

# 人間の動特性について

稲葉 正 太 郎

人間の動特性に理論づけをするのは困難なことだが、動特性を判定する目安になる特性値が誘導され、その特性値といろいろな動特性との関係がわかったので、これらを解説したい。

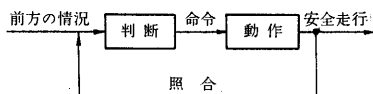
## ま え が き

人間の動作特徴を、あわて型、機敏型、おくれ型の三つに分けると、われわれはこの分類目盛りのどこかに位置づけられるはずである。そこで人間の神経回路の動作を自動制御論的に見ることにより、動作を起こしたときの適当な作動値を測定すれば、各人の動作特徴を推定できるとの結論に達したので、まず判断と動作の協応の目安を与えらると思われる数値を誘導し、これをCybernetical Controllability No. (略して C.C. No) と名付け、これと各種の動特性との関係を実測したところ、ほぼ予想したおりの結果が得られた。さらに、あわて型、機敏型、おくれ型の作動内容や、男女別の質的な違いもある程度知ることができたので、取りあえずこれまでの経過をまとめて報告することにした。

## 1. 人間・機械系

人間が機械や自動車を操縦するときは、計器の指示やその他の刺激を入力信号としてとらえ、これを頼りに応答を形成する。

たとえば自動車の運転では第1図のように、前方の状況を入力信号とし、これを判断して適当な走り方を決め、操作を手足に命じて安全走行を実現している。このような運動命令を受けるのは、運動器官を支配する脊髄で、ここには運動と命令とを照合するフィード・バックがあり、また判断や思考を行なう大脳では、生じた運動をとらえて動作と入力信号とを照合するフィード・バックなどがはたらいて、その結果、目的に合った運動が実現されるものと考えられる。



第1図 自動車の運転

## 2. 人間の神経回路

上述のような各種のフィード・バックは、けっきょく

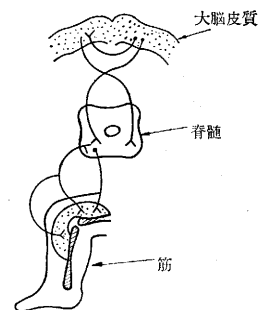
人間の神経系が無数の網目構造を持つことであり、これをモデル化すると、第2図のようなものが考えられる。

この系の作動を大まかにみると

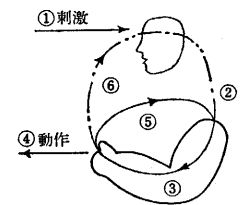
(1) 脊髄部門の神経によって筋が動かされる反射的動作と

(2) 大脳部門の神経活動(判断や思考)による命令が脊髄に伝わって生じる運動=判断を伴った運動

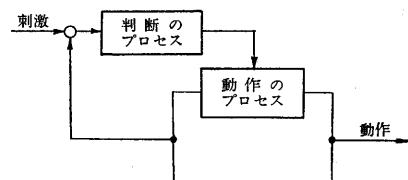
の二つがあって、後者は一般に随意運動と呼ばれ、(2)の随意運動の作動部門を、(1)の反射運動の作動系が担当している形になっている。この関係を図示すると第3図のようになろう。またこのような情報の流れを自動制御論の立場からブロック線図にまとめ



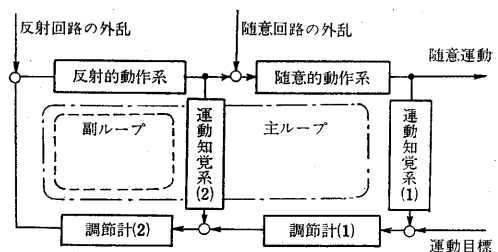
第2図 人体の神経回路モデル



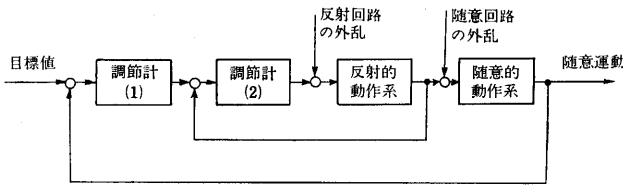
第3図 人間のフィードバック回路



第4図 人間のプロセス構成



第5図 人間カスケード系



第 6 図 人間カスケード系

ると、第 4 図のように、判断と動作の二つのプロセスの組合せと考えられ、さらに各プロセスの作動を細分して調節計・動作系・検出部知覚系に分け、各動作系の作動を乱す刺激を外乱として加えれば第 5 図のような構成になる。この線図はカスケード結合と呼ばれるもので、これから随意運動の内容を考察すると、まず運動の目標値が与えられれば、運動知覚系 (1) の情報から現在の運動状態との偏差をとらえて、調節計 (1) が、つぎの反射運動系への目標値を与えてやる。これを受けた調節計 (2) は、反射的動作系に命令を送って反射運動を開始する。すると反射的動作系から求心性の情報 (大脳に向かう情報) が上行して、一つは運動知覚系 (2) を通って調節計 (1) からの動作命令と照合され、一つは随意的動作系を通して運動の目標値との照合の資料を与える。ここに随意的動作系というのは随意運動の全体を指すのではなく、随意運動の中の意識や判断といった神経活動を指し、具体的な運動の筋活動は含まない。

このように情報の流れをみると

反射運動系内の流れ=反射回路 (または副ループ) の流れ

反射運動系内を通して随意的動作系を大回りする流れ=随意回路 (または主ループ) の流れ

の二つがあって、反射回路は随意回路の運動部分を担当する形になっている。これを一般的なブロック線図で書けば第 6 図のようになる。

また外乱についてはつぎのように分担処理される。

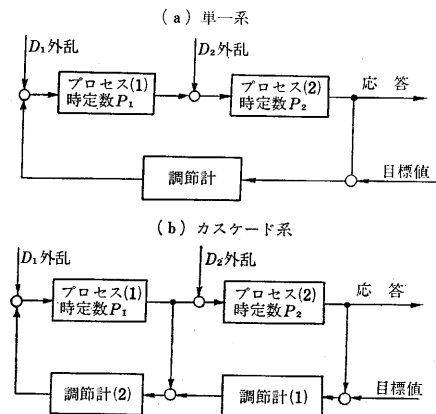
反射回路の外乱=反射運動を乱す刺激で反射運動系が処理する。

随意回路の外乱=判断を乱す刺激で随意的動作系が処理する。

以上で人間の制御運動に対する制御回路の構成と作動について述べたが、その制御特性を考えると、人間には外界のさまざまな変化に応じて、常に最適の応答を果たそうとする本質的な性質があるので、系全体がはたらいで、最適調整、適応制御に近い応答が行なわれるものと仮定する。しかし人間の制御性は精神状態によって著しく変化するので、そのときどきの精神状態を考慮する必要がある。不安があったり、緊張したりしているときは、かえって調子が狂うことになる。

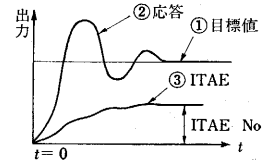
### 3. カスケード系の制御特性

人間はカスケード結合の神経系を持つことを導いたが、人間カスケード系の制御特性を推定するために、第 7 図に示すような制御系について、各要素を単一ループ結合とカスケード結合としたもので、特性の比較を行なったところおよそつぎのような結果が得られた。



第 7 図 単一系とカスケード系の設定

まず制御特性の良否を判定する目安として、第 8 図①に示す目標値に対し②の応答が得られたとすれば、①と②の差が任意の時刻における応答の誤差で、時間が経てばこの誤差は無くなるものとする。このとき



第 8 図 応答と ITAE No

$$ITAE = \int_0^t t |\epsilon| dt$$

ITAE=Integral of time×arithmetic error

t=刺激があつてからの経過時間

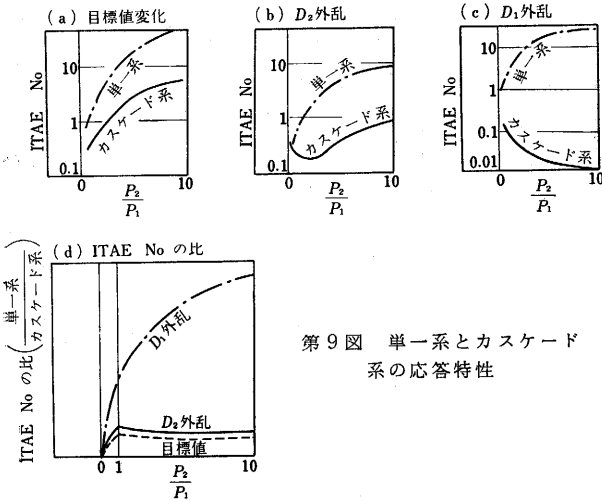
ε=理想的出力と実際の出力との差

で定義される ITAE を、応答時間に対し図示すれば同図中の③のようになり、出力が目標値に落ちついたところで ITAE の増加も止まる。このような ITAE の最大値は ITAE No と呼ばれ、

$$ITAE No = \int_0^{\infty} t |\epsilon| dt$$

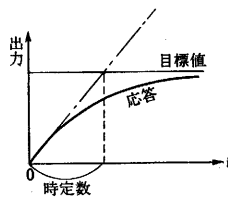
と表わされる。そしてこの値の大小で応答全体の良否を判定することができ、応答が速かに目標値に落ちつければ、ITAE No は小さく制御特性は良いと考えられ、ITAE No を最小にすることが最適調整にすることになる。

このような ITAE No で、上記二つの制御系の制御特性を求めた結果が第 9 図に示すもので、いずれもカスケード系のすぐれていることを示している。



第9図 単一系とカスケード系の応答特性

ここに  $P_1, P_2$  はプロセス (1), (2) の時定数で、応答が第 10 図のように現われるときは、応答が目標値の 63.2% に近づくまでの時間=応答が一応完結に近づいた時間と考えれば、時定数  $P_1, P_2$  の大



第10図 応答と時定数

小は、それぞれの応答の立上がりの目安となる。

4. 人間の動特性

上述のような特性をもったカスケード系を人間系に置き換えるには

- プロセス(1)=反射的動作系
- プロセス(2)=随意的動作系
- $D_1$  外乱=反射的動作系を乱す外乱
- $D_2$  外乱=随意的動作系を乱す外乱
- 目標値=運動目標

とみればよい。しかしこのような単純なカスケード系の制御特性をそのまま人間系に当てはめることは無理であろうが、まず第一段階として

- (1) 定性的にはこの単純なカスケード系と同じ制御特性が人間にも現われる。
- (2) 人間の随意運動は常に最適調整点の近くで行なおうと努力する。

ということを仮定し、かつ、

- $x_0$ =最適調整の  $P_2/P_1$  (第9図(d)から目標値変化、 $D_2$  外乱とも同じ値になるものと推定する)
- $x$ =各自の応答の  $P_2/P_1$

とすれば、人間の応答の良否を推定する目安として

- (1)  $x = P_2/P_1$  そのものの値
- (2)  $(x_0 - x)$  とする、最適調整点からの偏差
- (3) さらには人間の通性として、むずかしい応答をするときは誤差も大きくなるとして(誤差の大きさ

/応答のむずかしさ)の比の3種の値が考えられる。

(1) は先の第9図に相当する線図で応答誤差の大きさを判定するもので、目標値変化で  $P_2/P_1 = 0$  (判断なしの応答) のときは動作は怪しくなり、けっきょく  $D_1$  外乱が加わって第11図(a)のような特性になろう。

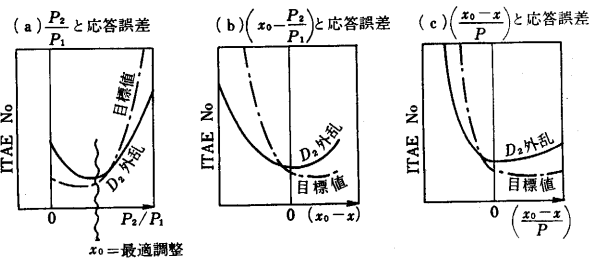
(2) は上記(a)図の誤差曲線を(b)図のように、 $x_0$  を中心に左右反転した特性になろう。

(3) では

誤差の大きさに対応する値  $= x_0 - x$

応答のむずかしさに対応する値  $= P_1 + P_2 = P$

とすれば、 $(x_0 - x)/P$  で誤差を比較しようとするもので、上記(b)図から推察して(c)図のような特性になろう。



第11図 各種の応答特性

以上三つの目安は、いずれも応答時の作動状態を表わす値で、これらを『作動値』と名づければ、このいずれの作動値をとっても応答の良否を判定することができる。

特に(3)の作動値は、アメリカのドレイクが、工具について純心理学的立場から行なった実験に対し、筆者独自の考えで得られた理論づけの結果と同じ形のものであるところから、まずこの作動値を人間の動特性を推定する特性値に選び、Cybernetical Controllability No (略して C.C. No) と名づけ、 $N$  で表わせば

$$N = \frac{x_0 - x}{P} = \frac{x_0 - P_2/P_1}{P} = \frac{x_0 P_1 - P_2}{P P_1} = \frac{(x_0 + 1) P_1 - (P_1 + P_2)}{P P_1} = \frac{(x_0 + 1) P_1 - P}{P P_1}$$

となる。ここで  $P, P_1$  は1回の入力信号に対し  $P$  に制限のない応答時の時定数であったが、時間に制限を与えて応答を繰り返し行なわせたときの、反射回路、随意回路の作動周期を  $T_1, T$  とするとき、近似的に

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{T_2}{T_1}, \quad \frac{P}{P_1} = \frac{T}{T_1} \quad \text{ただし} \quad T = T_1 + T_2$$

が成り立つものとして、 $P, P_1$  をすべて  $T, T_1$  に置き換え、さらに  $(x_0 + 1) = K$  とおくことにより、 $T, T_1$  の新しい組合せによる C.C. No をつぎのように定義することができる。

$$N = \frac{x_0 - x}{T} = \frac{x_0 - T_2/T_1}{T} = \frac{(x_0 + 1)T_1 - T}{TT_1}$$

$$= \frac{KT_1 - T}{TT_1} = \frac{K}{T} - \frac{1}{T_1} = Kf - f_1$$

ただし  $f = \frac{1}{T}$   $f_1 = \frac{1}{T_1}$

この式から最適調整点の応答では  $x = x_0$  から  $N = 0$  とする。

ここに  $K$  は、すでに述べたように、応答時の諸条件で異なる値をとり、人間の最も特長のある応答状態として、緊張して刺激に応じるような緊急状態に着目すれば

- (1) 随意回路が反射回路の共調し得るギリギリの強制振動を加えている。
- (2) 随意回路も反射回路も非線型の振動系になっているという想定から、これら二つの振動系が次調和の共振で長続きする振動状態=次調和共振の安定条件  $T/T_1 = 3$  と考え合わせて、一応  $K = 3$  と推定してもよさそうである。

この値は A. J. ヤングがプロセス制御系の設計において、経験的に提唱している共振を避ける条件とも一致する。

このような重要な意味を持つ  $K$  を「安定係数」と名づけることにする。

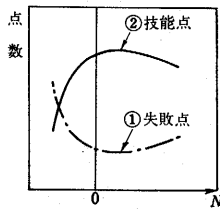
### 5. C. C. No と技能点

これまでは応答の良否を ITAE No で比べてきたが、概念的には応答誤差を与えるものと考えれば

応答誤差  $\propto$  失敗点

定数 - 失敗点 = 技能点

とすることができ、人間の実際の応答特性を C. C. No と技能点の対応でみることができる。両者の関係は第 12 図のように、① = 誤差曲線とすれば、これを上下反転して、② = 技能点となる。



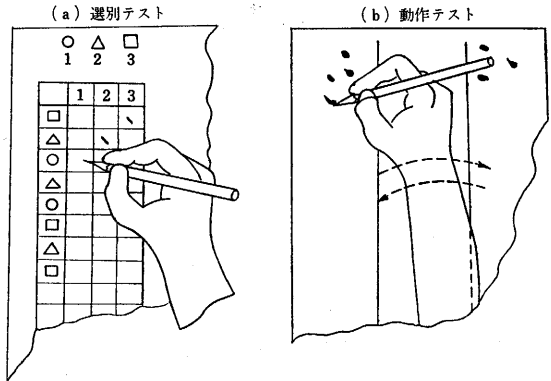
第 12 図 C. C. No と技能点

このような対応から、多数の人間について各種の運動の技能点と C. C. No とを測れば、同図②のような対応になることが推定される。そこで

- (1) C. C. No の測定法
  - (2) 各種の制御運動の技能点の測定
- の二つを計画し

- (1) に対してはテストの普及を計ってペーパー・テストによる方法を考える。
  - (2) に対しては各種の技能測定を行なう。
- ということにして、つぎのような方法により、C. C. No と技能点との関係を実測することができた。

#### (1) C. C. No の測定法



第 13 図 選別テストと動作テスト

判断と動作の繰返し作業は一定の条件づけによる選別作業に相当する。そこで誰でも見なれた図形  $\bigcirc \triangle \square$  と 1, 2, 3 を対応させ、第 13 図 (a) のように左側に図形をでたらめな順序に並べ(乱数表で決める)、図形を見ながら、図形に対応する右側 1, 2, 3 の枠内の一つに鉛筆で打点する作業を、一定時間、最大能力で行なわせれば、 $t$  秒間の正答数を  $n$  とするとき

$$T = \frac{t}{n} \quad \text{または} \quad f = \frac{n}{t}$$

の選別動作をしたことになる。

つぎに上記選別テストの中の動作だけを測定すれば、 $T_1, f_1$  が得られることになるが、実際に枠内に打点することは判断が伴うので適当ではない。そこでこれに代わるもので、ほぼ反射的に行なえる動作として、(b) 図のように、2本の平行線の両側に、できるだけ早く腕を交互に振って鉛筆で打点させることにした。

$t_1$  秒間に  $n_1$  回の腕振り = 片側打点数 とすれば

$$T_1 = \frac{t_1}{n_1} \quad \text{または} \quad f_1 = \frac{n_1}{t_1}$$

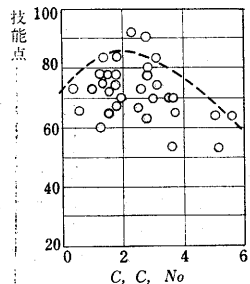
の反射的動作をしたことになる。

これら (a), (b) のテスト用紙は 2 組で対をなすものであり、図柄や枠の寸法および平行線の間隔については数回の実験を行なって、最適調整の人の C. C. No が 0~2 程度になるように工夫した。

#### (2) 技能点の測定

##### 1 運転技能

まったくの素人に、画一的に 3 時間の自動車運転法を教えた直後、一定の採点法で、外周コース一周の実地試験を行なったときの技能点を、被験者の C. C. No に対応させて図示したところ第 14 図のような結果が得られた。最適調整の人が



第 14 図 C. C. No と運転技能

最高点で、第 12 図の推定と同じ傾向が見られる。

2 運動技能

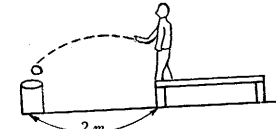
高校生数十人について

(a) 平均台の先端に立たせて緊張感を与え、ここから 2m 先のバケツの中に 10 コのお手玉を投げさせ、バケツにはいった個数

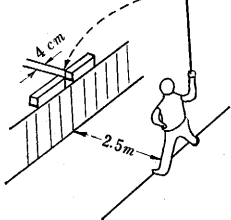
(b) 壇上に 2 コの木材で 4cm の隙間をつくり、これより 2.5m 前に生徒を立たせ、細竹でこの隙間を狙って 10 回振り下ろさせ、隙間を打った回数

これら二つの平均を各人の技能点とし、生徒の C. C. No に対応させて図示したところ第 15 図のような結果が得られた。この図でも最適調整近くに最高点が現われ、第 12 図の推定と同じ傾向が見られる。

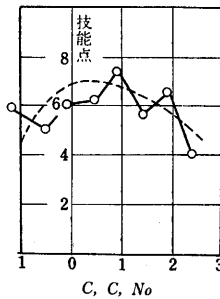
(a) お手玉投げ



(b) スキ間打ち



(c) 運動技能の分布



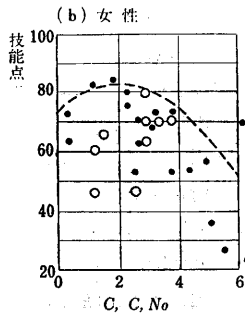
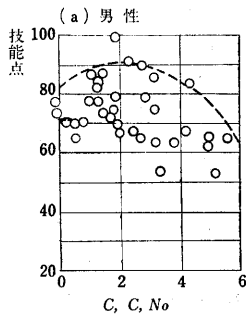
第 15 図 C. C. No と運動技能

3 男女の別

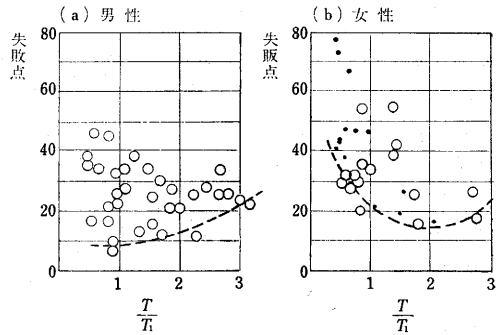
自動車の運転技能を測った被験者の中に多数の女性が混っていたので、男女別に C. C. No と技能点、 $T/T_1$  と失敗点との関係を求めたところ、第 16 図、第 17 図に示すような違いが現われた。特に第 17 図で男女別に失敗点の最小値を結ぶ曲線を画くことにより、男女別応答の特質の差をつぎのように推定することができる。

男性の応答

$T/T_1$  の変化で、あまり失敗点に差がないのは、第 11 図 (a) に示すように、目標値変化=他のことは気にかけないで、目標に向かって懸命に応答しているらしい。



第 16 図 C. C. No と技能点



第 17 図  $T/T_1$  と失敗点

女性の応答

$T/T_1$  が小さくなるほど失敗点が大きくなっているのは、第 11 図 (a) に示す  $D_2$  外乱の応答で、 $D_2$  外乱=判断を狂わせる刺激、すなわち、いろいろなことを気にかけながら応答していることが推定される。これは女性心理の特質ではなからうか。もちろん  $D_1$  外乱=馴れない動作をするための失敗も含まれているかも知れない。

また第 17 図で  $T/T_1$  の最小値をみると、ほぼ 0.5 の点に限界があり、 $T/T_1 = \frac{T_1+T_2}{T_1} = 1 + \frac{T_2}{T_1}$  の最小値として判断時間の  $T_2=0$  の場合を考えれば、 $T/T_1$  の最小値=1 となるべきはずのものが、筆者のテスト法によれば  $T/T_1$  の最小値=0.5 になっているところから、選別テストの打点動作に対応させた動作テストの腕振りには約 2 倍の抵抗を与えているようで、動作テストの抵抗を増して、最適調整の人の C. C. No を 0~2 に定めた作意は好ましくないかも知れない。したがって、C. C. No のテスト方法にも、なお改善の余地があるように思う。

6. あわて型とおくれ型

筆者のよく知る高校において、多数の生徒の動作特徴、すなわち挙動と C. C. No との関係を調べたところ、下表のような対応のあることが判った

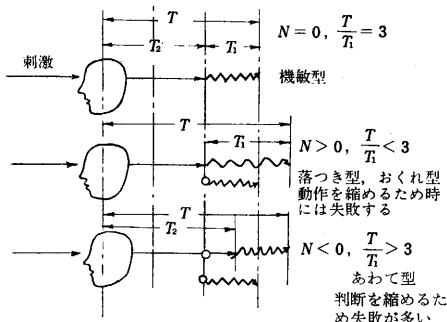
C. C. No と挙動

C. C. No	技能点	挙動	備考
-2~-1	極めて悪い	そそっかしい	落つきがない
0~2	最高点	機敏	運動選手が多い
5~6	やや悪い	落ちついている	文化部員が多い

このように C. C. No によって、それぞれの人間の動作特徴も知ることができるが、C. C. No の構成から、つぎのような解釈ができるように思う。

$$C. C. No \ N = \frac{KT_1 - T}{TT_1} = \frac{K - T/T_1}{T}$$

で、 $N \geq 0$  は分子の  $K \geq T/T_1$  と同値である。したがっ



第 18 図 C.C. No の動作特長

て最適応答の人を標準にとりて、作動周期  $T$  の刺激を与えたときの各人の応答ぶりを比較すれば、第 18 図に示すように

$N=0$  の最適応答の機敏型では、 $\frac{T}{T_1} \doteq 3$ ,  $T \doteq 3T_1$  で処理してつぎの刺激に応じられる。

$N>0$  のおくれ型では、判断は人並でも動作が遅いため ( $T_1$  が大),  $T_1$  を縮めて  $T$  の応答にはめ込むことから、動作が少しおくれたり、あるいは荒くなって、応答特性が若干悪くなる。

$N<0$  のあわて型では、動作は早くても判断が遅いため ( $T_2$  が大),  $T$  の応答を果たすためには判断時間を縮めて拾い読みをするか、または判断を途中で打ち切って動作の  $T_1$  をつなくことから、判断の読違い、見込み違いを行なって大失敗を起こすものと思われる。

このような解釈をすれば、C.C. No のマイナスの人

はあわて型の動特性を示し、ドレイクの実験に現われた事故指数の大きい人に相当することになる。

結 語

以上で人間が緊張して動作を起こしたときの、応答の良否を推定する目安となる C.C. No を誘導し、C.C. No と人間の動特性との関係について述べたが、

(1) 動特性を推定する各種の作動値がある。

(2) C.C. No  $N = \frac{K}{T} - \frac{1}{T_1} = Kf - f_1$  を用いるときは、安定係数  $K$  は人間の物理的、生理的、心理的その他のいろいろな条件で違った値になる。ということで、これらは今後の興味ある、かつ重要な研究課題である。

(1964年3月4日受理)

参 考 文 献

(1)自動制御関係  
 プロセス制御 (西川甚太外) 電気通信講座 共立出版  
 Industrial and Engineering Chemistry Vol. 48, No. 6  
 プロセス制御系の設計 (A. J. Young) コロナ社  
 工業振動学 (S. Timothenko) コロナ社  
 (2)人体および人間工学関係  
 順天堂大学体育学部紀要 (久内武, 小林一敏) 1962—12  
 人間工学 (倉田正一) 技報堂  
 人間工学 (坪内和夫) 日刊工業新聞  
 人間の随意運動 (安藤唯一) 体育の科学社  
 身心のはたらき (東電太郎編) 保健体育学大系 中山書店  
 人間工学特集・自動車技術 1963—7  
 交通工学入門 (堀克郎) 山海堂  
 (3)官能テスト関係  
 官能検査ハンドブック 日科技連  
 心理学における力学説 (W. ケーラー) 岩波書店

次号予告 (6月号)

研究解説

航空写真の標高測定精度	大島 太 市
薄肉開断面材の弾性力学 (IV)	川 井 忠 彦

海外事情

アメリカにおける数値制御工作機の動向	大島 康次郎
--------------------	--------

研究速報

電子回路による暖房のシミュレーション	沢 井 善三郎 川 瀬 太 郎 里 和武
ポロンの溶融塩電解に関する基礎的研究 (第1報) —電解浴の相平衡について—	明 石 和 夫 江 上 一 郎 鈴 木 鉄 也 湯 瀬 源 市

生 研 ニ ュ ー ス