マンマシンインターフェイスにおける人間のオンライン 認知情報処理特性に関する基礎実験研究*

吉川 榮和**・下田 宏***・長井 義典****・小島 真一*****

A Basic Experimental Study on Characteristics of On-line Human Information Processing Associated with Man-Machine Interface*

Hidekazu YOSHIKAWA**, Hiroshi SHIMODA***,
Yoshinori NAGAI**** and Shin-ichi KOJIMA*****

Regarding human factors research on man-machine interface, a basic psychological experiment was conducted to observe psycho-physiological characteristics of on-line human cognitive behavior when cognitive tasks on learning and pattern classification were given to subjects by personal computer using a simple state transition model. During the experiment, three different types of subjects' data were recorded: (i) eye movement data by eye mark recorder, (ii) physio-electric signals by polygraph and (iii) verbal reports. Those subjects' data were analyzed with respect to: (i) the related human cognitive characteristics concerning problem solving strategy, measures of problem difficulty and mental image effect, (ii) observed eye movement characteristics such as saccade, attention, pupil reaction and blinking, etc., and (iii) obtained characteristics of skin potential response and heart rate. It was found that the application of psycho-physiological measurement would serve to objective and detailed analysis of on-line cognitive process.

1. 序 論

原子力プラントのような複雑大規模システムの安全性の面で、運転員がマンマシンインターフェイスを介したシステムを監視し、異常時に正しく原因を診断し対応する際の認知要因の重要性が指摘されている^{1,2}。人間情報処理の観点では、このような運転員の認知行動は、「提示された計装情報（知覚した外界情報）とすでに習得しているプラント運転に関する知識（メンタルモデル）をもとに、外界情報の変動によって駆動されるオンライン型の認知情報処理行動」と考えられる。運転員のメンタルモデルには2種類のモデルがある。一つは制御すべきプラ

ントのシステム構造と機能に関する静的なモデルであり、もう一つはプラントの状態遷移を予測し、適切な対応策を選択するための動的なモデルである。プラント運転における潜在的なヒューマンエラーの源泉は、①外界情報の知覚の仕方、②メンタルモデルの形成とその構成・内容、および③それらの操作過程とに由来すると考えられる。したがって、このような人間の認知情報処理特性について理解を深めることは、マンマシンインターフェイスと人間との整合性検討やマンマシンシステムの設計評価上重要である。しかし、人間認知行動は内面的な行動であり、その特質として変動性や個人差があってその究明は難しい。

原子力の分野ではマンマシンインターフェイスにおけるヒューマンエラーの防止と分析のために、運転員を対象に運転訓練シミュレータによる実験が行われてきた³⁻⁶。これらの実験では、シミュレータにより各種のプラント異常事象を発生させ、運転員が制御盤の計装の指示を見て異常事態を判断し、対応操作を行なう過程を分析者の目視観察や、ビデオ（VTR）記録をもとに分析が行われてきた。しかし、実験時の観察記録と VTR

* 原稿受付 1989. 6. 9

** 京都大学 原子エネルギー研究所 Institute of Atomic Energy Kyoto University; Gokasho, Uji-shi, Kyoto 611, JAPAN

*** 京都大学 大学院 工学研究科（現在、㈱島津製作所）

**** 京都大学 大学院 工学研究科（現在、シャープ㈱）

***** 京都大学 大学院 工学研究科（現在、㈱豊田中央研究所）

Key Words: cognitive information processing, eye movement, psycho-physiological measurement, human factor, man-machine interface.

記録の再生に頼る運転員の思考過程の分析は、分析者の経験と主観的解釈に依存し、客観的な裏付けに欠ける所が多かった。

一方、実験心理学の分野では、視覚系運動や、生理電気信号(心電図、呼吸曲線、脳波、皮膚電気活動など)の諸生理的指標と人間の心理との関連を対象とする心理生理学的研究が数多く行なわれ、認知心理とこれらの諸生理指標の関連性についても多数の知見が報告されている⁷⁻⁹。また、最近では、視覚系運動の諸指標に対してアイマークレコード、生理電気信号に対しポリグラフ(多用途脳波計)のような被験者にあまり負担や拘束を強い測定装置が開発されている。そこで、上述のシミュレータ実験にこのような新しい測定操作を併用して多角的に心理生理的指標のデータを収録し、分析のためのデータ量を増し、分析の客観性を向上させると共に、データ分析の自動化(計算機化)により、分析の信頼性を向上させる(別の分析者でも同じ分析結果を得る)ことが考えられる。

本論文では、このような目標への第一歩として、実際のプラント運転における認知情報処理行動を単純化した実験環境を設定して、基礎認知心理実験を行なった結果を述べる。実験においてはアイマークレコードで被験者

の視覚系運動の測定を行ない、ポリグラフによって心電図、皮膚電位、呼吸曲線などの生理電気信号を測定した。

2. 実験方法

マンマシンインターフェイスにおける認知タスクの基本要素として学習と判別を選び、被験者が認知タスクをオンラインで実行する過程の観察実験を行なった。実験時のシステム構成を Fig. 1 に示す。被験者には、単純な状態遷移モデルを題材とする認知課題がパソコンの CRT 画面に提示され、タッチパネルに被験者が応答する形の対話で実験が進行する。

認知課題の題材には3入力(キー入力1, 2, 3)と3状態(○, △, □の図形)の状態遷移モデルを用いて学習と判別の問題を作成した。用いた状態遷移モデルと状態遷移表の一例を Fig. 2 に示す。図中の→と番号はこの番号の入力キーによる画面上の図形変化を表わす。実際の実験で用いた状態遷移モデルは Fig. 3 に示す五つの形に限定し、図形の遷移をもたらしキーの組み合わせを変えて用いた。

各被験者について3種類の実験を、各実験ごとに20テスト以上を連続して行なった。3種類の実験の CRT 上の問題提示画面の要点を Fig. 4 にまとめて示す。な

Fig. 1 Illustration of experimental system setup

Fig. 2 Illustration of state transition model used for cognitive tasks on learning and pattern classification

Fig. 3 Types of state transition models used in the experiments 1, 2 and 3 with their entropy values

お、各実験の開始に先立ち、練習課題によって被験者に回答の要領を教示した。

実験1では学習課題を与えた。被験者は画面のキー (Fig. 4 の Experiment 1 で、1, 2, 3 のところ) を何度も押して図形変化の様子を調べ、状態遷移規則を理解し、全部暗記したところで画面の「Understand」の部分を押す。人間の短期記憶容量は 7 ± 2 チャンクでその保持時間は7秒といわれる¹⁰が、この実験1では、3入力キー $\times$ 3状態 = 9項目の規則 (Fig. 2の状態遷移表参照、一つの規則は(もとの図形、キー番号、変化した図形)の3記憶項目となる) を被験者がどのように工夫して記憶するかを調べるものである。また、この実験では全部で

23問が与えられるが、前半では被験者には問題終了後、答えを紙に描かせた。また、後半では終了後にCRT上に Fig. 2のような状態遷移図で正解を示し、被験者の答えが正しいかをチェックさせた。このように前半と後半で回答の仕方を変えているのは前半では描かれた絵から問題に対する被験者のイメージがどのようなものか、また後半では Fig. 2のような形で問題のイメージを与えるなどのような効果があるのを見るためである。なお、前半と後半の問題の難易度は、後述のエントロピーの分布の点で等しくなるようにした。

実験2と3では判別課題を与えた。これらの実験では実験1とは異なり、入力キーは予め設定されたプログラ

[Learning]

• Experiment 1

[Pattern Classification]

• Experiment 2
(Shapes of samples are different) • Experiment 3
(Same shape)

Fig. 4 CRT display for cognitive tasks on learning and pattern classification

ムによって次々に選択され、画面上の図形が状態遷移モデルに従って変化する。選択されたキーは色を赤に変えて被験者に知らせる (Fig. 4 では黒で示した)。被験者

はこの図形変化を観察し、状態遷移モデルが画面下部に示された三つのサンプル (Fig. 4 の Samples) のうちのいずれかであるかを判別して該当サンプルを指で押し

て回答する。このうち実験2では、Fig.4のように形の異なる状態遷移図を提示し、キー選択の間隔を1, 2, 3秒の3種とした。一方、実験3では三つの状態遷移図は同形で、状態遷移をおこすキー番号だけが異なり（キー番号の相違をE, P, Lで表示）、キー選択の時間間隔は1秒のみである。問題数はいずれも23問であるが、実験2では同じ問題についてキー選択の間隔が3種類あるので実際には69問を提示することになる。以上の実験2, 3の目的は、問題解決の方策と眼球運動の関連、情報提示の周期と問題解決の効率の関連を調べることにある。

以上の3実験と実際のマンマシンインターフェイスでの認知行動の関連について述べる。判別実験2, 3は「外界情報の変動によって駆動されるオンライン認知情報処理」の観点からは、プラント運転員の診断行為を単純化したものである。これらの実験に先立ち学習実験1を行なったのは状態遷移モデルのイメージを予め被験者に体得させるためである。

ついでデータの収録について述べる。人間の認知行動は内面的行動であり、その分析の客観性を高めるために、本実験では分析のためのデータ（プロトコル）の多角的収集に努めた。実験時に被験者から収録するデータは、(i) NAC社製アイマークレコーダ（EMR）による視覚系情報、(ii) 日電三栄社製多用途脳波計による心電図（ECG）、皮膚電位、呼吸曲線などの生理電気信号および(iii) 発話記録である。なお、発話記録は、EricssonとSimonの方法¹¹に従い、認知タスク実行中に被験者の思考をそのまま言葉で表現するよう介助者が促進させる同時思考発話と、タスク終了後に問題解決過程を要述させる回顧報告を記録して発話分析の客観性を高めた。これらの外に、パソコン画面への提示情報、被験者のタッチパネル操作の履歴も自動的に記録し、分析用データとして用いた。

EMRによるデータは、被験者の視野像に視点マークの重畳する画像、視点マークの位置コードおよび右目瞳孔画像の3種であり、これらはマイクによる発話記録と共にVTRで収録した。これらのEMRデータを用いて、実験終了後パソコンにより視点移動速度や視点の固定（注視）の断続時間の統計分布などを求めた。なお、著者らは、EMRで撮影される瞳孔画像から瞳孔面積をリアルタイムで計測する装置（リアルタイム瞳孔面積測定装置）を製作した。これはモノクロ瞳孔画像をある輝度レベルで二値化し、黒色部分のドットの総和から瞳孔面積を算出するものである。

VTR中の被験者の発話は、同時思考発話および回顧報告の双方とも、直接聞き取ってワープロにより文書化

し分析に用いた。

ポリグラフによるデータでは、被験者の両足首に装着した電極で収録したECGデータから瞬時心拍率（HR）を求め、また被験者の左手の掌と甲に装着した電極間の電位差から皮膚電位反応（SPR）を求めた。なお、実験に用いたEMRは構造上の制約から、脳波の同時計測が不可能であり、脳波は測定対象外とした。

3. データ処理分析の方法

本実験では、被験者プロトコルを多角的に収録したため、データ処理量が多くなり、また各種データの時間的同期が問題となった。

実験中は、実験開始からの経過時間、各種の生理電気信号（サンプリング周期1/100秒）、視覚系データおよび操作記録（サンプリング周期1/30秒）をリアルタイムでハードディスクに一括収録した（Fig.1のシステム構成参照）。データ処理分析ではこのような収録データをもとに、被験者の操作記録、視覚系データ、生理電気信号データを時間軸を合わせタイムラインチャートとしてグラフ化して出力した。これに発話を書き込んだタイムラインチャートの一例をFig.5に示す。このようなタイムラインチャート化により、被験者の目の動きや生理データ、発話記録、操作記録を総合的にみた認知過程の詳細分析が容易になった（具体的な説明は4.2に述べる）。

4. 実験結果の分析

以上の3種の実験を6名の被験者（男子学生5名、女子学生1名）に対して行なった。なお、EMRとポリグラフを併用した被験者は3名（男子学生2名、女子学生1名）であり、他の被験者3名はEMRのみである。以下では、全被験者6名のデータを、主として被験者の操作記録、発話記録をもとに検討した結果について4.1に述べる。これは従来のシミュレータ実験で用いる記録データの範囲内の分析である。また、EMRとポリグラフを併用した被験者データをもとにオンライン認知情報処理特性分析への心理生理的指標の適用性を検討した結果を4.2に述べる。

4.1 操作記録と発話報告による分析結果

(1) 実験1（学習）

(a) 記憶方策および問題の難しさの尺度

実験1では被験者ごとに、また問題ごとに記憶の仕方や解くまでの時間はまちまちであった。そこで、まず、どのような記憶方策をとったかを全被験者について調べたところ、(A) 状態依存型記憶（図形ごとにどのキーでどの図形に変わるかを記憶する）、(B) 入力依存型記憶

Fig. 5 Time-line chart used for analyzing subjects' cognitive process in experiment 2 (subject H. Y.).

(入力したキーごとにどのように図形が変わっていくかを記憶する)の2種に大別された。ついで、問題ごとの解くまでの時間あるいはキーを押す試行回数の変動から、問題に難易度の差があると考えられた。そこで被験者の主観的な難易度の指標として、キーを押す間の思考時間も考慮して試行開始から Understand を押すまでの時間を「問題解決時間」(被験者が試行により規則を理解し、記憶して正しく報告できると判断するに要した時間)として、この主観的指標に及ぼす要因を検討した。

まず、個々の状態遷移モデルの客観的な難易度の指標として、次式で示されるエントロピー I (一回の遷移当りの平均情報量)¹²を用いた。

$$I = \sum_i \sum_j P_i P_{ij} \log_2(1/P_{ij}) \quad (1)$$

ただし、 P_{ij} は状態 i から j への遷移確率、 P_i は状態 i

の存在確率である。被験者が各試行ごとにキー 1, 2, 3 のいずれを選択するかは他の試行と独立であり、その確率は $1/3$ と仮定すると、平衡時の各状態の確率 P_i は次の2式を解いて求められる。

$$\sum_i P_i = 1 \quad (2)$$

および

$$\sum_j a_{ji} P_j = P_i \quad (3)$$

ただし、パラメタ a_{ji} は状態遷移図中に j から i への状態遷移が二つの時は $2/3$ 、一つの時は $1/3$ 、ない時は 0 とする。以上の (1), (2), (3) 式により、実験に用いた状態遷移モデルのエントロピー値を求めた結果を Fig. 3 中に記載した。

エントロピー値が大きいくほど、その状態遷移モデルは一回の遷移がもたらす状態変化の自由度が大きく、その

ため問題解決も難しいと考えられる。6名の被験者の全問データからエントロピーと問題解決時間の関係を求めた結果は Fig. 6 のようになった。図中では、等エントロピー値の全問題の平均時間と、その分散の程度を標準偏差をもとに示した。図から明らかなように、エントロピーが大きいほど問題解決時間の平均値も分散も大きくなっている。なお、エントロピーが大きいほど分散が大きいのは、後述のボタンが状態遷移モデルに含まれることが多い (Fig. 3 のタイプ 1 参照) ので返って時間が短い場合もあるためと考えられる。

ついで問題の難易度の別の要因として、同じキーを押し続けると見分けやすく覚え易いボタンの存在が考えられた。そこで Fig. 2 のような状態遷移図中の顕著なボタンとして Fig. 7 に示す五つのボタン (ループボタン、

Fig. 6 Relation between problem solving time versus entropy value in experiment 1 (data from 6 subjects)

二連ボタン、引き返しボタン、リセットボタン、ノーオペレーションボタン) を選び、これらのボタンの効果を検討した。状態遷移図中のこれらのボタン数と問題解決時間の関係を5種のボタンについて Fig. 8 (a)~(e) に示す。なお、実験に用いた状態遷移図には異種ボタンの混在もありうる。Fig. 8 をみると、状態遷移図中のボタンの数が一つの場合、問題解決時間 (平均値) は、ノーオペレーション、ループ、リセット、二連、引き返しボタンの順に短くなった。一方、状態遷移図中の同じボタンの数が増えると、ノーオペレーションボタン、ループボタン、リセットボタンでは右下がりになり、一方二連ボタンと引き返しボタンで右上がりとなった。すなわち、ノーオペレーション、ループ、リセットボタンの存在は状態遷移規則を覚えやすくし、一方、二連と引き返しボタンは覚えにくくしている。

ここで、「ノーオペレーションボタン」を例に、これに気づかない場合と気づく場合とで記憶項目の差を求めると、前者では (もとの図形、キー番号、変化した図形) $\times 3$ に対し、後者では (キー番号、形不変) となって記憶負荷は著しく軽減される。実際に被験者の回顧報告では、このようなボタンの性質により記憶量を減らして、状態遷移モデルの規則を報告していた。

(b) メンタルイメージとその効果

実験進行中の問題に対する被験者のイメージ変化を、被験者 H. Y. が問題 2 と 11 で描いた答の絵をもとに検討した。これらの問題の正解の状態遷移図と被験者の回

Fig. 7 Five patterns of state transition by pushing the same input key

Fig. 8 Relation between problem solving time versus number of patterns (data from 6 subjects)

答を Fig. 9 (a), (b) に示す. この2問の状態遷移図には双方ともキー 2, 3 に二連パターンがあるが, この被験者は実験に慣れていない問題 2 ではキー 1, 2, 3 に対して, 同じ順序 (Δ , $\bigcirc$, $\square$) で遷移規則を描いている. しかし, 実験に慣れてきた問題 11 では図の順序がキー 2, 3 で異なり, それぞれの二連パターンを覚えやすい順に図を描いている. すなわち, 被験者が, 実験が進んだ段階で二連パターンの存在に気付いていること, また入力依存型の記憶を用いていることが分かる.

また, 実験 1 の後半では Fig. 2 のような状態遷移図を見せて被験者に答の正解を確認させたが, 実験 1 の前半と後半での全被験者の問題解決時間とエントロピーの関係を Fig. 10 (a), (b) に示す. これから状態遷移図を見せた後では, 問題のイメージが定着し, 解く時間の

平均値も分散も少なくなっていることが分かる.

(2) 実験 2, 3 (判別)

実験 2 と 3 では, 被験者が自らキーを選択する実験 1 に比して, 同時思考発話の量は極端に少なくなった. これは, 両面の提示情報が時間的に変化するのを見ながら考えるので, 発話する余裕がなくなるためと考えられる. そのため問題解決方策を被験者の回顧報告で調べたが, 全被験者が「段階的な消去法」を用いていた. 実験 2 では三つのサンプル図の形が異なっているので, キーと図形の変化の様子とサンプル図を見比べていずれかのサンプルを消去する手懸りを見つけ, 一つずつ正しくないものを消去するのは容易である (実験 2 で用いた手懸りの具体例は, 4.2 (3) に述べる). しかし, 実験 3 では, 三つのサンプル図の形が同じでキー番号のみが異なるた

(a) Test No. 2

(b) Test No. 11

Fig. 9 The answer drawn by a subject H. Y. during experiment 1 and the corresponding state transition model given to the subject

め、手懸りを見つけるのが実験2より難しい(実験3では同時思考発話が少ないため、手懸りの具体的内容が引き出せなかった)。いずれにせよ、被験者は自動的な変化の様子をしばらく眺めて「規則を完全に把握してから、三つのサンプルのどれが正しいかを判断する」という完全ではあるが時間もかかり、記憶負荷量も大きい方策より、「与えられた状況に応じた手懸りをもとに一つずつ消去する」簡便な方法を用いていた。すなわち、「認知負荷の少ない方策を選好」した。

ついで、実験2と3での問題の難易度の検討を試みた。操作記録には、問題ごとに「問題解決までのキー変化の回数(遷移回数)」が収録されている。これを主観的指標とし、一方、客観的指標としてエントロピーあるいは三つのサンプル図間の類似度のいくつかのモデルを立てて、両者の相関を検討した。しかし、あまり意味のある結果は導けなかった。これは、実験2, 3では遷移回数が次のような理由で必ずしも主観的な難しさを反映しなかったためと考えられる。キー選択をプログラムによ

ってランダムに行なう方法では「段階的な消去法」を用いる被験者にとっては、判別に必要な手懸りが早く現れることもあり、またなかなか出ないこともあったからである。

以上のごとく、実験2と3の分析では操作記録や発話記録だけでは十分な検討が行えなかった。

4.2 視覚系データおよび生理電気信号の分析

EMRおよびポリグラフによる収録データをもとに、いくつかの心理生理的指標を分析した。これらは視覚系指標では、(a)サッケード、(b)注視、(c)瞬目、(d)瞳孔反応、生理電気信号の指標では、(e)皮膚電位反応、(f)心拍率である。対象の被験者は(d), (e)では3名、その他は同一被験者 H. Y. である。以下、(1), (2)に視覚系指標と生理電気信号の指標について、個々の指標の意義と本実験で得られた結果、(3)にこれらの心理生理的指標と操作記録、発話記録を総合したタイムラインチャートにより、被験者 H. Y. のデータを分析した結果を述べる。

Fig. 10 Relation between problem solving time versus entropy value in experiment 1 (data from 6 subjects)

(1) 視覚系指標

(a) サッケード

人間が対象を見る際には、飛躍眼球運動（サッケード）と円滑な追跡の2種の運動がある。サッケードはある注視点から別の注視点への急激な視点移動で、その移動速度は、最高 300 deg/sec 以上で、約 1/50~1/40 秒間経過する。この間は知覚が伴わない。サッケードが眼球運動に費やされる全体の時間に占める割合はたかだか 10% 程度である。一方、円滑な追跡は、対象の動きに滑らかに追跡するもので、その最大速度は 30~60 deg/sec である。この眼球運動では、知覚は生じるとされている。また、注視時間の最小値は 1/10 秒でサンプル値制御が行なわれているとみられている^{7,13}。

本研究では、視点移動による情報探索が3種の実験でどのように異なるかを被験者 H. Y. の EMR データをもとに調べた。まず、実験1（学習）での実験進行による視点移動速度分布の変化を Fig. 11 に示す。図中では、100 deg/sec 以上の速い視点移動の部分はまとめて柱の高さで示した。円滑な追跡とサッケードとを分ける閾値速度を 100 deg/sec とし、これ以上を飛躍眼球運動（サッケード）として求めた被験者 H. Y. の三つの実験でのサッケード比率を Table 1 に示す。サッケード比率は実験2が最も高く、情報提示間隔による差はあまりない。

一方、実験3は、実験1と同程度の小さいサッケード比率となった。実験2と3はともに判別課題であるが、このようにサッケード比率が異なるのは被験者の視覚による情報探索が相異なることを示す。これをサッケードとは観点を変えて次に検討する。

(b) 注視

三つの実験で、被験者 H. Y. が一点を続けて注視した時間（注視断続時間）の比率分布を Fig. 12 に示す。この図では、実験1, 3, 2の順に長時間の注視が多いが、「注視によって知覚と認知が行なわれ、その時間が長いほど思考を要している」と考えると、この被験者には実験1, 3, 2の順に認知負荷が高いと推定される。

もし、視点移動が単位時間当たり一定の確率 P で独立に起こると仮定すると、注視断続時間が t から $t+T$ の間となる確率は、 $(1-P)^t - (1-P)^{t+T}$ となる。また、注視していると見なす最小の時間を T' とすると、 T' まで視点が移動しない確率は、 $(1-P)^{T'}$ で与えられる。すべての注視のうち時間 t から $t+T$ の間注視が持続する比率を $F(t:T)$ とすると、次の関係が成り立つ。

$$(1-P)^{T'} \cdot F(t:T) = (1-P)^t - (1-P)^{t+T} \quad (4)$$

(4) 式より、次式が導かれる。

$$\log F(t:T) = t \cdot \log(1-P) + \log \left\{ \frac{1-(1-P)^T}{(1-P)^{T'}} \right\} \quad (5)$$

Fig. 12 では、 $T = 0.5$ 秒、 $T' = 0.5$ 秒とした。(5) 式は、 $\log F(t:T)$ と t には直線関係があり、確率 P が大きいほど直線の傾きが大きくなることを示す。しかし、Fig. 12 では被験者データは直線でなく折れ線となった。実験1では約3秒を境に勾配が異なり、3秒以上では傾きが緩やかである。一方、実験2と3では約2秒が境となり、2秒以上では実験2より実験3では傾きが一層小さくなっている（すなわち確率 P が小さい）。また、2, 3秒以下では3実験とも傾きは同程度で大きい（確率 P が大）。

以上の結果は、約2, 3秒以下の短い注視とそれより長い注視とでは、視点移動が別種の確率事象を示唆する。ここでは実験1, 2, 3で差の大きい長い注視に注目して検討する。Fig. 12 では視点移動確率は実験1, 3, 2の順に小さくなった。実験1では、キーを押して画面上の図形変化を観察するだけであり、サッケード比率も視点移動確率も最も小さいこととは矛盾がない。一方、実験2, 3では、キーと図形の自動変化と三つのサンプル図の比較が必要であり、視点移動が必要である。しかし、実験3では、三つのサンプル図が同じでキーの違いが E, L, P で示されているのみである。そのため、被験者は、

Fig. 11 Velocity distribution of eye mark with the progression of test numbers (experiment 1) (subject H. Y.)

Table 1 Fraction of saccadic eye motion (subject H. Y.)

Experiment	Fraction
Experiment 1	0.0239
Experiment 2	
time cycle 1 sec	0.0420
time cycle 2 sec	0.0518
time cycle 3 sec	0.0479
Experiment 3	0.0256

状態変化ないしサンプル図に視点を固定して考えないと手懸りが見つけにくかったものと考えられる。以上が、実験3では、実験2に比較して視点移動確率を小さくして、その結果サッケード比率を少なくし、注視時間の長い比率が大きくなった理由である。

(c) 瞬目[†]

瞬目は、角膜の湿気を維持するためと信じられているが、その機能や中枢神経機構は未だ完全に解明されていない。瞬目には、三つの種類があるといわれている。最も一般的なものは、随意的な瞼の閉鎖で他のものに比し、断続時間が長い。これには精神活動の影響はあまりない

[†] “まばたき”のこと

Fig. 12 Distribution of duration time of attention during experiments 1, 2 and 3 (subject H. Y.)

Fig. 13 Distribution of blinking time interval of a subject (subject H. Y.)

といわれている。第2の種類は例えばゴミが目に入った場合にみられる生体固有の反射的瞬目である。そして、第3の種類の周期的瞬目は、一般に精神活動に最も深く関わっていると考えられ、個人差はあるが、1分間あたり1~10回といわれている^{13,14}。

本研究では、以上の3種の瞬目のうち、周期的瞬目に注目して検討した。Fig.5のタイムラインチャート中に示したように、リアルタイム瞳孔面積測定装置で計測した瞳孔面積の時間変化(実験2、被験者 H. Y.)は、2秒間隔で変化するキーと図形変化に同期して瞬目している。このような傾向は他の被験者でもすべて観察された。これを見ると被験者は認知情報処理のために、無意識の瞬目によって連続的な視覚情報を断続的にサンプリングしているようである。被験者 H. Y. の瞬目の時間間隔分布を実験1と、実験2の1, 2, 3秒間隔のデータについて Fig.13 (a), (b), (c), (d) に示す。実験1は、被験者の意志で、キーを押して規則を見つけていく問題

であるので、(a) では、被験者のこのようなオンライン認知情報処理時の固有の瞬目特性が表われているものと考えられる。一方、(b) から (d) では、被験者の瞬目が情報提示の時間間隔のところで大きく、瞬目が周期的な情報提示に同期している。しかし、提示間隔が1秒の(b) では、被験者の情報処理速度より速いため瞬目時間間隔2秒の近傍のほうが比率が大きい。一方、3秒間隔の(d) では3秒のピークより左側に(a)と同形の瞬目の特性が見られる。固有の瞬目モードの出現は、情報提示が3秒になると思考の時間的余裕が十分あることを示すものと考えられる。

(d) 瞳孔反応

瞳孔径の急激な拡大縮小は、人間の情動生起に付随して生じること、認知活動とも関連性のあることが指摘されている^{7,8}。そこで H. Y. を含めて3名の被験者の二つの VTR 記録(右目瞳孔画像と、視野にアイマークを重ねさせた画像)を同時再生し、急激な瞳孔径変化の発

生とその状況要因を観察した。その結果、(i)紙に答を書く時、(ii)記憶想起に努める時、(iii)注意して画面上の何かを見ようとする時、(iv)画面上の自動的状態遷移からの手懸りを見つけた時、に主として短時間の瞳孔収縮が見られた。焦点調節に伴って瞳孔も収縮すると言われているが⁸、(i)、(iii)はこの場合に相当する。しかし、(ii)、(iv)では認知行動での情動的要因が瞳孔収縮に反映されたものである。以上から、瞳孔反応は、心理生理の一つの指標となりうることは確かめられた。しかし、本実験で製作したリアルタイム瞳孔面積計測装置では、閉眼やまつ毛の影響によって正確に瞳孔径変化を測定できず、精度の面で不十分であった。

(2) 生理電気信号による指標

(e) 皮膚電位反応 (SPR)

皮膚の電気的特性が情緒的状况に対応して変化することはよく知られていて、情動、認知などの心理的要因と皮膚電気活動との関連について多数の実験研究が報告されている。皮膚電気活動は外部刺激やストレスに反応して生ずるエクリン汗腺からの覚醒発汗と深い関係がある。エクリン汗腺は手掌や足趾に最も多い。皮膚電気活動では一過性の瞬時的変動を反応、持続的変動を水準と呼び、これを測定する際に、外部電流源を用いる場合を「伝導」、自発的な皮膚の電位差を利用する場合「電位」という。皮膚電気活動の指標には、これらを組み合わせて次の四つがある。(i)皮膚伝導反応、(ii)皮膚伝導水準、(iii)皮膚電位反応、(iv)皮膚電位水準⁷⁻⁹。

今回の実験では、一過性の電位変動に注目して、手掌の皮膚電位反応 (Skin Potential Response ; SPR) を測定対象とした。H. Y. を含め3名の被験者データから SPR は被験者の情動変化をよく反映することが観察された。そこで、Fig. 5 のようなタイムラインチャートを用いて、実験時の SPR と発話記録を対比して SPR 変動をもたらす状況要因を推定した。その結果は、(i)意図の転換、(ii)手懸りを見出した時、(iii)記憶しようとした時、想起しようとする時、(iv)混乱したり、いらいらする時、(v)失望する時、(vi)思いがけない状況が出現した時、(vii)喜んだ時、(viii)後ろめたい時などであった。SPR の波形の特徴では、2 相性振動がスイッチを押すなどの行動を伴う目標指向性活動とよく対応していたほかに、振幅の大きい時は (i)、(ii) と対応することが多かった。このように、SPR は認知行動の状況要因を探る一つの手懸りとして有用な指標であることが今回の結果でも確かめられた。

(f) 心拍率 (HR)

心理生理学では、血圧、血流率も用いられるが、瞬時心拍数 (HR) が指標として最もよく用いられる。実験

心理学の研究から HR は「知覚活動中に低く、認知活動中に高くなる」ことが示唆されている^{7,8}。この傾向は今回の実験でも確かめられた。知覚活動による低下は、目のフリッカーテスト中の HR 計測で確認した。視標点滅の閾値周波数に近づくにつれ、HR の減衰がテストした被験者すべてに観察された。また認知活動中に高くなる例は、Fig. 5 のタイムラインチャート中の HR の一過的上昇が該当する (問題解決や手懸り発見に対応)。しかし、HR は自律神経系の生理機構により呼吸に同期して変動する^{7,8} 成分もあり、一概に瞬時 HR の変動を心理的要因のみに帰着することはできない。

以上の考察から、本実験では瞬時 HR よりむしろ認知タスク中の HR の平均値を指標とし、被験者 H. Y. の三つの実験の問題ごとの平均心拍率を求めた。各実験で問題の進行に伴う平均 HR の結果を Fig. 14 に示す。この図では、実験 1 では問題が進行するほど平均 HR が下がっているが、実験 2, 3 では問題が進行しても平均 HR の減少傾向は見られない。このような時間的傾向の違いの理由として、次のように考えた。「実験 1 は自分で規則を調べるものであり、問題が進むほど解き方に慣れてくるが、実験 2, 3 はプログラムにより自動的に状態遷移が与えられ、被験者には問題がいつも新規な状況となって慣れが生じない。」また、実験 2 より実験 3 の方が常に平均 HR が高く、実験 1 では初めは実験 3 より HR が高いが、後半では実験 3 より低くなっている。このような三つの実験の平均 HR の差異は、被験者 H. Y. にとっての実験間の認知負荷量の差を反映しているものと考えられる。

以上、平均 HR の比較により、実験 1, 2, 3 が被験者に与える負荷について、(b) の注視時間の検討では考慮しなかった、認知負荷の時間的変動も含めて推定するこ

Fig. 14 Time trend of average heart rate with the progression of experiment (subject H. Y.)

とができた。

(3) オンライン認知情報処理特性分析への適用性

4.1 (2) では、操作記録と発話記録のみでは判別実験 2, 3 の分析が十分でなかった。一方、4.2 (1), (2) では、今回の実験で用いた心理生理指標が分析に有用なことを示した。ここでは、3. に述べたタイムラインチャートによる総合分析を実験 2 に適用した事例を Fig. 5 をもとに述べる。なお、Fig. 5 は被験者 H. Y. の実験 2 (判別課題、情報提示周期 2 秒) のタイムラインチャートである。

被験者 H. Y. は、回顧報告で、三つのサンプル図から一つのものに絞るのに段階的消去法を用いたこと、また、その手懸りとして、次の 2 種を用いたことを述べている。一つは、「ある状態から別の状態へ遷移したとき、三つのサンプル図中のどれかにその遷移を示す矢印がなかった時に、そのサンプルを消去できる」というもので、もう一つは「遷移先が同じ状態のキーが二つあると、正解でないサンプルが消去できる」というものであった。Fig. 5 では、CLUES としてこのような 2 種の手懸りの状態遷移が生じた場合を示し、CUT ではこの手懸りによって消去できるサンプル図番号を示した。また、INPUT は選択されたキー番号、STATUS はキー選択により変化後の図形を示す。LOOK AT では、キーおよび図形、サンプル 1, 2, 3 の 4 か所に限定し、被験者の視点の対象と注視の継続を示した(視野像に視点マークを重畳した画像から求めた)。Area of Pupil, Heart Rate, Skin Potential はそれぞれリアルタイム瞳孔面積測定装置の出力、EEG から求めた瞬時 HR および SPR の時間変化である。

被験者 H. Y. は約 20 秒のところで「二重ループがあるので(サンプル) 3 は落とせる」と発話し、約 37 秒で「△から□(のパス)がないので(サンプル) 1 だ」と言って、サンプル 1 を押して終わっている(正解)。双方の発話の直前には、正しくないサンプルを消去できる手懸り(二重丸の③と②)があり、視点データを見るとすばやく三つのサンプル図を見比べている。この間は瞬目が停止し瞬時 HR と SPR が変動している。

以上の考察を一般化すると、被験者の行動分析上、次の二つがいえる。一つはタイムラインチャート上の心理生理指標と発話との対比により、各種の指標の動的特性が見い出せる点である。たとえば、SPR は一つのサンプルを消去した部分目標達成時(約 20 秒)と、問題が解けてサンプル 1 を押すという行動を伴う場合(約 37 秒)とで、波形が異なっている。このような方法で抽出した SPR の特性を 4.2. (2) (e) に示した。そして、第二には、このように指標がコヒーレントに変動するとこ

ろでは、例え発話がなくても、変動をもたらした心理的要因の生起を推定できることである。

さらに、文脈情報を用いてタイムラインチャートから個人的特性を推定する可能性も考えられる。その例として、被験者 H. Y. が実験 2 で用いた方策(前述の 2 種の手懸り)を文脈に用いて、実験 2 の全問題での手懸りの出現をすべて抽出し、それらをどの程度見ていたかを検討した(Fig. 5 のタイムラインチャート中の CLUES, CUT, LOOK AT をもとにする)。手懸りの見落とし率は、1 秒間隔で 47.5 %, 2 秒間隔で 19 %, 3 秒間隔で 12.9 % となった。もちろん、視点が合っていたからといって、本当に手懸りとして用いたかは別物であるが、少なくとも被験者 H. Y. にとって、1 秒間隔では情報提示間隔が短すぎたことを示している。また、これは 4.2 (1) (c) に述べた瞬目間隔の検討結果と矛盾はない。

5. 結 論

マンマシンインターフェイスにおける人間のオンライン認知情報処理行動を模擬し、状態遷移モデルを用いた学習と判別に関する認知タスクをパソコン画面との対話で遂行させる被験者実験を行なった。被験者の認知情報行動特性の分析のためのデータとして、発話記録、パソコンとの対話操作記録、EMR による視覚系データおよびポリグラフによる生理電気信号データを収録した。本論文では、EMR やポリグラフによる各種心理生理的指標の、オンライン認知情報処理行動の測定分析への適用性を検討課題とした。このような心理生理的指標として、眼球のサッケード、注視、瞬目、瞳孔反応、皮膚電位反応および心拍率を対象とした。

分析のための被験者プロトコルを多角化したため、データ処理分析の効率化・総合化が課題となった。そのため、測定系、データ収録系の自動化に努めた。また多角的プロトコルを総合分析するために、分析に用いる指標の時系列変化を同一時間軸でグラフ化したタイムラインチャートを用いた。

実験に用いた認知タスクの性格は、二つに分けられる。一つは被験者が自らの操作で外界状況を探り、外界を理解する学習課題であり、もう一つは外界情報が一定周期で変動する状況を観察して、外界を判断する判別課題である。後者は、実際のマンマシンインターフェイスにおける人間の認知行動の単純な模擬となっている。

実際データの分析は、原子力分野で従来シミュレート実験の分析に用いたのとはほぼ同様な、操作記録と発話記録をもとにする分析 A と、EMR データおよびポリグラフデータも併用する分析 B に分けて行なった。

分析 A では、学習課題に対して全被験者(6 名)の

データ分析から、次のような特性が確かめられた。

(i) 提示課題の難易度の主観的指標として問題解決時間、客観的としてエントロピーを用いると、両者に相関が見られること。

(ii) 記憶負荷の減少を図れるパターンの存在は問題解決時間の減少につながる事。

(iii) 問題のメンタルイメージの定着が問題解決時間の減少に効果があること。

一方、判別課題では、難易度の有効な主観的指標が設定できず、上述のような特性の導出はできなかった。この実験では同時思考発話量も少なく、回顧報告をもとに (iv) を推定した。

(iv) 認知負荷の低い問題解決方を選好すること。

分析 B では、EMR とポリグラフを併用した被験者 3 名のうち、主として被験者 H.Y. のデータを対象に個々の心理生理的指標の特性分析とタイムラインチャートをもとに総合分析を行なった。したがって、得られた結果は、被験者 H.Y. の個人的な認知情報処理特性である (ただし、瞳孔反応と SPR は 3 名のデータをもとにした)。得られた結果を以下に要述する。

(v) サッケード比率から視覚情報探索の行動タイプが推定されること。

(vi) 視点の固定 (注視) 断続時間や瞬目の時間間隔の統計分布、平均心拍率の比較によって、認知課題間の負荷の性格 (認知負荷の大小、時間的な処理限界、動的変化) が推定されること。

(vii) 瞳孔反応, SPR, 瞬時心拍率が情動や認知などの心理要因を反映する指標となること (ただし、瞳孔反応の測定は今回の実験に用いたリアルタイム瞳孔面積測定装置では不十分であった)。

(viii) タイムラインチャートをもとに、同時思考発話記録との対比、回顧報告から得た文脈情報を加味した総合分析により、生理心理指標の動的特性の検討や、高次の認知情報処理特性の検討 (たとえば、手懸りの見落とし率と情報提示周期の関係) が行なえること。

以上の結果には、人間の認知心理について、一般に信じられていることがらや認められている知見を、極めて限られた数の被験者の、特定の認知タスクに対するデータから確認したものもある (特に、(ii), (iii), (iv), (v), (vii))。しかし、分析 A では検討できなかった、学習と判別双方の認知負荷の特性比較や情報提示周期の限界の検討などが分析 B で可能なことが確かめられた。以上の議論から実際のマンマシンインターフェイス環境へ、分析 B の手法を適用する意義や有用性が今回の実験によって確認されたと考える。

今後の課題として、本論文での研究では測定しなかつ

た脳波分析の検討や、収録した発話報告の自動分析法の検討が上げられる。その後 EMR による視覚系分析、ポリグラフ分析および発話分析を総合化し、人間の情報処理行動計測の新しい方法へと発展させたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) G. Salvendy, ed.: Handbook of Human Factors, J. Wiley & Sons, pp. 1725~1770 (1987)
- 2) 吉川: 原子力におけるヒューマン・エラー防止のための研究状況; システムと制御, 32 巻, 3 号, pp. 168~175 (1988)
- 3) 「ヒューマンファクター」特別専門委員会編: 原子力におけるヒューマンファクター研究の現状と展望, 第 IV 章シミュレータ実験とヒューマンエラー分析, 日本原子力学会, pp. 65~84 (1989)
- 4) E. Marshall & F. Oewre: The Experimental Evaluation of an Advanced Alarm Systems; Proc. ANS/ENS International Topical Meeting on Advances in Human Factors in Nuclear Power Systems, ANS, pp. 348~357 (1986)
- 5) 林: BWR の安全性に及ぼすヒューマンファクターの研究; 確率論的安全評価 (PSA) に関する国内シンポジウム論文集, (財) エネルギー総合工学研究所, pp. 156~165 (1987)
- 6) J. Joksimovick, A. J. Spurgin, D. H. Worledge, A. Villemeur, T. Meslin & F. Mosneron: EDF/EPRI Collaborative Program on Operator Reliability Experiments; Proc. International ENS/ANS Conference on Thermal Reactor Safety, SFCA, pp. 337~348 (1988)
- 7) J. L. Andreassi/伊藤, 他訳: 心理生理学, ナカニシヤ書店 (1985)
- 8) J. Hassett/平井, 他訳: 精神生理学, 東大出版会 (1987)
- 9) 宮田, 藤沢, 柿井: 生理心理学, 朝倉書店 (1985)
- 10) 高橋: 応用認知科学の文献と解説 - S. K. Card, T. P. Moran からの論文解説を中心に: 数理科学, No. 266, pp. 61~68 (1985)
- 11) K. A. Ericsson & H. A. Simon: Verbal Report as Data; Psychological Review, Vol. 87, pp. 215~251 (1980)
- 12) P. Billingsley: Ergodic Theory and Information, J. Wiley & Sons, Chapter 7 (1965)
- 13) 樋渡: 人間情報工学, コロナ社 (1979)
- 14) K. T. Spoehr & S. T. Lehmkuhle/芋阪, 他訳: 視界の情報処理, サイエンス社 (1986)