メンタルワークロードへのアプローチとしての認知モデル*

伊藤謙治**

1. はじめに

情報技術，ネットワーク技術の急速な進歩とともに，我々をとりまく様々な環境にコンピュータ，VDTなどを応用した機器が導入されている．そのため，人間の認知・情報処理の機能を中心とする“認知”作業が，以前とは比較にならないほど増加している．このような作業形態の変遷，および社会環境の変化に伴い，作業設計，機器・システム設計を含む人間工学の役割も，従来の物理的な負荷の軽減から，精神的な負荷の適正な配分へと比重が移ってきている．これらを背景として，メンタルワークロード (mental workload: MWL) 研究の重要性が認識され，ISO の規格制定¹⁾などの動きにつながっていることは周知のとおりである．

ISO 制定の目的は，対象とする範囲の研究成果を作業システムの設計などの工学的利用に向けて，共通の認識のもとで促進していくための基本的および応用的原則づくりにあると思われる．このような観点から眺めてみると，MWL だけでなく工学的応用を目的とする人間工学の分野における学術の進展は，図 1 に示すように対象の範囲規定，定義から始まって，設計への指針，一般的なガイドラインの提供に至るまで，ある程度の同時並行性を保ちつつ順次推移していく．工学的応用に対する最終目標である設計に対するガイドラインの提出など，ひとつおりの成果を達成した後も，さらに対象の見直し，拡張などを行い，このサイクルを再び繰り返すことにより，学問領域としてさらに発展していく．

日本人間工学会第 33 回大会時点 (1992.5) における MWL 研究の比重の中心は，対象の定義から特性値，測定方法の確立あたりにあったかと思う．今日ではこの分野の研究成果の蓄積と，ISO 委員をはじめとする多くの関係者の膨大な努力により，その比重はしだい

に次の問題構造・因果関係の解明の段階に移ってきていると実感される．

このような研究の進展過程のなかで，MWL 研究における認知モデルの構築 (cognitive modeling；厳密な意味では認知モデルそのものというより，人間の認知過程をモデル化することであるが，以下，認知モデルという語を用いる) は，人間の処理・行動，または作業要因に対する人間特性への影響を簡潔に要約・記述し，そこから設計に対する指針，ガイドラインを提出する基礎になるものと位置づけられる．そのため，ここで構築する認知モデルは図 1 における他の段階の研究と代替的あるいは排他的関係にあるのではなく，あくまでも前段階で研究された特性値，要因，およびその測定方法など，それらの研究成果を取り込んだものである．すなわち，研究成果の工学的応用という観点から，これらの研究で得られた成果は簡潔で理解しやすい表現で要約されている必要があり，そこからなんらかの客観性のある設計指針が提供されることが重要である．

本稿では，このような工学的応用という立場に立って，特にマン・マシンインタフェースや作業設計時の分析・評価という観点から，MWL 研究のひとつのアプ

図1 工学的応用研究の進展

* 平成5年10月7日受付

** 東京工業大学 工学部

Faculty of Eng., Tokyo Institute of Technology.

ローチとして認知モデルについての考え方を論じ、MWLの定量的評価に適応可能な情報推移モデルを紹介する。

2. MWLへのアプローチ

2-1. MWLの難しさ

作業遂行において人間に与える影響は、図2に示すように物理的・肉体的なものと精神的・認知的なものに大きく分けて考えることができる。これらのうち人間に与える精神的な負荷・影響がMWLである。作業設計やインタフェース設計を行う際に、MWLを考慮に入れなければならないことはいうまでもないが、このとき外部から人間に精神的影響を与えるストレス(stress)が適正になるように、作業の要因や設計項目を決定しなくてはならない。しかし、一般にストレスを直接測定したり、定量的に把握することは困難であり、作業遂行時のストレスによる影響であるストレイン(strain)を測定し、ストレスの質や大きさを推測することになる。

ストレスとストレインの関係は単純ではなく、活性化などのように、ストレスによりストレインに対する正の効果が得られる場合があったり、逆に精神疲労といったような負の影響を発生させることもある⁹⁾。また、作業遂行により実際に受けている精神的負荷は大きいにもかかわらず、その影響の発現は小さいということもある。このようなストレスとストレインの関係はいつも一定であるのではなく、人間個人の特性、そのときの状況などによっても異なり、その把握、取り扱いをさらに困難なものにしている。

このような性質をもつMWLを定量的に把握、分析する手段として、通常最もよく用いられている方法が実験による検証である。しかし、一般にインタフェー

ス設計などにおいて実験を行い、その結果を設計に応用していくには、非常に膨大な労力と費用が必要とされる。

たとえば、実験の準備段階として、設計した(あるいは設計代替案の)インタフェースに対する実システム、あるいはモックアップモデルを作成しなければならない。また、実験実施段階においては、実験データの信頼性を確保するために、対象とするユーザグループに属する多数の被験者を集める必要がある。さらに、このような膨大な実験データを解析するには多くの労力を要し、一貫性のある結果を得るのが困難な場合もある。

2-2. 認知モデルのMWLへの期待

設計システムの評価において、実験が最も信頼性の高い、そして確実な方法であることに疑いの余地はないが、以上述べたように、この方法は時間的、費用的にかなり高価な方法である。このような膨大な努力を必要とする実験を行わなくても、設計者が安心して(“いい加減”という後ろめたさを感じず)設計項目を決定できるという点が、認知モデルに最も期待されていることである。すなわち、実システムをつくり、数多くの被験者で実施しなければならない面倒な実験を行わずに、インタフェースを素早く、客観的に評価したいという要求である。

このような要求においてMWLという対象を考えると、ストレスとストレインの関係、そしてこれらと作業要因との関係を因果モデルとして、あるいは人間の行動を挙動モデルとして明確に表現することが、認知モデルの機能として必要である。さらに、このモデルからある与えられた作業条件に対するMWLの状況を予測し、その結果を作業設計、インタフェース設計などに応用することが、MWLに対する認知モデルの主要な役割と考える。

図2 メンタルワークロードの範囲と定義

3. 認知モデルのタイプ

3-1. 認知モデルの利用目的

前節では、認知モデルの MWL 研究への期待として、設計した作業システムあるいはインタフェースの評価・分析に対する実験の代替方法としての役割を論じた。このような利用目的のほかにも、作業あるいはシステムの分析・評価の方法として、認知モデルを利用しようという試みは従来からさかんに行われており（従来は必ずしも認知モデルという名称は用いていなかったが）、その利用形態は多岐にわたっている（たとえば^{2~4)}）。ここでは、認知モデルの利用目的と意義について、さらに広範囲に考える。

まず、実験に対する代替の利用という目的においては、構築した認知モデルを使って、なんらかの計算やシミュレーションを用いて、実験で得られるものと同じ指標や特性値（たとえば作業時間やエラー率）、さらに実験では得ることのできない概念的あるいは抽象的な指標（MWL などこれにあたる）に対して、実際の作業条件を適用したときの値を推定し、それにより対象システムの評価、比較を行う。

一般に、人間の認知処理を明確に表現すること自体が困難で、このような認知行動の適切な記述を行うことにより得られるメリットは大きい。すなわち、人間の頭のなかの処理過程を陽に表現することにより、その作業の内容や問題点を明らかにすることをめざして、認知モデルを構築しているケースも多い⁴⁾。

一例をあげると、ある作業を行ったときのエキスパート（専門家）とノービス（素人）の認知モデルをそれぞれ構築し、それらを比較、分析することにより、オペレータに対するトレーニング方法や、提示すべき情報として何が重要かといった決定に役立てることができる。このような目的で航空機や船舶の操縦といった高度な認知処理を必要とする作業を分析し、その問題点から新たなインタフェース設計への指針を得るという事例もある⁵⁾。また、エキスパートシステム構築において、エキスパートの知識構造の表現形式として認知モデルを作成し、それをシミュレーションすることによりエキスパートシステムを実現しているものもある⁶⁾。

認知モデルを作成するメリットとして、さらに作成したモデルの対象とした作業に対する分析・評価だけでなく、他の作業・システムに対する応用への可能性もあげられている。たとえば、構築が比較的容易な単純な作業の認知モデルから、さらに複雑な作業に対す

る設計、改善に対する示唆が得られることもある⁷⁾。

以上に述べたインタフェースや作業システムの設計などへの適用をさらにブレイクダウンしていくと、認知モデルには以下に示す能力が必要と考えられる。

- 人間の行動（作業）を記述する。
- インタフェース・作業システムで必要とする機能を記述する。
- 作業条件・要因に対する影響・状況を予測する。
- 人間の行動、インタフェース、作業システムなどがある観点（たとえば MWL）から分析・評価する。
- インタフェース・作業システムの問題点を抽出する。
- インタフェース・作業システムの設計への指針として利用する。

3-2. 認知モデルの必要条件

前項で列举した利用目的あるいは能力に対して、認知モデルは以下に示す条件を満足することが望ましい。言い換えれば、認知モデルはこのような利点あるいは潜在能力をもっており、モデルの利用目的に従って個々の条件を満たすモデルを構築する必要がある。

- 本質的部分だけの記述により、作業全体を簡潔に要約できる（モデルを必要以上に複雑にしない）。
- モデルを客観的に、精度よく表現できる（信頼性の高い記述）。
- 特に注目している要因、関係について適切に表現できる（的確な表現能力）。
- 人間の行動を実際の観測をすることなく、簡単に予測できる（タスク分析への応用性）。
- 関連を視覚的表現により明確に、そして容易に把握できる（人間が理解しやすい表現）。

3-3. 認知モデルの分類

認知モデルをモデルの内容、表現形式などに関するいくつかの観点から分類すると、以下に示すタイプに分けることができる。それぞれの分類項目に対しては、ここでは両極端の2つのレベルを記している。

- 抽象レベル：どの程度の概念レベルでモデルを記述するか？
マイクロモデル vs. マクロモデル
- 記述内容：何を中心に記述するか？
挙動(行動)モデル vs. 因果(構造)モデル
- 記述対象：対象・適用範囲はどの程度か？
汎用モデル vs. 専用(特殊)モデル
- 表現形態：どのような形式で表現するか？
数理モデル vs. 非数理モデル(自然言語, 専用記

表1 認知モデルの分類と特徴

項 目	モデルの特徴	構築の 容易さ	適用 範囲	表現 能力	表現の 厳密さ	理解の 容易さ	タスク 分析
抽象レベル	マイクロモデル	○				△	○
	マクロモデル	△				○	△
記述対象	汎用モデル	△	○	△	△	△	△
	専用モデル	○	×	○	○	○	○
表現形態	数値モデル	○	×	×	○	×	○
	非数値モデル	△	○	○	△	○	○
確実度	確定モデル	○	△	△	△	○	
	確率モデル	×	○	○	○	△	
特性表現	定性モデル	×	○	○	×	○	△
	定量モデル	○	△	△	○	○	○

○：良， △：中， ×：悪。空欄は関係なし。

述言語，図式，…)

- 適用理論：モデルの基礎となる理論は何か？
心理モデル vs. 生理モデル
- 特性表現：要因，特性値の表現はどのようなものか？
定量モデル vs. 定性モデル
- 確実度：事象の発生頻度は？
確定モデル vs. 確率モデル

これらの分類項目に対して，どのような形式を適用してモデルを構築するかは，モデルの利用目的や対象に依存する。これらのモデル分類項目と，①モデル構築の容易さ，②モデルの適用(応用)範囲，③モデルの表現能力，④モデル表現の厳密さ(曖昧さ)，⑤モデル理解の容易さ，および⑥タスク分析の容易さ，といったモデルの特徴とのおおまかな関係を表1に示す。

4. 認知モデルの例—情報推移モデル—

本節では，ワークロードへのアプローチを可能としたマン・マシンインタフェースの分析・評価に利用できる認知モデルの例として，情報推移モデル⁸⁾を紹介する。このモデルは，3-3で区分した認知モデルのタイプ分類という観点からは，人間の挙動をそれぞれの行動に対して詳細に図式より表現したマイクロモデルである。また，記述対象としては認知作業全般に適用が可能な汎用モデルであり，理論的な基礎の多くは心理学的モデルによっている。

以下，モデル化の考え方，内容を簡単に論ずるが，

構築法などに関する詳細については文献⁹⁾を参照していただきたい。

4-1. モデル化の概念

(1) 処理と状態

認知作業は図3に示すように，外部環境および記憶など，様々な情報に対する変換過程と特徴づけることができる。ここでは，心理学的な記憶システムに焦点をあて，そこで保存されている情報の状態に変化を与えるプロセスを処理として，記憶間の情報の流れに沿ったモデル化を行う。これは，認知作業におけるヒューマンエラーの多くは，短期記憶に対するオーバーロードに起因しているという事実によるものである⁹⁾。

(2) 情報処理単位

表2に示すように，1つの記憶から他の記憶(または同じ記憶)へ移る処理を人間の情報処理の最小の単位として区分し，これを情報処理単位とよぶことにする。情報の形態あるいは内容が同じで，同一の記憶間の同一方向の情報の流れは，同一の情報処理単位とする。このような情報の形態と貯蔵位置による分類に従うと，情報処理単位は表2に示すように8つのカテゴリに分類できる。同一の情報処理単位ではすべて同じ特性をもつと仮定し，処理の分析の際にはワークロードと信頼度は同じと考える。ここでは，後に論じる新幹線の運転台の設計への適用に際して，これらの作業条件，環境などを考慮に入れ，それぞれの信頼度とワークロードの係数として，表2のいちばん右の列に示した値を利用する。

(3) 入力情報源

認知作業は様々な情報に対して処理を行うので，これらの情報の違いを的確に表現する必要がある。ここでは知覚の際の処理のしやすさ，およびその信頼度の違いから，内部環境，外部環境，記憶情報，および他人からの情報に区分する。

(4) 認知作業のモデル化

上記のモデル構成要素に対して，人間の行う認知作業を図式で表現する。すなわち，人間の処理器官であ

図3 情報推移モデルの考え方

表2 情報処理単位

典型的 処 理	情報の流れ		情報の変化		値の例	
	from	to	形態	場所	信頼度	WL
知覚	情報	感覚記憶				
聴覚	内部環境				0.999	0.20
	外部環境		○	○	0.850	0.70
視覚	内部環境				0.990	0.30
	外部環境				0.900	0.60
反射	感覚記憶	短期記憶	×	○	1.000	0.10
認識	感覚記憶	短期記憶	○	○	0.990	0.80
変換	短期記憶	短期記憶	○	×	0.950	2.00
保持	短期記憶	短期記憶	×	×	0.980	0.50
貯蔵	短期記憶	長期記憶	×	○	0.900	1.50
参照	長期記憶	短期記憶	×	○	0.950	1.00
操作	短期記憶	効果器	○	○	0.999	0.30

る記憶内の情報の状態および外部情報をノードで、また作業の処理要素である情報処理単位はアークで表現する。このようなノードとアークを使用して、対象とする作業全体で行う処理をモデルとして表現する。通常、経過時間に従って上から下へノード間をアークで結び、一連の処理として作業をモデル化する。このように、特定の認知作業に対して構築したタスクモデルは、直列的な処理とともに、同一列上に複数のノードを並べることにより、同時・並行処理も表現できる。

(5) 認知作業の評価

作業あるいはインタフェースに対する分析・評価として、上記のように構築されたタスクモデルを構成する個々の処理、すなわち各情報処理単位に対して、作業全体または作業のブロックごとに、モデルの構造に従った所定の方法により、それらの信頼度とワークロードを求める。このような方法の利点として、これらの特性のほかにも、各情報処理単位に対する係数値を設定することにより(設定することができれば)、たとえば“作業の楽しさ”といったような新たな観点から作業、あるいはインタフェースを評価することが可能となる。

4-2. 新幹線運転への応用

以上の情報推移モデルを新幹線の通常走行の分析・評価に適用する。現在の東海道新幹線 100 系電車の運転台の概要を図 4 に示す。ここで、通常走行で最も重要なことはスピード制限、電力消費量など、与えられた運転制約のもとで、それぞれの駅を決められた時刻に通過、あるいは停車するといった定時運行である。

このような運転目標に対して、運転手は自分自身でチェックポイントを決めておき、そこを通過するとき

に各計器からの情報、運行表に書かれている予定時刻、制約条件、そして車外からの情報により、次の駅までの走行スピードを決定する。そして坂の状況などを考慮し、そのスピードに対応するスピードレバー(ノッチ)の位置を決定し、運転していく。この作業を情報推移モデルで表現したタスクモデルを図 5 a に示す。

この図から、現在の運転台における通常走行タスクは、(1)チェックポイントの発見、(2)次の駅までの距離計算、(3)次の駅までの残り時間の計算、(4)走行スピードの決定、および(5)ノッチの操作、という 5 つのブロックで構成されていることがわかる。この図には、表 2 の各情報処理単位の数値を合成して、作業全体とそれぞれのブロックに対する信頼度とワークロードが記されている。

このように作業を分析した結果、この例では特に(5)の要素作業が、信頼度低下の大きな原因となっていることがわかる。ここで、この作業ブロックに存在する各ノードの個数を集計すると、運転手の長期記憶の情報に依存していることが分析できる。

一方、ワークロードに関しては(4)の要素作業に特に大きなロードがかかっている。これについても、このブロックのグラフから、運転手は数多くの情報源に対して、同時に処理を行わなくてはならず、短期記憶にかなりの負荷がかかっていることがわかる。

このような分析結果に従うと、たとえば次の駅までの走行スピードといった、より高次元の情報の追加、および運行表に記載されている情報も含めて、必要な情報を狭い範囲にまとめて提示するという改善点が示唆される。このような作業改善を行ったときのタスクモデルが図 5 b である。これら新旧 2 つのタスクモデルとその評価結果から、現状モデルの問題点と改善に対する効果を容易に理解することができる。

5. おわりに

本稿はメンタルワークロードに対するアプローチの

図4 新幹線 100 系電車の運転台の概要

図5 情報推移モデルを適用した新幹線運転

仕方のひとつとして認知モデルを取り上げ、その考え方と現状における利用方法などを簡単に論じた。さらに、このような認知モデルのひとつの例として、人間の情報処理過程を図的に記述することにより、認知作業全体の信頼度、ならびに短期記憶などの処理器官への負荷を評価できる情報推移モデルを紹介した。

著者はメンタルワークロードの専門家でなく、不勉強であるため、本特集の意図に対して内容の不適切な部分、または独断と偏見に満ちている部分が多々あったことと思う。ここで改めてお許しを願いたい。本稿の意図としては特に、人間工学の「工学」という側面から、インタフェース設計などに対してなんらかの示唆を期待されているという応用面を協調して、認知モデルを論じたつもりである。このような意味からも、現象をありのままに正確に記述するというだけでなく、メンタルワークロード発生機構、因果関係をわかりやすい表現で記述する潜在能力を有する認知モデルは、今後の研究として重要と考える。

本文中で述べたように、認知モデルは潜在能力としてはメンタルワークロード研究に対しても非常に大きな可能性を秘めている。しかしながら、現状の認知モデル研究のほとんどは、本稿で紹介した情報推移モデルも含めて、人間の認知過程についてはなんらかの方法により明らかになっていることを前提として、そのうえでそれをどう表現するかといったことを問題としている。実際には、外部からみえない人間の頭のなかの認知過程を、どのように明らかにするかが大きな問題であり、ここにはエキスパートシステム開発における知識獲得と同様の困難さがある。

現状では、これらに対してパーパルプロトコルを採る方法、眼球運動をモニタリングして情報獲得過程から認知過程を推測する方法など、様々な方法論が試みられており、今後の研究成果に期待するところである。このような認知過程の抽出方法の進展とともに、認知モデルの重要性、適用可能性もさらに増し、メンタルワークロード研究への応用もますます大きくなっていく

くものと思われる。

参考文献

- 1) ISO 10075 : Ergonomic Principles Related to Mental Work-Load—General Terms and Definitions, 1991.
- 2) Card, S. K., Moran, T. P. and Newell, A. : The Psychology of Human-Computer Interaction, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, 1983.
- 3) Payne, S. J. and Green, T. R. G. : Task Action Grammars : A Model of the Mental Representation of Task Languages, Human-Computer Interaction, 2, 93~133, 1986.
- 4) Rasmussen, J. : Information Processing and Human-Machine Interaction, North-Holland, New York, 1986.
- 5) Hansen, J. P. and Jakobsen, V. B. : Validating the Cognitive Fidelity of Simulated Realities, Informatique '93 : Interface to Real and Virtual Worlds, Montpellier, France, 1993.
- 6) Løvborg, L. and Brehmer, B. : NEWFIRE—A Flexible System for Running Simulated Fire-Fighting Experiments, Technical Report, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, Risø-M-2953, 1991.
- 7) Rasmussen, J. : Personal communication at Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1993.
- 8) Itoh, K. and Enkawa, T. : Analysis and Evaluation of Cognitive Tasks Using an Information Transition Model. In Bullinger, H.-J. (ed.), Human Aspects in Computing : Design and Use of Interactive Systems and Work with Terminals, Elsevier, Amsterdam, 646~650, 1991.
- 9) Olson, J. R. and Olson, G. M. : The Growth of Cognitive Modeling in Human-Computer Interaction, Human-Computer Interaction, 5, 221~265, 1990.