作った。通常熟練した運転員は、最初にビームをゼロ度方向に通すときには、加速電圧と加速粒子が類似の過去のログ情報を参照して初期設定値を決定し、そこから微調整して最適な設定にするという戦略を用いている。本システムでは、そのようなユーザのタスクを支援するために、ログのデータベースとその参照機能をインターフェースの要件のなかに持ち込むこととした。

Version 1 の使用経験に基づいて Version 2が作られ、更に1 - 2ヶ月の試用をへてVersion 3のインターフェースが開発された。これが現行のインターフェースとなっている。Version 1 Interface と大きく違っているところは表示関係であり、ミミック表示によりビームの状況が一目で把握できるようになっている。このようにユーザからのフィードバックによって、インターフェースのユーザアクセプタンスを非常に向上させることができた。

開発環境としてはどれだけ簡単にインターフェースを変更できるかということが非常に重要なので、LabVIEWという環境を用いた。

6 . Naturalistic Decision Making

6.1 Naturalistic Decision Making (NDM) について

稲垣敏之 (筑波大学 電子・情報工学系)

今までの意思決定の理論は実際の Decision Making を表現していないのではないかというスタンスで Naturalistic Decision Making (NDM) が提唱された。正直に言うと、私自身はこの考え方に対して絶対にこれでいいとは考えていないが、議論の種を提示したい。すなわち、今日はニュートラルに、ただしある部分是否定的なニュアンスで話を進める。

つぎの7項目について説明する。(1) 現実的な場面での意思決定、(2) 意思決定に誤りがあるとして、意思決定の能力は訓練によって改善できるか？(3) 意思決定の訓練事例、(4) NDM の歴史、(5) NDM の特徴、(6) Recognition-Primed Decision Making、(7) 昨年行われたNDMのカンファレンスの報告について、順を追って説明する。

NDM については “Decision Making in Action”、 “Naturalistic Decision Making” 及び “Decision Making Under Stress” の3冊が出版されている。

現実的な場面での意思決定は次の4段階で行われる。最初は(1)環境を含めた状況を常にモニターしているというプロセスである。次に(2)実際に起こった変化を認識し、(3)対応策を選定する。最後に(4)選定された対応策を実行する、ということになる。これは、オペレーターのタスクとして要求されている監視 (Monitoring) と介入 (Intervening) という Supervisory Control の枠組みに非常に近いものである。

実際に Decision Making を行う際には、様々なエラーが起こる。Decision のエラーはどのようにして起こるか。例えば、心理的な要因を含めてバイアスが影響する。さらに不適切な態度あるいは姿勢が反映する。ここでいうバイアスには、Human

Machine System における事故に見られるような過信や警戒心の欠如などがある。また、「起こって欲しくない状況」に該当するような情報が見えたとき、積極的に対応しないで、「しばらく待てば消えてくれるのではないか」という期待をもってしまう。そのため事態が進んで Decision Making のタイミングを失うということがありと指摘されている。

不適切な態度や姿勢にもいくつかの形態がある。権威に対する反抗心が旺盛なあまり、人に命令されるのが嫌いな人などはエラーを起こすことがある。また、超越的な力、あるいは運命的なものを感じてしまうと、エラーを起こす。衝動的あるいは自分は不死身だと思っていると、やはり Decision のエラーが起こる。

Decision Making の能力はやはり改善できるだろうと言われている。但し、それには訓練が必要である。訓練には頭脳労働的な側面とメンタルな側面との二つの側面があるだろうと言われている。前者は状況認識 (Situation Awareness) に関するものといえるが、状況に関連する情報を見つけ出し、関連性を明らかにする能力は、レベル 1 の Situation Awareness とレベル 2 の Situation Awareness に相当する。また、対応策を列挙する能力は勿論必要であるが、その対応策を実施した結果を予測できるという能力は、レベル 3 の Situation Awareness に関するものであるといえる。

NDM の例として挙げられるのは消防、軍事の例、それから航空産業の例がよく出てくる。

航空産業において訓練にはどんな効果があるかということについて、原子力と対比して考えてみることを問題として提起したい。

現在 航空産業 で行われている訓練の基本的な考え方は、つぎのようなものである。すなわち、システムの変化をまず検出し、次にその変化がそのシステムに対してどのような影響を及ぼすかを推定する。そして、システムをどのような状態に導くべきであるか、システムゴールを選定する。つぎに、それを実現するための代替案を列挙し、実行すべき代替案を選択、実施する。実施した代替案が適切なものであったかどうかを評価する。

現在の訓練では、与えられた状況に対してどれだけ正確に代替案を列挙することが出来るかというこ

とが試される。しかし、このモデルでは「結果良ければすべてよし」と見てしまいがちで、意思決定が行われたプロセスにはあまり注意が払われていない。「これは規範型の意味決定のモデルになっているのではないか」との指摘があり、実際にここが NDM の研究者が問題視するところでもある。

確かに、規範型の意味決定の理論を否定するような事例もある。その典型的な例が消防士である。消防士が火事の現場に行ったときに代替案を全部列挙して、それぞれのメリット、デメリットを計算して一番いいものを選ぶことはせず、現場で頭に浮かんだものを行っている。

軍事にもそのような場面がある。例えば、いつ敵機が飛んでくるかもしれないような環境にイージス艦がいる時、向こうから飛んでくる飛行機が見えたとして、これが我々を攻撃するのであれば、攻撃される前にこちらがアクションをとらないといけない。そのような状況でエキスパートと呼ばれている人達がどんな考え方で Decision Making をしているのかを詳しく知った上で、それを伝承する訓練が必要であるといわれている。

すなわち、NDM は、「実際の場面で Decision Making がどのように行われているかを正確に知ることが重要である」とのスタンスで研究が進められている。

しかし、NDM は実際にはそれほど新しい概念ではない。1970年代にはそれらしい考え方が出ている。すなわち、「時間制約や不確実性の下では、規範的なモデルで記述されているものより遙かに単純な方法で決定が行われる」という指摘をはじめ、時間制約の下では明らかに規範モデルとは違うプロセスで Decision Making が行われていると考えざるを得ないことが古くから指摘されていた。基本的に NDM 的な考え方は、「状況の診断」それと「代替案選択」という 2 種類の意味決定を区別しようとするものである。その意味で、従来の規範的な意思決定は、実はその代替案選択のところに焦点が当てられていたものということができる。

NDM の特徴は、状況診断の部分にある。すなわち、状況診断を行う上で過去の経験が重要な役割を果たしている。過去の自分の経験や知識とマッチングさせて「典型性」を見出すことで、現在起こっているものを認識する。

また、「状況診断が完了すれば、代替案の選択をほとんど一意的に決まってしまう」とも考えている。例えば、飛行機の場合には、SOP（Standard Operating Procedure）が法的な規制に基づいて定められており、それ以外のことを実行するというのは現実的ではない。従って、代替案選択に焦点を当てるよりも、状況診断に焦点を当てて議論したほうが良いと考える。

NDMはどのようなモデルで表現すればよいか。Recognition-Primed Decision（RPD）と呼ばれるモデルはその一つである。先ず、状況診断において三つの戦略がある。第一は（１）特徴の照合、次に（２）類似性の利用、最後に（３）メンタルシミュレーションである。代替案の選択に関しても、規範型は代替案を全部列挙してからその一つをピックアップするのであるが、このモデルでは次のような、いわば多少いい加減なやり方も許している。（１）satisfyingアプローチは、一つの代替案が頭に浮かんだとき、それを実行した結果がだいたい満足できるようであれば直ちにそれを実行する。（２）比較評価の戦略として２例を紹介する。第１は、評価基準をランク付けし、最上位の評価基準を満たすものの中から第２位の評価基準を満たすものを選び、さらに下位の評価基準を適用する操作を続ける方法がある。第２は、満足すべき等重要度の評価基準のもとで代替案を全部スクリーニングし、すべての条件を満足する代替案が存在するかどうかを調べるものである。残った代替案にさらに何か別の判断基準を適用することもある。このようにして最後に一つの代替案を残すことになる。

NDMでは、Decision Making においては代替案の選択より状況に対する判断選択のほうが重要であるとみなされる。「いったん状況判断の選択ができてしまうと代替案選択は自動的に行われるので、規範型の意味決定などは不要である」と明確に主張するグループもある。しかし、彼らの主張にはエキセントリックなところがある。

確かにパイロットが離陸を中止するかどうかという意思決定は、基本的には規範型意思決定論にはそぐわない例かも知れない。しかし、私自身はNDMに関して疑問を感じている。

例として、離陸の際に、「エンジンが火を噴いて

いるが推力は全然衰えていない」という状況を考えてみる。そういう時は、エンジンの消火を行わず、まず離陸する。そして、上空で機体を安定させてから、落ちて火を消す。これが基本的な手順である。確かに手順にはそう書いてあるが、パイロットが非常に悩むのは、「もし上空に上がってしまったら火が消えなかったらどうするか」である。主翼あるいは胴体に火がつくと、それは燃料タンクの上で燃えているのと同じことであるから、それこそ大惨事になりかねない。従って、実際には、離陸継続と離陸中止のどちらがいいかという、代替案そのものの評価をしなければならない場面がある。すなわち、「NDMの研究者たちが言っているほどエキスパートの Decision Makingは単純なものではないのではないか。いかにエキスパートと言われている人でも、あるところでは規範型の意味決定を行わざるを得ない場面があるのではないか」と考えるのである。

最後にNDM Conference の印象を述べておく。オープニングのセレモニーのスピーチには確かに Naturalistic Decision Making というキーワードが何度か出てきた。しかし、個別の研究発表では、最終のセッションに至るまでヒューマンファクターやマンマシンシステムの会議に相応した論文があまりにも多く、いわゆる NDM として、意思決定理論、特に従来の規範型意思決定論に代わるものとして、どのような枠組みが必要かは、全く議論されなかった。

6.2 Human Machine Interface の設計・評価におけるNDM視点の位置づけ

北村正晴（東北大学 大学院 工学研究科）

1. はじめに

Human Factorsに関わる研究、とりわけHuman Machine Interfaceの設計や評価に関する研究においてはNDM（Naturalistic Decision Making）⁽¹⁾ とか DES（Dynamic Environmental Supervision）⁽²⁾ という現状認識に対応できる方向への展開を心がけることが今後重要になると考える。NDMの視点からは、多くの分野における熟練者の意思決定の特徴が改めて見直されている。具体的には、動的に状況が推移

している safety critical な条件下でも熟練者は、数理的
意思決定技術の見方からは非常に複雑で困難な問
題に対して、意思決定を迅速かつ的確に行っている
のが実態である。これを鑑み、現実を反映した新し
い意思決定技法のありかたが研究対象として注目を
集めている。

熟練者の作業遂行におけるDES的な側面の指摘に
おいても同様に、時間的な制約がきびしい状況下で
の意思決定の実態を反映したインターフェース設計
や教育訓練を考えることが中心的な技術課題として
取り上げられている。さらにDESでは“動的状況”
の別な切り口として、長い期間にわたってのライフ
サイクルのなかでその対象が今どのような状態に位
置しているかという条件が意思決定内容に反映され
るLife Cycle Management⁽³⁾の視点も重視される。原
子力発電所の場合には、本来の意味のLife Cycle
Management的視点に加えて、次期の定期検査まで
どの程度の時間が残されているかを考慮に含める準
ライフサイクル的視点も重要な意味を持っている。
このような長期的視点の導入は狭い意味のDynamic
とは一見異なるようであるが、いずれも対象を不変
の固定的実体・状況としてとらえず動的に推移する
ことを重視した着眼であることに注意したい。すな
わち、これらはいずれも従来のアプローチでは必ず
しも十分でなかった現実的な視点の導入の必要性
を指摘した提案といえる。

2. 基本的な指針

対象の実体やおかれている状況を現実的に把握す
ることは工学研究に携わる者としては当然である
が、Human Machine Interface関連の研究分野ではな
かなかそこまでの現実把握は容易ではなくて、様々
な形に単純化し、理想化して議論をしていることが
少なくない。そのようなアプローチは研究の方法論
として必要であるが、現実との乖離の危険は常に伴
っていることを研究者は意識すべきである。一方で
NDMの分野ですでに自己批判的に指摘されている
ごとく、定式化とかモデル化への視点を欠いたりア
リズムは単なる現象記述学となり、問題解決のため
の汎用性ある技法を構築することは難しくなる。そ
ののためのNDM的視点に立った現実性の高いモデル
化の必要性が唱えられているが、今のところはそ
のような成果を得るには至っていない。これを要する

に、現実記述重視論に対してのモデル化必要論、あ
るいはユーザ主観重視の経験論に対しての原理また
は規範重視論があるといえよう。本研究会の基本的
立場からは、これらの対立するイメージを統一的に
取り入れた問題の定義と技術開発が必要であると思
える。

たとえばDynamic Environmental Supervisionの見方
を重視すると、従来までは時間的には独立したシー
ケンスと見なされてきた [通常監視, 強化監視, 異
常診断, 対策決定と実行, 及び必要な場合の 補修
(Repair)]等のプロセスが、相互に入り組んでリアル
タイムで非常に忙しく作動することもあるタスク
の集合と見なされなければならない。少なくとも
実態はそのようなものであるということ意識した
上で問題解決をはからねばならない。

エキスパートによる現場行動の現実的な記述とそ
れを反映したインターフェース設計にかかわる話題
としては、Human Interface 設計におけるユーザ参
加型設計、あるいはユーザのモデリング、User-
centered 設計など多くの概念やFrameworkがすでに
提案されているのは事実である。たとえばチューリ
ッヒ工科大学のグループによる B-VOR Process ある
いは非常に構造化されたModel of designer-user
processの提案⁽⁴⁾はその一例である。しかしながら
その内容はまだ抽象度の高い方法論の域を出ず、
個々のインターフェース設計対象に特化、具体化し
た場合の実際的方法論の部分は未確立である。

User-centered Design あるいはエキスパートの能力
を十分に生かす設計という基本理念には何ら問題な
く、反対すべき性質のものではないが、言は易く行
うのは難しということである。インターネットが発
達してから、多数のユーザを相手にしてプロトタイ
プデザインを公開し、スクラップアンドビルド過程
を反復することを含んだグローバルデザインとかユ
ニバーサルデザインであるとかの提案が盛んであ
る。そのような方法論は民生用機器のインターフェ
ース設計に代表される技術領域においては一定の有
効性を発揮できると思われる。しかしながら民生機
器用インターフェースの設計と、原子炉運転用の計
装盤の設計とは基本的に内容や要求レベルが異なる
点についても注意が必要である。後者においては、
提供情報の質や信頼度、さらには安全性に関する要

求が格段に高い上、商品としての生産数は少なくライフサイクルは長いので民生用機器に対しては有効な方法論であっても応用はきわめて困難である。

ユーザである原子力プラントの運転員に、現在のインターフェースをどのように改良して欲しいかと問うても、答えが得られない場合が多い。人間は非常に優れた適応能力を持っていて、本当の問題点は慣れてしていると却って見つけにくいという問題がある。従って、User requirements はしばしば現状維持傾向にある。そうすると問題点が不明で、何のためのユーザ参加型設計なのかかわからない。一般にユーザからの事前知識の獲得が困難なのは、エキスパート構築における知識獲得 bottleneck と共通性の高い問題であって、その意味からもユーザ参加型設計は理念としては望ましいが実現は困難な方法論といえよう。さらにユーザからの事後のフィードバックという民生用機器では普通に期待できる効果についても、原子力発電所計装の現場で様々な事象を網羅的に経験するような状況は考えられない以上、実際には期待できないことになる。

3. 具体的提案の事例

このような様々な困難を十分に認識した上で、NDMやDES研究が重要視するような、現実的な課題認識に基づくインターフェース設計の方策は如何にあるべきかを考えることが必要である。本共同研究では、最終的な枠組みを提案する段階にはまだ至っていないが、例えば、開発チームには経験深いユーザが常時参加していることが重要な条件であろう。さらに、このユーザは、評価者であるだけでなく、出来れば開発者として積極的に関与すべきである。そして、計装系ハードウェアを全部作り直すのは大変であるが、コンピュータ画面上でインターフェースのプロトタイプは繰り返し製作できるのであるから、それをういた進化型の設計 (evolutionary design) は基本的に可能である。ユーザの要望を反映しつつ挙動をも予測して設計し、その経験をフィードバックして作り直すという繰り返し過程を経て進化型設計を実行するのである。ただし、ここで進化プロセスをスタートさせる出発点段階で大きな問題が残っている。ユーザからの要望をどのような具体的なインターフェースの形態として具現化するのかという点が依然として未解決のままである。このこ

とを言い換えると、現実的な視点に立つユーザ参加型設計を重視するとしてもそれだけでは不十分なことは疑いない。やはり、それを補完する方法論としてある種の規範論的またはモデルベースのガイドラインが必要であるといえよう。

高度なインターフェースを導入する必要性の背景には、システム挙動が複雑で従来型の素朴な単一計測器単一表示計 (single-sensor-single-indicator; SSSI) 型方法論では対処困難な状況が起こっているという事実⁽⁵⁾がある。TMI-2事故の折りの警報雪崩現象もしくはクリスマスツリー現象は、SSSI方法論の短所が顕在化し現象の複雑さに対処できなくなった代表的な状況といえる。したがってインターフェース高度化の主目的は「ユーザの目から見たシステム挙動の複雑さ (complexity) を低減すること」と規定することができよう。ここからさらに考察を進めるには、概念的に規定されたcomplexityの明確化が必要になる。

本研究グループでは、オハイオ州立大学の David Woods 教授によるComplexity の概念⁽⁶⁾を借用して考察を進めている。具体的には、システムの代表的次元数の多様性、Component 結合の干渉の複雑さ、対象状態についての知識の不確かさ、生起可能性のあるシナリオのリスクなどがcomplexityを増加させているので、インターフェースによる情報提示の適切化を通じて上記のcomplexity規定要因の各々を減らすという方向で考えている。

別の観点からの規範論的要請としては、ユーザ視点の多様性への対応がある。DESにおいてしばしば指摘されるように、ユーザの視点は決して一面的ではなく認識論的な多様性 (cognitive diversity) をもっているため、それに対応した多様な、それぞれに適合した情報提示方式を作り込んでおくことも大事である。このような観点に沿った基礎的なインターフェース設計提案としてはR.Lindsay, L.BeltracchiならびにRasmussenによるSRK (Skill-Rule-Knowledge) 意思決定モデルをふまえた提案⁽⁷⁾があるが、本共同研究では、機能と構造あるいは状態と挙動など多様な認識に対応する情報提供方式が検討されつつある。このような多様化によってユーザは時々刻々の自分の視点に整合した情報を受け取ることができて認知的な負担を効果的に軽減できる。また、複数の

運転員が意識的に別の状況認識モードで対象の理解につとめ意見交換を通じて総合的合意形成を行うことで、思いこみや勘違いなど人間が陥りがちな認知バイアスの弊害から逃れる効果も期待できる。

インターフェースの機能を人間・機械結合認知システム (Human-machine joint cognitive system) の高度な実現手段ととらえる立場からは Erik Hollnagel 教授によって、この結合系がある種の平衡状態を実現し、維持することがインターフェースの役割であるとの指摘⁽⁸⁾がある。そしてこの立場からは、安定な平衡状態へのスムーズな遷移を支援するため予見機能を向上させることが強調されている。この提案も本報告の文脈からは、ユーザ主張重視方式を補完する規範論的な提言とみなすことができる。

4. おわりに

以上、インターフェース設計と評価における NDM や DES に代表される現実的な視点の意味と、それを具現化するための 2 種類の方法論すなわち、ユーザ主観重視型の経験論と基本原則重視型の規範論を統合したアプローチの重要性について紹介し、併せて若干の私見を述べた次第である。原子力発電所に代表される大規模複雑システムの安全に中心的な役割を果たすインターフェースのありかたを考える際の重要な視点としてながしのご参考になれば幸いである

文献

- (1) Zambok, C.E. and Klein, G.: Naturalistic Decision Making, Lawrence Erlbaum Assoc., (1997)
- (2) Hoc, J.M., Amalberti, R. and Boreham, N.: Human Operator Expertise in Diagnosis, Decision-Making and Time Management, in J.M. Hoc, P.C. Cacciabue E. Hollnagel (Eds) EXPERTISE and TECHNOLOGY, Lawrence Erlbaum Assoc., pp.19-25 (1995)
- (3) 柴田清: LCAの可能性と限界, BOUNDARY 2, pp.2-6 (1998)
- (4) Held, J. and Krueger, H.: Who is the Designer? The B-VOR Process of Participatory Design, Human-Computer Interaction: Ergonomics and User Interfaces, 1, Lawrence Erlbaum Assoc., pp.1162-1166 (1999)
- (5) Vicente, K.J. and Rasmussen, J.: The Ecology of Human-Machine Systems: Mediating "Direct Perception" in Complex Work Domains, Ecological Psychology, 2, pp.207-250 (1990)
- (6) Woods, D.D.: Coping with Complexity, The psychology of human behavior in complex systems, in L.P. Goodstein, H.B. Anderson and S.E. Olsen (Eds.), Mental models, tasks and errors, Taylor and Francis, pp.128-148 (1988)
- (7) Beltracchi, L. and Lindsay, R.: A Strategy for Minimizing Common Mode Human Error in Executing Critical Functions and Tasks, Proc. 8th Power Plant Dynamics, Control and Testing Symposium, Knoxville, pp.19.01-19.07 (1992)
- (8) Hollnagel, E.: Designing for Complexity, Advances in Human Factors/Ergonomics, 21B, pp.217-220 (1997)

7. 高度情報処理技術による観測データからの法則の発見

7.1 観測データからの尺度制約による科学的法則発見と複雑系への展開

丹羽雄二 (INSS 技術システム研究所)

本研究会の主旨は、原子力工学を主題とする、日本の産学協同によるグランドチャレンジである。ところが、残念なことに、日本からユニークなものがなかなか発信されていない。日本では自然科学系は基本的になにか物事を解決するときの解決学に偏りすぎている。それに対して人文科学系は、観測データから現象を説明する記述学に専心しすぎる余り、解決への具体的な糸口を示唆できていないのではないか。我々が直面するシステムの複雑化は、近年ますます進んでいると指摘されて久しい。これらの複雑なシステム(複雑系)を学術的に取り扱おうとすれば、従来の縦割りの学問の枠に囚われないアプローチが望ましい。

工学は安全を確保するために必要な問題を解決しなければならぬ。しかし、複雑系のモデリングは甚だ困難である。そこで、解決を急ぐあまり、いわ

ゆるソフトコンピューティングが氾濫している。例えば、手続き的にはニューラルネットワークで解けるので、それに頼ってしまう。現象の物理学的な考察や、数学的な妥当性の検証を忘れて、モデルをいきなりたててしまうというアプローチは自然科学の研究に携わる者として避けるべきである。

一方、人文系の学問、例えば、社会学の方は、主流をなすのがアンケートから得たものをデータとみなして、現象の解明ないしは現象の記述にあたるので、結果については直感的になるほどと思うのであるが、結果と解決を結びつける方法を提案している例は聞かない。

複雑系の問題を解決しようとするに当たっては、上記に述べたように、数学的な制約から「原理として成立する式」でモデルをたてるという新たな展開が考え得る。これを第1原理式と呼ぶ。鷲尾助教授によれば、第1原理式は、以下の条件が成り立たねばならない：

1. 「記述」に含まれる属性量が測定ないしは推定できること（客観性）
2. 対象系に含まれる広範囲の現象に対して規範が成立すること（普遍性）
3. 同一条件の元での反復試行に対して規範が成立すること（再現性）
4. 規範に矛盾がないこと（健全性）
5. 規範を表す関係式が数学や構文の公理に従うこと（数学的制約）

さらに、第1原理式は、応用のために簡素に表現されることが望ましい。

ここで、複雑系に関して、自然科学で言うモデリングに何故行き詰まるのかについて、私見ではあるが、私は自然科学が「強い制約」に拘り過ぎているからと結論づけている。「強い」については定義は未だ考察しておらず、今後、議論されなければならない。一つの解決として、制約緩和を考慮したアプローチを提案したい。すなわち、心理学における尺度の導入がこれに該当する。尺度は自然科学系で扱う変数である絶対尺度、比例尺度、間隔尺度の3種類のマッピングを考える。このアイデアは既に後述べるLuceによって提唱されたものである。鷲尾助教授らは、高度情報処理の応用という観点から、Luceの結果を拡張し、多変数系（複雑系）への上記

の尺度制約による第1原理式の発見の原理を確立した。鷲尾助教授らの研究によると、この適用として、複雑な回路網への多数の入力、出力データから、計算機が第一原理式として発見したものは、まさにこの回路網の（電子）回路方程式であった。

以上を簡単にまとめると、尺度の研究にはThurstone, Likert, Guttmanの先駆的な試みを受けて、Stevensによる尺度の体系的分類（1946）、Luceによる尺度間の拘束式の導出（1959）という流れがある。鷲尾・元田両氏は、Luceの成果を多変数系に拡張することに成功したという点で、注目に値する。

本来、尺度制約は人文科学（心理学）の領域における研究から導かれた概念であるから、ここで得られた研究成果を元の人文科学に還元することは有意義である。

一方、INSSとして興味ある問題に、「アンケートから得られるデータは科学的か？」ということがある。この問題は、西原英晃 京都大学名誉教授から社内的な研究会において提起されたもので、この問いに対して否とする根拠は時として私自身が「まじめに答えていない」という事実由来する。この疑問に対しても、今回の共同研究で、アンケートデータは科学的に信頼すると結論付ける傍証が得られたと考えている。

最初に取り上げる問題は出来るだけ簡素なものとするため、地震のリスクを頻度 x で表現し、住宅に投資しようとする価格 y をもって地震のリスクに対する感覚強度とする。実際に研究のためのアンケート調査を試みた結果によれば、地震の頻度で表した物理的強度 x に対する住宅投資額で表した感覚強度 y との関係から得られる予測は次の如くである。

1. 地震に関して、10年に一度以上の高いリスクに対しては感覚は鈍る。
2. 地震に関して、自分を含めて5世代に一度程度のリスクに対しては、有意な反応を示す。

7.2 観測データからの尺度制約による科学的法則の発見と複雑系への発展

鷲尾 隆 （大阪大学 産業科学研究所）

従来の物理的なモデルに比べると、勝手が違う部

分もある。ヒューマンファクター（HF）については過去に累々たる研究成果が積み上げられてきている。しかし、その知識をどう使えばいいのかわからない。ある実験で得られたデータを他の技術と組み合わせて、他のところでも使えるように知識を整理していかないと、その分野の発展はおぼつかない。

人工知能の分野では、20年位前から法則式を計算機に発見させることが研究されている。人工知能学者としても有名で、またノーベル経済学賞をとったハーバード・サイモンという人のグループが中心になってシステムを開発し、その後、いろんな研究者が幾つかのシステムを作った。彼のグループで最初、哲学者 BACON の名前を取って、実験装置を計算機に与えて、いろんな対象運動を計算させ、それから対象を支配する規範的な法則を見つけだそうという試みを始めた。それを引き継いだ弟子たちやそれに刺激された他の研究者達が ABACUS とか COPER とか、いろんなバリエーションを開発している。ところが、実用上は問題があり、実用化には至っていない。というのは、非常に計算量が多く、実験の手間がかかる。結局は、法則式として必要とされる数学的な制約、あるいは記述の関係性ということは考えていない。再現性とか普遍性だけを取りあげている。従って、それが本当に実験式であるのか、操作性を受け入れるという意味での第一原理であるのかという保証がなかった。

またこれらのシステムは統計処理が不十分で、実験上の誤差やノイズに非常に敏感なシステムであった。それに対して、単位次元解析という方法で、単位の情報を使うと、規範的な問題であればみたさなければならぬ第一原理式の形はある程度決まるので、そのモデルの式の探索をすることが出来る。ただこれは物理系ではいいが、社会学系の問題になると、単位がわからないので研究の対象には結局出来ない。単位が分からなくても、尺度の知識から第一原理或は規範的モデルであるための制約的な条件を導く事が出来て、それを使って計算機にモデルを探させれば、規範的なモデルあるいは第一原理法則であるという保証がある程度あって、操作を受け入れることが可能なモデルあるいは法則式を見つける事が出来るだろう。そこで、SDS (Smart Discovering

System) というシステムを開発した。

これは IJCAI (International Joint Conference on Artificial Intelligence) という、人工知能関係の分野では一番有名な国際学会で一昨年、発表した。日本では人工知能学会賞を受賞した。ただ SDS も、実験装置があるような環境を想定し、計算機を使って法則式或は規範モデル式を探すという意味では、BACON と変わらない。

現実の経済問題、社会問題で実験できないところではどうするか。そこからは先ほどいったような規範的なモデル、或は第一原理法則式と呼ばれるようなものが、もし得られれば、これは非常にいいに違いない。それはヒューマンファクターのような分野でも役に立つに違いない。いろんな受動的観測データによってモデルを当てはめる方法がある。ただし、数学的な規範を満たしている可能性ということとを考慮していない。つまり、もともと非線形な現象に対して線形の式を無理やり当てはめてみたり、世の中全てでシグモイド関数で表されたりして、現実はそうでないのに、無理やり当てはめている。要は、近似式で求めている。従って対象系を支配する法則式による表現を最初から概念的に仮定しているから、操作性が保証されている、翻って言うと、先ほどいった操作性が受け入れられるような記述、あるいはモデルが得られる保証はない。すなわちオペレーショナルなモデル（入力操作可能なモデル）が得られる保証はない。そこで、今言ったような背景から、自動的な観測データからオペレーショナルなモデルや、いろんなモデルのフラグメントをあわせると新しいモデルを作れる、と言う意味での第一原理モデル式あるいは規範的モデル式を発見する手法を考え、社会心理学の分野で試みた。

この場合、尺度の制約という数学的制約をつかうということが前提条件である。また、アンケートを作るときあるいはデータ分析をするときに注意を要するのは、対象が取りうる状態のうち極端に偏った部分の観測データからだけでは、グローバルに成り立つような法則式、操作可能な式、規範的な式を求めことはできない。逆に言うと可観測性が低い状態では正しいモデルを得ることが出来ない。

Helmholtz の自由エネルギーとか、熱力学に出てくる量は直接量れない量が多い。結局直接測れない

量が重要な役割を演じている．そこで測定論という分野が生まれた．その後哲学者に受け継がれ，その流れでStevensという人が尺度の分類をした．

比例尺度として思い浮かべやすいものは質量である．質量ゼロはどんな単位で測ってもゼロであり，絶対的の原点が本質的に定義される．間隔尺度というのは，思い浮かべやすいものは温度である．原点は人間が勝手に決めたものである．位置エネルギーもエントロピーも同様である．それに対して絶対尺度と呼ばれているものはStevensが研究しなかったもので単位が無い．これ以外に名義尺度とか順序尺度がある．

Psychological Reviewに，Luce という人が，尺度同士にはある特定の関係しか成り立たないといった．比例尺度同士には，べき乗をして，ファクターをかけたもののみ成立する．我々の研究では間隔尺度と比例尺度の間には逆関数が成り立つことを仮定しているところはLuceの結果と異なる．間隔尺度同士は線形の関係にしかなりえない．なぜそんな関係式しか成り立たないのか．今 X と Y が比例尺度だとしよう． X が一辺の長さで， Y が立方体の体積だとしよう．仮に $Y = \log X$ という関係を思い浮かべたとすると， X は比例尺度だから単位変換できる．体積 Y の値も変わるが，もし X に対して Y に対数の関係があるとすると，単位変換するともとの X' に kX を代入することになるから $\log X$ は $\log k$ だけ増加する． Y' は体積で単位変換された量である．これは何を意味するかというと，体積が原点シフトを起こしている．単位変換に対して原点が移動するというのは， Y が比例尺度，体積が比例尺度である限り，起こり得ない．そういうわけで，一辺の長さ，体積の間には，常識的に \log の関係はありえない．このようにして，体積と一辺の長さの関係に止まらず，Luce は一般的に比例尺度同士の間には，対数関係はありえないということを主張して，同じ，又は異なった尺度間の可能な関係というのは実はこれしかないんだ，というのを数学的に証明した．

Bridgeman という人が物理学の分野で，Product Theorem によって比例尺度間の許容関係を定義した (Physical Review)．Stevens以前のことなので比例尺度という概念は無かった．現在の尺度理論に翻訳すると，変数が比例尺度であるときに，それらの変数

の関係を表す関数はべき乗の関係しかないということ提唱した．それから，Buckinghamという人が，比例尺度で表される変数の方程式があったときに，それを使って全部無次元の二次変数で表すことが出来るということを示した．

それに対して，我々のグループで，先ほどのLuceの知見に基づいて，多変数の式を合成することが出来ることを示した．結局は変数が比例尺度と間隔尺度で表される変数の間には，線形和とべき乗の積，対数からなる関係しかない．ある特定の二種類の関係式しか，比例尺度と間隔尺度の間には直接的な関係はない．測定量は比例尺度と間隔尺度の何れかであると考えて良い．そういった測定量の間関係式は，もしそれが規範的な式であるならば，もしくは第一原理式であるならば，ある種の数学的関係を持つということである．我々が提唱する方法をExtended Product Theorem と名付けた．もともとの測定量があったとき，これを無次元量の式に変換することが出来て，各無次元量はもともとの変数からこういった式で定義できる．無次元量の関係式のことを ensemble と呼んで，各無次元量の数から定義する式を regime という．これは次元解析の伝統的な呼び名である．従って，当然普遍性とか，再現性とはもちろんチェックしなくては行けないが，数学的にこういう関係しかないということが証明されているから，どれが比例尺度で間隔尺度かわかると，それぞれ regime 式に当てはめて，データの中にこういう関係式がないか探していけば良い．こういった式に分解した形で，データ間の関係を認めることが出来れば，規範的な法則式で表すことが出来る．

実は絶対尺度は単位をもたない．Luce の得た結果にない．何の制約も受けない純粋な数である．どんな関係でもありうる．絶対尺度だけは Product theorem にのらない．ただ，我々物理で直接測れる量で，無次元というのはない．測定量は必ず単位を持っている．

データが与えられた時，それからどうやって，上述のような，関係式を見つけるか，ということになる．どの変数がどの regime に属するか，という全ての組み合わせに対して当てはめの計算をすると，膨大な組み合わせになる．そこで， n 個の観測変数があるとき，任意の二つのペアの量の観測値だけに

注目し、他の観測量に関しては、観測量に非常に似通った量だけを持って来る。観測データが沢山必要だという前提はあるが、ある i 番目と j 番目の観測変数だけを除いて、残りの観測変数に関しては、その近傍にある似た値を持つデータを持って来る。ということは、仮想的に、変数 X_i と X_j 以外は値を固定した実験をやったのと等価である。そうすると、部分的に二変数の関係だけが分る。結局、近似的であるけれど、 X_i と X_j の関係が分る。それはどんな式に当てはめてもいいというのではなく、特定の規範を満たした式に当てはめを実施する。あとは求まった式に関しては、組み上げていって、前述の regime を順番に組み合わせて結合して一つのモデルにしていく。このように、多変数系の第一原理式を求めることができる。

先に述べたように、二変数間の関係がわかると、例えば、 X_i と X_j の間の関係が線形であるということが分ったとすると、三つの変数間の関係を試み、成功であるかどうかチェックして、成功であれば一本の式にまとめる。変数が全部で6つあれば、6から3とる全ての組み合わせに関して、整合性をチェックして、全部の係数が互いに整合であれば、一つの式にまとめる。それをすべての関数に関してやって、全体で6変数の式にまとめる。この際に、統計的なフィッティングをやって、カイ乗検定を、Luceの式が、二変数関係式として当てはまっているかチェックをする。ひとつひとつチェックしながら、最後に一つの式にまとめる。

ここで、INSSと共同で試みた例について記す。例えば、30年に一度大地震が来るような場所に3000万円の住宅があるとすると、240年に一度大地震がくるような場所に3億円の住宅があるとか、いろんな組み合わせのパターンを見せて、どのくらいあなたはこの住宅に購買意欲があるかというのを7段階の中から印をつけて選んで貰うというアンケートをやった。リスクとコストと嗜好度の関係式をつくった。ただ、アンケートを取ったときに、リスクというのは何年に一度という比例尺度に該当する。コストも金額だから比例尺度となる。問題は嗜好度である。これが一体何の尺度になるかはアンケートの取り方に依存する。アンケートのときに尺度補正をやり、その時に生のデータを使わないで、系列カテゴ

リー法というやり方で、いわゆる取ったデータの変換を行った。ある事例、例えば30年に一度で3000万円の住宅、という事例に対してどれくらいの人がどういふところに丸をつけたかというヒストグラムが得られる。これに対して、例えば、240年に一度で3億円の住宅、というのはどれくらいの一とがどこにポイントをつけるか、ポイントの低い方から高い方まで、ヒストグラムを取る。そうすると、両者の分布のピークが異なってくる。このピークの相違に着目して間隔尺度の量にデータを変換する方法を系列カテゴリー法という。従って、生のデータを使うのではなく、生のカテゴリーの値を使う。それを全体の被験者の分布に直し、全体の被験者の分布からみた確率変数に直して、間隔尺度に直す。このようにして、数学的に間隔尺度が保証されたデータを得ることが出来る。

それを使って、 X_1 をリスク、 X_2 をコスト、 O を先ほど系列カテゴリーで得た間隔尺度法の嗜好度、ということにして先ほどの Luce の二変数式をあてはめる。残りは比例尺度ですから、 X_1 と嗜好度の間には対数の関係か、べき乗プラス定数の計算式しか成り立たない。そのようなものの、三つ組みの組み合わせが出来る。さらに統計でチェックしてみると、結局二つしか解が出てこなかった。耐用数年との間の関係式と、リスクとコストがべき乗積で組み合わせさせて嗜好度になるという関係式と、数学的に機能を満たしている式が二つしか出てこなかった。ほんとに規範的かどうかを調べるためには、さらに詳しく普遍性あるいは再現性など、さらにデータを取って実際に当てはまるかどうかチェックしなければならない。そういうことをやって操作可能なモデルとして、地震のリスクと嗜好度に関する、あるいはコストと嗜好度に関する第一原理式として受け入れていこうということになる。2変数について説明したが、INSSとの共同研究では、地震リスクと住宅コストがどのように嗜好度に影響するかについても、第一原理式の発見に成功している。今後は、連立方程式とか微分方程式を求めるような研究をこれから目指したいと思う。

7.3 社会現象の第一原理式（連立式）の発見について

鷲尾 隆（大阪大学 産業科学研究所）

今回は観測データ間の関数関係（原理式）が連立方程式で表される社会心理学上の問題を取り扱う。今取り組んでいるのは、Scientific Study Systemであって、要は、実験あるいは観測で得られたデータから資料間の関係のシステムを発見して、法則式（第一原理式）を求めることである。最初は実験で得たデータから基本的な法則式を導くことを試みた。今回は連立方程式（第一原理式）を実験系に対して求める方法を開発したのである。すなわち、社会現象に関しても第一原理式を導く方法を開発した。

今回は観測系で観測測定値の間の相関情報と連立方程式が持っている完全部分集合とを結びつける研究について報告する。それを公衆の社会基盤に関わる心理的な数量間の依存関係に適用する。該当する連立方程式を発見するためには、連立方程式がどんな構造を持っているかを知ることが必要である。先ず、どの方程式にどの変数が現れるかというトポロジーを 0, 1 のマトリックス（接続行列）で表す。その上で変数間の依存関係を調べ、どの変数がどの時期に現れたらよいかということ逐次に見つけるのである。そのためにはいろいろな数学的な整理が必要である。まず、ある変数の値を固定（統制）してみる。そして別の変数を操作（操作）したとき、どの変数とどの変数の値が決まるか（決定）ということを実験的に調べる。観測データの場合には、このような統制 操作は出来ない。そこで仮想的で近似値的な統制を行って相関係数を求める。「対象系が取り得る状態について極端な偏りのない観測データが得られていること。」という条件が成立する場合には、以下に述べる数量の近似的な統制及び操作を行うことで仮想的な実験が可能になる。

対象を表す数量の中で、幾つかの数量を近似的に統制することを考える。観測データから統制すべき数量についてある近傍の値を持つデータのみをサンプリングすることによって、近似的に統制したデータを取り出すことができる。このようなサンプリングを“準統制”と呼ぶことにする。これに基づく仮

想的実験を通じて、各数量ペア間の定量的制約関係を求める。もし他の数量の準統制下である数量ペアが十分有意な相関を示せば、その数量間には制約関係にあると見なされる。このことはデータのばらつきを利用して仮想的にある数量を操作し、他の数量値の決定を確認することに相当する。そこで、このような仮想的操作を“準操作”、他の数量値の仮想的決定を“準決定”と呼ぶ。数量ペアが十分有意な相関を示すか否かは、統計検定で評価可能である。

以上で述べた基礎原理に基づいて、観測データから対象系を表す連立方程式の基本構造を同定するアルゴリズムを考案した。入力として対象系のモデル化に使用する数量のリストと、それらの受動的観測値の情報を与える。そして、少数の数量の準統制からはじめ、準操作を通じて他の数量の中に準決定される数量が生じる組み合わせを探索する。発見された準統制及び準操作、準決定数量の組み合わせは、完全部分集合の独立成分として同定される。更に、完全部分集合のモジュラ束構造を利用し、ある独立成分が得られればそこまでに得られた各独立成分中の自由度の数量及び何れの独立成分にも含まれない数量を準統制及び準操作に用いる。これを繰り返して全独立成分を導出することで、観測データが表す対象系の数量間依存構造に忠実であることを保証した連立方程式の構造正準形を得る。

以上によって得られる対象系の構造正準形に基づき、筆者等が提案した観測データからの法則式発見手法を適用して各方程式の定量的形式を 1 本ずつ求めることができる。当該手法は、はじめの節で述べた「各数量のスケールタイプが知られていること」という仮定の下で、尺度制約と恒等制約という 2 つの数学的制約によって、数量関係の探索空間を効率的に削減する。また、上述の準統制及び準操作と同様に着目する 2 数量以外を仮想的に統制し、2 数量間の定量的関係を導出するデータフィッティング手法を用いる。そして、これにより求まる各 2 数量関係をボトムアップに合成して、多変数から成る 1 本の完全方程式を得る。ただし、1 本の式に含まれる数量の数が少ないほど当該手法の同定処理の効率が良いことを考慮し、数量の代入消去によって対象系の構造正準形の各式に含まれる数量の数が最小になるように変形してから、当該手法による処理を行う。

社会現象への適用への試みとして、この Framework に従ったアンケートを作成し、その集計は完了している。その主題は、諸々の社会インフラストラクチャ（火力発電、原子力発電、ゴミ焼却場他）に対して、それらのイメージを形成する因子の依存関係を求めることである。

現在のところ、データの構造については、大体のものが得られたが、具体的な連立方程式の形までは求められていない。

8. 結言

思い思いの研究が進められており、明確な焦点を結んでいないという印象は避けがたい。将来、どの研究が発展して本流となるのかは予測できないので、この事自体に問題があるのではないが、外国生まれの新しい着想を追いかけるのではなく、静かに深く思索することが肝要である。

一方、基礎研究と原子力発電技術との協力研究が数々の実を結びつつある事はよろこばしいことである。このような実績に基づいて虚学に陥ることなく、技術の向上に役立つ成果を目指したい。

なお、この報告の作成については、西原宏前技術システム研究所長の協力を得たので、ここに記して謝意を表明する。