II. ヒューマンエラーの研究に必要な工学手法

野 呂 影 勇 (早稲田大学)

1. はじめに

ヒューマンエラーに対してどのような研究のアプローチがなされているのかについて、二つ、すなわち動きの素早さと、なぜ間違えるかに絞って解説する。もとより、様々のアプローチが可能であるし、実際に行われている。(財)電力中央研究所のヒューマンファクター研究センターのヒューマンファクタ文献情報に詳しく掲載されている件数も平成4年1月までで、1,500件あり、これらの文献のなかには、ヒューマンエラーを扱っているものも多く、そしてアプローチも多様である。二つに絞ったのは、読者の大半が、システムのヒューマンファクタについて親しみが薄いことを配慮して、入門的な内容にしたためである。ところで、ヒューマンファクタという用語は、日本語に訳すと人間工学のことである。エルゴノミクスという用語も使われる。人間工学の測定の基本的なコンセプトを表1に示す。

表1は、単に概念を示したにすぎない。実際上は、対象や、目的により異なってくる。表2は原子力発電所の集中監視室のパネルの場合である。

表2は、表1と一見無関係のようにも見えるが、そうではない。表3のなかにいくつか出てくる“視線”は、人がどこを見ているか、すなわち、注視点を知るため人間工学で代用特性としてよく使われるものである。測定された視線は、視線の移動速度や移動距離と角度などの項目について解析されるし、時として視線と誤まりの関係を調べたりする。2.1と2.2節では、まず、表2の行動や身体の動きに関連して、動きの素早さを測る方法、そして2.3節では、注視点を知るための方法を紹介する。メンタルな状態を測る方法につ

表 1 人間工学の測定の基本コンセプト

コンセプト	説 明	主観的な測定／客観的な測定か
寸 法	距離と角度	客 観
力	人が機械に加える力、ときとして人に加えられる力の場合もある	客 観
速 さ	操作時の処理速度	客 観
誤まり	操作時の誤まり	客 観
意 見	感覚申告	主 観

表 2 パネルのデザインの評価の方法

・行動の経路を測る	タイム/タスク/動作/視線/プロトコル*表
・身体各部の動きを測る	ビデオ
・視線の動きを測る	眼球運動
・メンタルな状態を測る	意見や生理的計測

*プロトコルとは、オペレータが操作中に漏らしたり、訴えたりした言葉から装置についての評価情報を得る方法である。

いては心理学や生理学の方法が使える。ここでは扱わない。

2. 動きの素早さを測る

急ぐと間違える。ヒューマンエラーと動作の早さの間には密接な関係がある。情報が、一瞬の間に頭の中でどのように処理されるのか、そして、筋肉に命令を下すのにどのくらい時間（これを反応時間と呼ぶ）を要するかは、ヒューマンエラーに密接な関係のある指標である。まず反応時間の定義について紹介する。

2.1 反応時間の定義⁽¹⁾

ある感覚刺激を受けて、それを意識し、随意的にできるだけ早く反応動作を起すときの、刺激の提示から反応までの時間を反応時間（response time）という。

この反応時間は、

- (1) 感覚受容と神経繊維を電気信号が伝導するに要する時間
- (2) 大脳中枢での情報処理に要する時間
- (3) 中枢からの指令により筋肉を緊張して、体の必要部分を動かすのに要する時間

II. Engineering Methods for Human Error Research.

By Kageyu Noro (Waseda University)

キーワード：反応時間、眼球運動、視作業、モデル、判断、感情

表 3 単純反応時間の実験と選択反応時間の実験値

単純反応 (ms)	選択反応 (ms)
283	530
255	499
423 *	483
平均値 269	504

この表の・の値は、キーから手が滑って失敗したものである。それを除いて平均値を計算した。

に関係しており、おおよそ上記3要素の合計である。ところで、中枢神経系は、脳と脊髄（脊髄神経節と神経）から構成される。

まず、目から入った情報（視覚情報という）の処理がどのように人間の中で行われるのかについて、それを測る方法として反応速度の実験を紹介する。

一番簡単な方法としてよく知られているものは、合図があったら即座にボタンを押すという実験である。この実験のためには、反応時間測定器なるものが主に教育用として販売されている。プレイランドのもぐら叩きもこの一種である。表3と表4の数値は、単純反応時間の実験と選択反応時間の実験から得られたものである。ここで、単純反応時間とは、光の刺激が認められたら直ちにキーを押すといった課題である。ほかに選択できる行動はない。選択反応時間とは、赤の信号で1のキーを押す。青の信号で3のキーを押すといった課題をいう。表3に、単純反応時間の実験と選択反応時間の実験値を示す。この表では、繰返しが3回だけである。もっと多く繰返した方が良さそうであるが、少ない繰返しでも、人を変えてもほとんどこの傾向は変わらないという特徴をもつ。

表3の単純反応時間の平均値と選択反応時間の平均値の差は、何から起るのかを考えてみよう。まず、筋肉に命令を下すまでの、經由する人の各部と装置の関

表 4 情報の伝達経路別所要時間⁽²⁾

遅延箇所	遅延 (ms)	
	単純反応	選択反応
感覚受容器	1~38	1~38
求心性神経伝導	2~100	2~100
中枢処理	70~100	90~300
遠心性神経伝導	10~20	10~20
筋肉潜時と活性化時間	30~70	30~70
反応時間または全遅延時間	113~328	133~528

係を図1に示す。

この伝達経路は、人間のどのような生活場面でも成り立つものである。反応時間については、人間内情報伝達経路別に数値が計測されている。それを表4に示す。

さて、先ほどの反応時間の実験で得られた数値（表3）を表4の一番下の欄の数値と比較してみる。単純反応、選択反応とも、この値の範囲内にあることがわかる。ところで、表4の両者の数値の差のある箇所を探してみると、中枢処理のところである。従って、両者の違いは、中枢での判断の難しさの差といえる。単純反応時間と選択反応時間の違いは、中枢では、その差を100 msほどの時間として処理していることになる。逆にいえば、中枢における仕事の差を時間の差として捉えていることになる。

さて、ドライバが信号が赤に転じたのを見て、ブレーキを踏んだときの様子を取り上げる。車と信号の関係は、抽象的に描くと、図2に示す人間と機械の関係（マンマシンシステム）で示される。ただし、ディスプレイは、交通信号であってもよいが、この図では車のメータである。

図2は、古くからある有名なものである。人間と機械のシステム、これをマンマシンシステムと呼ぶが、

図 1 装置と人間内情報伝達経路の模式図⁽²⁾

図 2 人間と機械の間のつながり

表 5 自動車の操縦における反応時間の例

	反応時間	応用例
(1)	足を動かす筋が収縮するまで	ドライバーが、初心者かベテランか
(2)	ブレーキが作動開始するまで または ブレーキが作動完了するまで	ドライバーとブレーキの 作動の総合評価
(3)	ドライバーが障害物を発見したとき から自動車が停止するまで	

反応時間は変りうる。操縦のベテランと初心者の違いで、ブレーキペダルの遊びのありなしで違う。

この図は、その基本構造を説明している。また、互いのつながりは、電気信号であったり、機械的に力の伝達であったりする。さて、この図で、反応時間とは、Aから中枢を通りBまたはCまでを指す。

2.2 反応時間の代表的な解釈と応用例

反応時間の定義に示してある“反応までの時間”には、いくつか考えられる。先ほどの図2の車と信号の絵で考える。そうすると、表5のように、三つに分類される。各々に該当する応用例も示してある。

以上、反応時間について説明した。この反応時間により、中枢神経の働きをとらえることが理解できたであろう。ところで、急ブレーキが上手だったりすると反射神経がよいなどという場合がある。しかし、これは誤りである。定義にあるように、反応時間は、“それを意識し、随意的に反応”されることが必要条件である。ぞくという反射神経での“反射”とは、神経などの仕組みにより、刺激に自動的に反応するものである。多くの生存に直接影響を及ぼす機構にこの反射の仕組みが備わっている。

2.3 眼球運動に基づいた人間の情報処理構造

2.1節で、ドライバが信号が赤に転じたのを見て、ブレーキを踏んだときの様子を取り上げた。この状況では、ドライバが信号を見て、赤に転じたことを認め

図 3 視野が大きいくほど正答率が低下する⁽³⁾

ることが前提である。この行為は一瞬の間に行われる。しかし、ある時間を要することは確かである。2.1節で述べた反応時間測定器による実験も同様である。しかし、こちらの場合は、赤や青の表示灯を被験者の眼前に置くことになるので、比較的に最小の所要時間ですむ。これに対して、ドライバが信号を見る場合は、信号はドライバの眼前に置かれていないからそれだけ時間を要する。なぜ時間を要するかについてはいろいろな要因が考えられるが（例えば対象の認めにくさ）、大きなものの一つに、視線を移動するのに要する時間があげられる。例えば、図3は視野の大きさと誤りの発生との関係を示している。

人間は、視野が狭い場合は、大きく視線を動かすことはないが、24度といった大きな視野では、大きく視線を動かすことが必要である。視作業において、人が採る視野の目安として、ガラス表面の微小きずを検査するのであれば、視野は2度、ディスプレイ画面全体を眺める場合、18度～20度以上となる。ところで、視線の変化は眼球の運動により生ずる。従って、眼球の運動を上手に測定すると、視線の変化が推定できる。眼球の運動の測定には、光学的なプロセスによるものと電気的なものの2種類ある。以下にそれらを説明する。

(1) 角膜反射法（光学的方法）の原理 眼球の角膜は、曲率半径が約8mmで、強膜（曲率半径約13mm）に対してやや出っ張っている。角膜表面は鏡面のように滑らかである。図4のようにLED光を当てると虚像が生じ、この位置は眼球運動により変る。

図5は角膜反射法の装置の一例である。装置はアイカメラとかアイマークレコーダなどと呼ばれている。図6はこの装置を用いた測定例である。

角膜反射法の利点は、背景を写しこむことができることである。これにより、より説明力がつくともいえ

るが、視野の周辺部での誤差（測定されたアイポイントと実際に注視しているポイントとの間の誤差）は多少出る。欠点は、どうしても装置そのものが重たいこと、装着するときに頭部にかかなりの締め付けを行う製品などもあって、長いこと続けていられないという場合もあることである。

図 4 角膜反射法の画理

アイマークレコーダを頭部に装着している。標準視標を表示したパネルが被験者の前に置かれている。実験者がキャリブレーションを行っている。

図 5 角膜反射法

(2) 眼球電位図法（電気的方法）(Electro-oculogram) の原理 網膜の表裏には静的な電位差がある。この電位の変化は眼球の回転角にほぼ比例する。

次に測定例を紹介する。図 8 は、ディスプレイ上に格子状に提示された視標を矢印の方向に見ていく仕事の図解である。

この場合の眼球電位図法によるグラフは図 9 のようになる。(a) は、間違えずに視標を見ており、(b) は、途中乱れが生じている。視標の認め損ないが生じた可能性大である。ただし、このような規則性の乱れはまばたきでも生ずることがある。

眼球電位図法の場合には光学的方法と違って、人がみているその風景を映像として撮るということは不可能である。けれども、グラフとして時間の推移とともに眼球の回転角度がわかるということはまた重要なことも多いのである。この方法の欠点としては、眼の上下左右に電極を貼り付けること、あるいはそこからとられた微弱な電流を増幅するためのアンプあるいは

(円は注視点、円の大きさの違いは停留時間の違い)

図 6 測定結果の画面表示例⁽⁴⁾

上の図は電極のはりつけ位置、下図は測定のプロセス図解

図 7 眼球電位図法の原理

(矢印は視線の移動)

図 8 画面に表示された実験用視標

(a) 規則正しい眼球電位図

(b) 規則性が乱れた眼球電位図

図 9 眼球電位図法によるグラフ

プロッタなどが必要だということで、かなり生理的な方法といってよいだろう。

3. なぜ間違えるかを説明するモデル

急いだために階段を踏みはずす事故は多いものの一つである。この事故を説明してみよう。まず、人間は自分の行動を大きく切り替えることができる。例えば、「急げ」とか「確実に」といった切り替えである。「急げ」であれば、速く動作することに比重を置く。この結果、いつも行っている動作を省いたり、注意や目配りを省いたりする。これらは、なぜ間違えるかを説明するモデルのひとつといえる。次に、ヒューマンエラーに関するモデルをいくつか紹介する。

3.1 判断のモデル

間違った判断もヒューマンエラーの一つである。モデルを構築しようとするとき、例外まで入れると収集がつかないことから、簡素化する。これは、モデルを作るときの常道である。しかし、明らかにモデルのもつ本質的な弱点である。特に、ヒューマンエラーを扱うとなると弱点である。なぜかという、事故とかエ

ラーは例外的な事象だからである。さて、判断を説明するモデルとはどのようなものだろうか。判断は多段階のステップを経たものとして行われると考え、複雑な判断も二者択一のステップの積み重ねと考える。判断のモデルとしては、ほかに、人間の内部構成としての機能を明確に記述するという方法もある。例えば、有限状態系（オートマトン）を想定する。これは、次のような考えである。人間は、判断を行う場合、機械と違い、入力と出力の関係が一樣ではない。その人間固有の内部状態に依存して、同一入力でも異なる出力を出す。この現象を次のように記述し、これを有限状態系という。「ある時点の入力と人間の内部状態によって人間の出力が定まる」、そして「その時点の入力とその時点の人間の内部状態によって、次の時点の人間の内部状態が定まる」。

なお、人間の内部状態とは、例えば、あせっているといった情動的であったり、肉体が疲労しているといった生理的な状態を含む。このようなモデルの例を図 10 に示す。このモデルにおいては、以下 6 つの要素を用いている。

- ① 入力 1：刺激集合 $F_i = \{f_1, f_2, \dots, f_p\}$
入力 2：判断基準
- ② 出力：accept D_{20} および reject D_{21}
- ③ 状態パラメータ 1：記憶関数
- ④ // // 2：不確実範囲 (IU)
- ⑤ // // 3：ベイズ判定機構
- ⑥ // // 4：主観的等価

このモデルは、定常的な外観検査を行う人間を想定しており、生理的ないしは心理的な人間の内部状態ま

*飛び越し判断とは、直観的な判断とか暗示といった別の次元のことである。

図 10 有限状態系の例

では扱っていない。換言すれば、シミュレーションを行う場合、生理的ないしは心理的な人間の内部状態まで含めるととても複雑になりすぎるので、そこを避けている。しかし、既に述べたように、ヒューマンエラーとしては問題である。

3.2 信号検出理論

この理論は、人間の信号を検出するときの作業成績についてのモデルである。このモデルでは、人間は2通りのエラーを犯すと仮定している。すなわち、

第1種のエラー： 合格にするべき製品を不合格とする。あわて者の誤まりという。

第2種のエラー： 不良品を合格とする。ぼんやり者の誤まりという。

監視室などでのプロセスの不具合は、この不良品に相当し、これを信号と呼ぶ。詳しくは、文献(6)を参照されたい。

3.3 注意システムのモデル

見たり、聞いたり、覚えたり、考えたりする働きを総称して認知機能と呼ぶ。この機能を情報処理の用語で記述していこうとする心理学の領域が認知心理学である。1970年ごろからいろいろなモデル(例えば、短期長期記憶モデル)が提案されている。特に、1980年代に、パソコンの普及に伴いソフトウェアの設計原理の理論的な支えになり、一種の流行となった。エラーのうち、見誤まり、聞き間違いなど、人間の認知系に起因するものを認知エラーと呼ぶ。この認知エラーを記述するモデルとして、例えば、Normanの注意システムのモデル⁽⁷⁾がある。このモデルの弱点もかなりある。それは、あくまで記述のモデルであることである。たしかに、ある状況を説得力をもって記述することは大切であろう。しかし、工学の立場としては、そのモデルから設計のパラメータが得られにくいというもどかしさがある。シンボルやアイコン、コマンド入力方式、入力デバイスおよび仮想スイッチ類の動作の規定あるいは、ユーザとの対話手段や画面デザインなど、認知心理学と人間工学の共通の対象である。人間工学の場合、説明力に欠けるきらいがあるが、反面、操作までも含めて使いやすさや認めやすさを論ずるのが人間工学であろう。設計にあたっては、認知心理学と人間工学の使い分けが实际的であろう。

4. ま と め

1980年代に至り、システムの自動化あるいは無人化には、ある限界があることが認識できたと考えられる。自動化できないとなれば、システムに人間をどのように組み込むかが大切である。もう一つは、システ

ムエラーの発生確率は確実にそして限りなくゼロに近づきつつある。同時に、人間を組み込む以上、ゼロには到達しないことも明らかである。ヒューマンエラーの研究では、黙っていれば着実に手詰まり状態に追い込まれる。新たな工学的な方法が望まれる。例えば、ファジー推論の利用もその一つであろう。ファジーが良い例であるが、新たな工学的な方法というのは、従来工学が避けていた領域に進出することかも知れない。認知の情動依存性はよく知られていることであるが、人間の感情とか情動を計測したり伝達することなどもこれからの方と考えられる⁽⁸⁾。これとは逆であるが、もっと人間の日常的な行動を組み込むことも必要であろう。例えば図書館の情報検索で、画面を使って検索することが効率はよさそうである。しかし、開架式の閲覧も捨てがたい。あっちこっち歩いている間に、目的とは異なる本を発見したりする。この10年ばかり認知心理学などの流行で、頭脳にばかり関心が向いているきらいがありそうである。人間について、認知、行動、身体などを含めた総合的な工学的な方法が更に必要である。(平成4年3月25日受付)

文 献

- (1) 野呂：「人間工学における反応時間の測定と結果の解析」人間工学, 21, 2 (昭60)
- (2) Michael J. Wargo: "Human Operator Response Speed, Frequency, and Flexibility", *A Review and Analysis, Human Factors*, 9, 3(1967)
- (3) 野呂：職場の人間工学, p. 131 (昭61)日本規格協会
- (4) 野呂, 他：エルゴノミクスデザイン, p. 41 (平3)日科技連
- (5) 野呂：「検査計測の研究法」人間工学, 15, 6, 289 (昭54)
- (6) 野呂：官能検査ガイドブック, p. 246~249 (昭52)日本規格協会
- (7) D. Norman., 富田達彦, 他訳：記憶の科学, p. 112 (昭51)紀伊国屋書店
- (8) 野呂：生活のための工学, p. 269 (平4)放送大学教育振興会

野 呂 影 勇

昭和34年早稲田大学理工学部電気工学科卒業。会社勤務の後、46年より慶応義塾大学理工学部講師、54年産業医科学大学医学部人間工学教室教授に就任。60年より同大大学院医学研究科生理情報学担当教授を兼任。61年早稲田大学理工学部教授、62年より人間科学部教授、平成3年より放送大学客員教授を兼任。工学博士。最近の研究はワークステーションの設計理論、ビデオを用いたコミュニケーションデバイスの開発など。電子協ニューオーフイスシステム委員会委員長、グッドデザイン審査委員。編著書：図説エルゴノミクス(1990), Participatory Ergonomics(1991), 生活のための工学(1992)。