

電気パルス刺激による2次元情報伝達[†]

谷江和雄*・館

暉*・小森谷

清*・阿部

稔*

Study on Two-Dimensional Electrocutaneous Communication

KAZUO TANIE*, SUSUMU TACHI*, KIYOSHI KOMORIYA* and MINORU ABE*

This paper deals with the information transmission characteristics of a two-dimensional electrocutaneous communication method using magnitude and frequency simultaneously. Firstly, the channel capacity of a two-dimensional electrocutaneous communication system is discussed. Secondly, the maximum information transmission rate is estimated from a category detection test. Finally, the reaction time, the time between the presentation of a two-dimensional electrocutaneous stimulus and a detectable response to it is measured and the maximum information transmission rate per second is calculated.

The following results are obtained; (1) The channel capacity of the two-dimensional electrocutaneous communication system is the summation of the channel capacities of both the magnitude dimension in a minimum frequency level and the frequency dimension in a minimum magnitude level. Its value ranges from 5.6 to 6.0 [bit/symbol] for four subjects. (2) The maximum information transmission rate estimated from the category detection test is 2.7—3.2 [bit/symbol] for three subjects. It is larger than the individual one-dimensional information transmission rate, but not more than the sum of the both. Especially, when the frequency and the magnitude dimensional stimuli are presented simultaneously, the information rate transmitted only through the magnitude dimension has a tendency to decrease due to the interaction between the two dimensions. (3) The reaction time of the two-dimensional category detection test is 300—970 [ms] for $N_m=2\sim 4$, $N_f=2\sim 4$, where N_m and

N_f indicate the numbers of categories of magnitude and frequency, respectively. On the basis of the above results, the upper limit of the presented number of the two-dimensional categories is a paired $N_m=3$, $N_f=3$, which can be more advantageous for the simultaneous presentation of two-dimensional stimuli from the standpoint of increasing the information transmission rate per second than for the sequential presentation of them. For $N_m=2\sim 3$, $N_f=2\sim 3$ information transmission rate per second is found to be 4.5[bit/symbol] to 6.4 [bit/symbol].

1. はじめに

皮膚表面へ加える電気パルス刺激により生体へ何らかの情報を送ろうとする時、使用電極を単一電極に限った場合、その情報次元として強度、周波数の二つの次元があることが知られている^{1),2)}。これらはそれぞれ、パルスのエネルギーおよびパルスの繰返し周波数に情報をのせることに相当する^{3),4)}。ところで、生体への情報伝達を考える場合、その信号の数は1種類であるとは限らず、複数の信号を取り扱わねばならないことが少なからず生ずる。そのような時、電極を複数個配置し、それぞれに独立に情報を対応させるのが最も直接的な情報伝達手法であるが、特に送るべき信号が2種類の場合には、単一の電極で、周波数と強度の両次元に同時に情報をのせることも考えられる。

このような二つの情報次元を同時に用いるいわゆる2次元情報伝達の研究は、古くは Pollack により音刺激に対して行われているが、それによれば、2種の情報を同時に呈示できるということの他に、単一刺激当りの伝達情報量を増やすことにも効果があることが指摘されている⁵⁾。単一刺激当りの伝達情報量の増加は、一定の必要な情報量を呈示する際の刺激素子数の減少にもつながることから、この2次元情報伝達はコンパクトな感覚代行装置の設計に有効に利用できることが予測される。

[†] 第17回日本エム・イー学会大会で一部発表(昭53・7)
第17回計測自動制御学会学術講演会で一部発表(昭53・8)

* 機械技術研究所 茨城県新治郡桜村並木 1-2

* Mechanical Engineering Laboratory, Niihari-gun, Ibaraki

(Received March 13, 1979)

(Revised November 12, 1979)

電気パルス刺激を用いる情報伝達に関する研

究は、最近比較的多く行われているが、2次元

情報伝達に関するものはほとんどなく、わずかに

恒川らの定電圧パルス刺激による、多カチコ

リ一判断の研究があるにすぎない¹⁾。

本論文は上述のような2次元情報伝達の特徴

に注目し、その情報伝達手段としての性能をよ

り詳細に評価するとともに、2次元情報伝達システム

を設計する際の基礎資料を提供することを目的とす

る。具体的には、まず2次元情報の提示方法について

考察した後、この種の情報伝達方式の最大能力を明

らかにするために、弁別閾をもとに通信容量を算出

する。つぎに多カチコリ一判断実験により、刺激の絶

対判断能力を測定し、その結果をもとに単一次元情報

伝達との比較のうえで、2次元刺激の有効性を評価す

る。また同時に次元間の干渉の問題についても考察す

る。最後に判断時間特性の面から2次元刺激が有利に

働く呈示刺激個数の限界と情報伝達速度を明示する。

2. 実験装置

Fig. 1 に使用した実験システムのブロック図を示

す。この図に示すごとく、上腕三頭筋上に筋方向に約

20 [mm] 間隔で3個の電極 (Beckman 形 Ag-AgCl,

φ8 [mm]) を両面テープを用いて装着し、これに多点

同時刺激装置²⁾から発生したパルスを刺激エネルギー

制御装置³⁾および定電流形アンプを介して、1

パルス当りのエネルギーが制御された刺激パルスとし

て呈示する。この際、中央の電極が外側の二つに対し

負となるように極性を選んだ。刺激パルスの繰返し周

波数、エネルギーなどは、多点同時刺激装置をコント

ロールする計算機 (PDP 11/40) のプログラムにより

ハードウェアの制約内で任意に変更可能である。

3. 2次元情報の提示方法と通信容量

周波数と強度に同時に情報をのせる2次元情報伝達

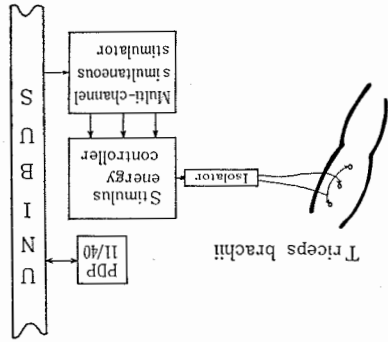


Fig. 1 Experimental setup

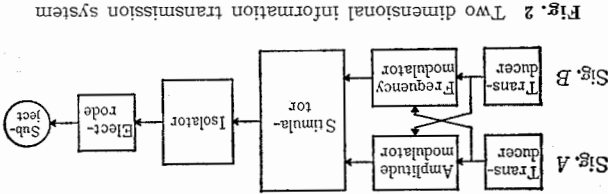


Fig. 2 Two dimensional information transmission system

には、すでに述べたように二つの情報を複合して伝達

するということと、単一刺激素当りの伝達情報量を

増やすという二つの二つの側面がある。

ここで前者の側面から情報の呈示形態を考慮する時重

要なことは、2種の呈示情報の独立性を保證すること

である。すなわち、一般に皮膚刺激に対する、周波数

強度感受特性は、相互に干渉しあっているために、各

次元に対応する物理パラメータを伝達情報に依りて個

別に変化させるだけでは、2種の情報を独立に呈示す

ることはできない^{4),9)}。たとえば Fig. 2 に示すごと

く2次元情報伝達システムを構成し、単に情報Aを刺

激エネルギー、情報Bを周波数の変化に対応させて刺

激を呈示する場合には、情報Aの変化に対し、情報B

が一定に保持されていたとしても、強度感覚は変動す

るため、刺激を受ける人には、あたかも情報Bも変化

したかのごとき印象を与える。このようことから、

2次元情報を構成する際には、個々の入力情報の変化

に対し、他の情報次元に対応する感覚が変化しないよ

うに、等強度、等周波数感受曲線をます明確にし、そ

れにそって情報を呈示することが必要となる。このこ

とは、後者の側面から2次元情報伝達を考慮する場合に

も重要な意味をもつ。すなわち、単一刺激当りの伝達

情報量をふやす点でも、等強度、等周波数感受曲線上

に刺激を配列することは効果的である。たとえば、

Fig. 3 (a) に示すごとく刺激を配置して呈示すると、

Fig. 3 (b) に示すごとく、すべて強度、周波数が異なる

刺激を数種呈示する場合よりも、より多くのカチコ

リ一を正確に判断できるようにすることが予備的な美

Fig. 3 Arrangement of two dimensional categories

on pulse energy and pulse frequency plane

(a)

(b)

Magnitude

Frequency

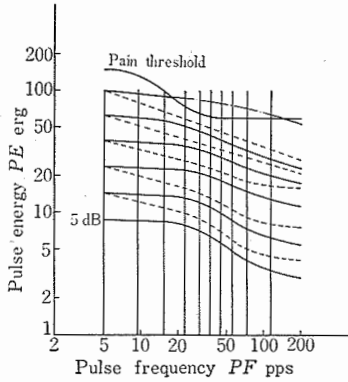


Fig. 4 Channel capacity of two dimensional electrocutaneous information transmission system is estimated from the number of cross points of equal magnitude curves and equal frequency sensation lines. Each dotted line in the figure indicates the differential limen from the corresponding equal magnitude curve. (subject: K. T.)

験により確認されている¹⁰⁾。また、このような2次元情報伝達特性に対する等感覚補正の効果は次章の結果からも確認される。

さて、皮膚刺激情報伝達における通信容量は、一般に、感覚のダイナミックレンジの間に取りうる識別可能な刺激の最大数の2の対数として定義されるが、以上のような2次元情報の提示条件を考慮すると、2次元情報伝達における通信容量は、そのような定義によらず等強度、等周波数曲線上にあるという条件を満たしつつ、互いの二つを完全に識別しうる刺激の集合をもとにして算出することが妥当と考えられる。このような刺激の集合の決定は、等周波数感覚曲線、等強度感覚曲線が、周波数、強度次元のダイナミックレンジの間にその周辺の弁別閾が重なることなく何本引けるかということに帰着する。そしてこれらの曲線の交点が識別点となり、その総数を N とすれば、 $\log_2 N$ により通信容量が求まる。Fig. 4 にこのような考え方で作成した周波数・刺激エネルギー面上の識別点のマップの一例を示す。図中の点線は等強度感覚曲線の周辺の弁別閾を示している。この等強度感覚曲線の作成およびその周辺の弁別閾の計算には、過去に測定した刺激次元における弁別閾のデータなどを用いた^{4), 8)}一方等周波数感覚曲線に関しては、周波数感覚が明瞭に得られるような刺激強度範囲ではほぼ直線になると仮定した。この仮定は経験的にみて妥当と考えられる。

ところで、一般に周波数弁別閾は強度感覚レベルが上昇すると減少する傾向がある⁸⁾。また、強度弁別閾は、特に周波数帯域 10 (pps)~100 (pps) 程度では、

周波数の増加とともにほぼ減少する⁴⁾。一方、等強度感覚曲線は、ほぼ等間隔で引かれる⁸⁾ことを考慮すると、この周波数-刺激エネルギー平面における識別点の数は、最小感覚レベルにおける周波数弁別閾の取りうるステップ数と、最小周波数レベルにおける強度弁別閾の取りうるステップ数との積で決まることが推定される。

このような算出法で、2次元情報伝達における通信容量を算出すると、被験者4名に対し、ダイナミックレンジを 5 [dB]~痛覚閾、5 [pps]~150 [pps]とした場合、50~60 ステップ程度、すなわち 5.6~6.0 [bit/symbol] 程度となった。

4. カテゴリー判断実験

通信容量は、弁別閾を基本として算出されたものであるから、これ以上は情報を送ることができないという限界を示す値である。一方、一般にわれわれは、カテゴリー番号が付けられた複数個の刺激をランダムに呈示された場合、個々の刺激の相違が判断できたとしても、それがどのカテゴリーの刺激であるかを判定できるとは限らない。本章では、人のこのような多カテゴリー刺激呈示に対する情報認知能力、すなわち刺激に対する一種の絶対判断能力の面から2次元刺激の情報伝達特性を評価するとともに、その結果をもとに、2次元情報呈示における等強度補正の効果および、次元の干渉の問題について考察を加える。

4.1 実験方法

前章のごとく刺激エネルギー・周波数平面上に等強度感覚曲線、等周波数感覚曲線（前章同様刺激エネルギーに対し一定とする。すなわち、刺激エネルギーレベルの異なる二つの刺激を呈示しても、その周波数が互いに等しい場合は同一の周波数感覚を与えるものとする。）をそれぞれ N , M 本引き、その $N \times M$ 個の交点 (E_1, f_1) , (E_1, f_2) (E_N, f_M) で定まるパラメータをもつ刺激のカテゴリーをランダムに呈示

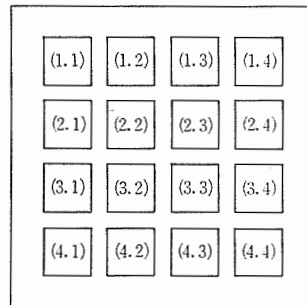


Fig. 5 Switch board

実験結果を Table 1 に示す。これは強度次元、周波数次元におけるカテゴリ数と情報伝達率 $H(x, y; z)$ の関係を示したものである。本実験では回答用のスイッチパネルの構造上の制約から $N_m = 4$, $N_f = 4$ までしか実験を行っていないが、いずれの被験者とも情報量は $N_m = 4$, $N_f = 4$ 程度で飽和する傾向があることがわかる。一方、 $H_{max}^{2D}/(H_{max}^{1D} + H_{max}^{2D})$ を計算してみると、被験者 K.T., Y.T., K.K., K.K. に対してそれぞれ、0.82, 0.79, 0.77 また恒川らの結果に対しては 0.74 となり、等強度補正をしたほうがいずれも、 H_{max}^{2D} は $H_{max}^{1D} + H_{max}^{2D}$ に近い値をとる。この $H_{max}^{2D}/(H_{max}^{1D} + H_{max}^{2D})$ の値が 1.0 に近い値をもつとはそれだけ、その 2 次元情報次元間に相互干渉をおこすことなく認知されることを意味するものと解釈されることから、本実験の結果は、2 次元情報伝達における次元の相互干渉の除去に、したがって結果的に伝達情報量を増加することに對し、一応等強度補正が効果をもつことを示唆するものと考え

Table 1 Two dimensional information transmission rate (N_f : Number of category of frequency dimension, N_m : Number of category of magnitude dimension, $H(x, y; z)$: Information transmission rate)

N_f	N_m	$H(x, y; z)$ bit/symbol		
		Subject K.T.	Subject Y.T.	Subject K.K.
2	2	2.0	2.0	2.0
	3	2.5	2.5	2.3
	2	2.5	2.5	2.4
3	2	2.5	2.8	2.4
	3	2.9	2.8	2.7
	4	3.0	2.8	2.6
4	2	3.0	2.7	2.6
	3	3.2	2.9	2.6
	4	3.1	3.0	2.7

Table 2 Maximum information transmission rate (H_{max}^{2D} : Two dimension, H_{max}^{1D} : Frequency dimension, H_{max}^{2D} : Magnitude dimension)

Subjects	H_{max}^{2D}	H_{max}^{1D}	$H_{max}^{1D} + H_{max}^{2D}$
K.T.	3.2	2.1	1.8
Y.T.	3.0	2.0	1.8
K.K.	2.7	1.8	1.7
Data from (ref. 1)	2.9	2.0	1.9

[bit/symbol]

確認した事実とも一致する。

この表の一番下の欄は、前節で予備実験の結果を引

用して指摘した 2 次元情報伝達における等強度補正の

効果をさらに裏付けるために、恒川らの実験による予

算機と対話しながら行われる。

4.2 実験結果と考察

実験結果を Table 1 に示す。これは強度次元、周波数次元におけるカテゴリ数と情報伝達率 $H(x, y; z)$ の関係を示したものである。本実験では回答用のスイッチパネルの構造上の制約から $N_m = 4$, $N_f = 4$ までしか実験を行っていないが、いずれの被験者とも情報量は $N_m = 4$, $N_f = 4$ 程度で飽和する傾向があることがわかる。一方、 $H_{max}^{2D}/(H_{max}^{1D} + H_{max}^{2D})$ を計算してみると、被験者 K.T., Y.T., K.K., K.K. に対してそれぞれ、0.82, 0.79, 0.77 また恒川らの結果に対しては 0.74 となり、等強度補正をしたほうがいずれも、 H_{max}^{2D} は $H_{max}^{1D} + H_{max}^{2D}$ に近い値をとる。この $H_{max}^{2D}/(H_{max}^{1D} + H_{max}^{2D})$ の値が 1.0 に近い値をもつとはそれだけ、その 2 次元情報次元間に相互干渉をおこすことなく認知されることを意味するものと解釈されることから、本実験の結果は、2 次元情報伝達における次元の相互干渉の除去に、したがって結果的に伝達情報量を増加することに對し、一応等強度補正が効果をもつことを示唆するものと考え

4.2 実験結果と考察

実験結果を Table 1 に示す。これは強度次元、周波数次元におけるカテゴリ数と情報伝達率 $H(x, y; z)$ の関係を示したものである。本実験では回答用のスイッチパネルの構造上の制約から $N_m = 4$, $N_f = 4$ までしか実験を行っていないが、いずれの被験者とも情報量は $N_m = 4$, $N_f = 4$ 程度で飽和する傾向があることがわかる。一方、 $H_{max}^{2D}/(H_{max}^{1D} + H_{max}^{2D})$ を計算してみると、被験者 K.T., Y.T., K.K., K.K. に対してそれぞれ、0.82, 0.79, 0.77 また恒川らの結果に対しては 0.74 となり、等強度補正をしたほうがいずれも、 H_{max}^{2D} は $H_{max}^{1D} + H_{max}^{2D}$ に近い値をとる。この $H_{max}^{2D}/(H_{max}^{1D} + H_{max}^{2D})$ の値が 1.0 に近い値をもつとはそれだけ、その 2 次元情報次元間に相互干渉をおこすことなく認知されることを意味するものと解釈されることから、本実験の結果は、2 次元情報伝達における次元の相互干渉の除去に、したがって結果的に伝達情報量を増加することに對し、一応等強度補正が効果をもつことを示唆するものと考え

し、それがどの刺激であるかを Fig. 5 に示すような

その行・列に強度次元・周波数次元が対応するように

配列されたマトリクス状の回答用スイッチを押す

とにより判定させる。ここで、各等強度感覚曲線の間

隔は、最低周波数レベルにおいて等間隔に、また等周波

数感覚曲線の間隔は、対数上で等間隔に定められた^{(8), (11)}。

こうして呈示された刺激に対する判断結果から、以下

の式に基づいて 2 次元伝達情報量 $H(x, y; z)$ を算

出する。

$$H(x, y; z) = H(x, y) - H_2(x, y) \quad \text{[bit/symbol]} \quad (1)$$

$$H(x, y) = -\sum_i \sum_j \frac{1}{k} P(x_i, y_j) \log_2 P(x_i, y_j)$$

$$H_2(x, y) = -\sum_i \sum_j \frac{1}{k} P(x_i, y_j | z_k) \log_2 P(x_i, y_j | z_k)$$

ただし、

x_i, y_j を有する刺激が生起する確率、 $P(x_i, y_j, z_k)$ は

カテゴリ - x_i, y_j を有する刺激および回答のカテゴリ

z_k が生起する確率、 $P(x_i, y_j | z_k)$ は回答

z_k を有する刺激が生起する条件付確率を示す。一つ

の実験における各カテゴリの生起回数は 20 回とし、

刺激呈示時間は 2 秒とした。被験者は健康男子 3 名

(22~32 才) である。実験過程は、すべて自動化され

ており、刺激パラメータの設定、回答の入力などは計

算機と対話しながら行われる。

4.2 実験結果と考察

実験結果を Table 1 に示す。これは強度次元、周波数次元におけるカテゴリ数と情報伝達率 $H(x, y; z)$ の関係を示したものである。本実験では回答用のスイッチパネルの構造上の制約から $N_m = 4$, $N_f = 4$ までしか実験を行っていないが、いずれの被験者とも情報量は $N_m = 4$, $N_f = 4$ 程度で飽和する傾向があることがわかる。一方、 $H_{max}^{2D}/(H_{max}^{1D} + H_{max}^{2D})$ を計算してみると、被験者 K.T., Y.T., K.K., K.K. に対してそれぞれ、0.82, 0.79, 0.77 また恒川らの結果に対しては 0.74 となり、等強度補正をしたほうがいずれも、 H_{max}^{2D} は $H_{max}^{1D} + H_{max}^{2D}$ に近い値をとる。この $H_{max}^{2D}/(H_{max}^{1D} + H_{max}^{2D})$ の値が 1.0 に近い値をもつとはそれだけ、その 2 次元情報次元間に相互干渉をおこすことなく認知されることを意味するものと解釈されることから、本実験の結果は、2 次元情報伝達における次元の相互干渉の除去に、したがって結果的に伝達情報量を増加することに對し、一応等強度補正が効果をもつことを示唆するものと考え

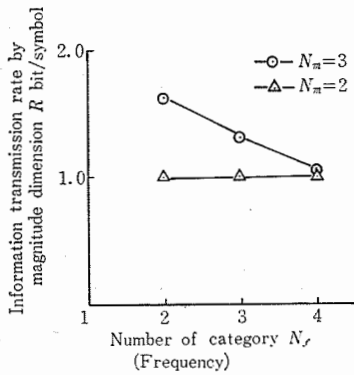


Fig. 6 Information transmission rate as a function of number of category N_f (N_f : Number of category of frequency dimension, N_m : Number of category of magnitude dimension, subject: Y. T.)

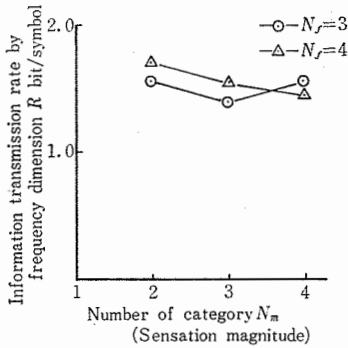


Fig. 7 Information transmission rate as a function of number of category N_m (N_f : Number of category of frequency dimension, N_m : Number of category of magnitude dimension, subject: Y. T.)

られる。このような等強度補正効果が得られる原因は、一つには、Fig. 3(a)に示すごとく刺激を配列して等強度補正を施すことで、刺激のパラメータの種類が減り、それが刺激判断時における記憶機能にかかる負担を減少させるためと推測される。ただし、この辺の記憶・判断メカニズムの詳細な解明は、さらに一層の心理物理的検討を要する問題である。

Fig. 6, 7 は、次元間の干渉の度合を評価するために2次元情報呈示実験において得られた判断結果を単一次元のみ注目して、情報量を計算したものである。たとえば Fig. 6 において—○—の曲線は強度レベルを3カテゴリーに分割し、かつ周波数を2, 3, 4カテゴリーに分割して刺激を呈示して、カテゴリーを判断した時に強度次元のみで送られる情報量の変化を示している。この両図から、強度-周波数を複合する2次元情報呈示における強度次元の判断は、カテゴリー

数が多くなると、周波数次元の場合よりももう一つの次元の影響、すなわち干渉を受けやすくなることがわかる。これは、周波数は、比較的、絶対感覚がもちやすく、したがって、他の刺激がノイズ的に作用する場合にも比較的安定に、カテゴリーの判断ができるからであろう。実際、これまでの単一次元に関する実験により、周波数次元は、強度次元よりも絶対判断可能なカテゴリー数は1~2程度多いことが明らかにされている。このようなことから、2次元でカテゴリーを設定する際は、強度次元のカテゴリー数を N 、周波数次元におけるカテゴリー数を M とした時、 $N < M$ となるようにしたほうが、より高い伝達情報量が期待できると考えられる。この結論の妥当性は、Table 1の結果からも推測できるし、また、恒川らの結論¹⁾とも一致するものである。

5. カテゴリー判断時間の測定

一般に1次元情報伝達におけるカテゴリー判断実験では、人は入力情報量が多くなるとそのカテゴリーの同定に時間を要するようになる。このカテゴリーを同定するまでの時間、すなわち判断時間を T [s]とし、入力情報量を H [bit/symbol]とすると、この両者の間には $T = a + bH$ (a, b は定数)なる関係のあることが数人の研究者により明らかにされている^{9), 12)}。

2次元情報伝達でも当然カテゴリーの判断時間は入力情報量に依存すると考えられるが、その場合もしも周波数、強度次元の分割数を N_f, N_m とした時の2次元カテゴリーの判断時間 T_{2D} が、周波数、強度次元の N_f, N_m 個のカテゴリーを個別に呈示した場合のそれぞれの判断時間 T_f, T_m の和よりも大きくなるならば、次元を複合せず各次元を逐次的に呈示したほうが、単位時間当りの伝達情報量を大きくするという面では有利になる。本章では、2次元カテゴリーの判断時間および周波数次元、強度次元を逐次的に呈示した場合のカテゴリー判断時間を測定し、2次元情報の単一時間当りの伝達情報量を評価するとともに、1次元情報を逐次的に呈示する方式との比較のうえで、2次元情報の最適呈示カテゴリー数について検討を加える。

5.1 実験方法

実験の内容は、前章の実験と同様に複数のカテゴリーの刺激をランダムに呈示し、それがどのカテゴリーの刺激かをできるだけ速く、かつ正確に被験者にすてに述べた Fig. 5 で示した回答用スイッチを押すことにより判定させ、その時の刺激呈示開始時点から回答スイッチが押されるまでの時間を計算機内のリアルタ

イムクロック (周期 1 [ms]) で測定するものである。

実験過程は下記の三つからなる。一般に判断時間 T

は T_a をカテコリーが既知の刺激が呈示されてから、

回答のスイッチを押すまでに要する時間、 T_r をカテ

コリーが未知の刺激が呈示されてから、所定の回答の

スイッチを押すまでに要する時間、 T_s をカテコリー

が既知の刺激が呈示されてから、刺激呈示時点から、

回答スイッチを押すようにし、刺激呈示時点から、

回答スイッチを押すまでの時間を測定する。刺激呈示

回数 20 回とし、 T_a はこれらの結果の平均値とす

る。以下の実験過程では、すべて判断時間を求める際、

実験時間から、この T_a の値をさし引いている。

つきに第 2 過程では、前章と同様の方法で、 $N_f \times$

N_m の 2 次元カテコリーを選定し、それをラフタムに

呈示した時の判断時間を求める。この過程では、呈示

刺激に対する回答の正解数が所定の値 ($20 \times$ カテコリー

の総数) になるまで試行を繰り返す。判断時間の測

定結果としては正解した試行に対するものだけを採用

する。この判断時間は、試行ごとに変動すると考えら

れることから、結果は、つぎの確率分布関数をもとに

百分位数で表示する。すなわち、2 次元カテコリーを

正確に α [%] 以内の時間で判断できる確率を $P(T_{2d}$

$< \alpha)$ とした時、

$$P(T_{2d} < \alpha) = \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_m} \beta(i, j) \int_{\alpha}^{\infty} f_i(T_{2d}) f_j(T_{2d}) dT_{2d} \quad (2)$$

ただし、 i, j : カテコリーの番号、 N_f, N_m : 周波数、

強度各次元のカテコリーの数、 $\beta(i, j)$: カテコリー

(i, j) が生起する確率、 $f_i, f_j(T)$: カテコリー (i, j) に

対する判断時間の確率密度関数

第 3 過程では、2 次元カテコリーを呈示した際に、

強度、周波数の各次元にのみ注目してカテコリー判断

を行う時の判断時間を第 2 過程と同様に測定す

る。そして、この測定結果をもとに両次元に対する判

断時間 T_m, T_r の総和 $T_{m+r} = T_m + T_r$ の確率分布関

数を求め、これと第 2 過程で得られた分布関数とを比

較する。この判断時間の総和の確率分布関数 $PS(T_{m+r}$

$< \alpha)$ は、次式で記述することができる。

$$PS(T_{m+r} < \alpha) = \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{j=1}^{N_m} \beta(i, j) \int_0^{\alpha} f_i(T_{m+r}) f_j(T_{m+r}) dT_{m+r} \quad (3)$$

ただし、 i, j : 強度、周波数各次元におけるカテコリー

イムクロック (周期 1 [ms]) で測定するものである。

実験過程は下記の三つからなる。一般に判断時間 T

は T_a をカテコリーが既知の刺激が呈示されてから、

回答のスイッチを押すまでに要する時間、 T_r をカテ

コリーが未知の刺激が呈示されてから、所定の回答の

スイッチを押すまでに要する時間、 T_s をカテコリー

が既知の刺激が呈示されてから、刺激呈示時点から、

回答スイッチを押すようにし、刺激呈示時点から、

回答スイッチを押すまでの時間を測定する。刺激呈示

回数 20 回とし、 T_a はこれらの結果の平均値とす

る。以下の実験過程では、すべて判断時間を求める際、

実験時間から、この T_a の値をさし引いている。

つきに第 2 過程では、前章と同様の方法で、 $N_f \times$

N_m の 2 次元カテコリーを選定し、それをラフタムに

呈示した時の判断時間を求める。この過程では、呈示

刺激に対する回答の正解数が所定の値 ($20 \times$ カテコリー

の総数) になるまで試行を繰り返す。判断時間の測

定結果としては正解した試行に対するものだけを採用

する。この判断時間は、試行ごとに変動すると考えら

れることから、結果は、つぎの確率分布関数をもとに

百分位数で表示する。すなわち、2 次元カテコリーを

正確に α [%] 以内の時間で判断できる確率を $P(T_{2d}$

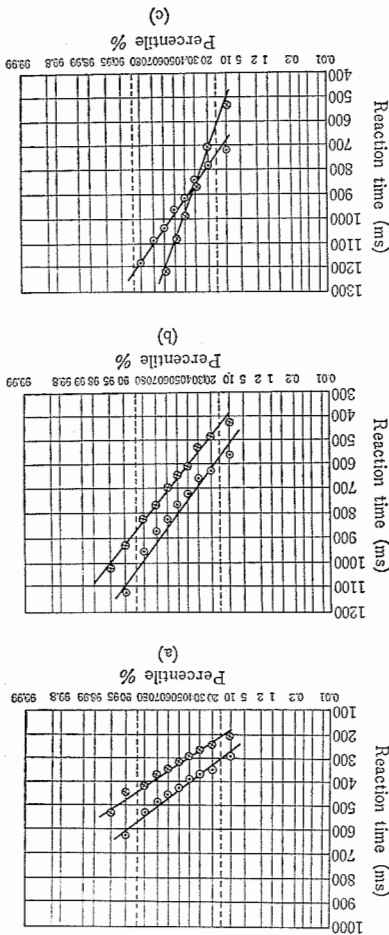


Fig. 8 Reaction time as a function of percentile

simultaneous presentation of two dimensional stimuli (\otimes) and the sequential presentation of them (\ominus) (N_f : Number of category of frequency dimension, N_m : Number of category of magnitude dimension)

- (a) $N_f=2, N_m=2$ (b) $N_f=3, N_m=3$
- (c) $N_f=4, N_m=4$

一の番号、 N_f, N_m : 強度、周波数各次元におけるカテコリーの数、 $\beta(i, j)$: カテコリー (i, j) が同時生起する確率、 $f_i(T)$: 強度次元のカテコリー i に対する判断時間の確率密度関数、 $m_i(T)$: 周波数次元のカテコリー j に対する判断時間の確率密度関数

結果の表示はこの式をもとに、百分位数で表示する。

なお被験者は健康男子 3 名 (22~32 才) である。またカテコリー数については、 $(N_m, N_f) = (2, 2), (2, 3), (3, 2), (3, 3), (3, 4), (4, 3), (4, 4)$ に対して行った。

5.2 実験結果

第 1 過程の実験において、パルスの周波数を 10,

20, 50, 100 [ms] と種々変更して測定を行ったところ、3名の被験者に対する平均値 T_d は 183 [ms], 202 [ms], 214 [ms] となった。第2過程, 第3過程の実験では判断時間を求める際、実測値からこれらの値をさし引いた。

Fig. 8(a), (b), (c)に第2過程, 第3過程の実験から得られた判断時間の測定結果の例を示す。これは、 $(N_m, N_f) = (2, 2), (3, 3), (4, 4)$ の場合に関する3名の被験者の判断時間の平均値の確率分布関数を正規確率紙上にプロットしたもので、その横軸は百分位数に、また縦軸は判断時間に対応している。図中のプロットの相異は第2過程(—⊗—)および第3過程(—○—)の実験から得られた結果を示している。この結果からそれぞれの判断時間の分布はほぼ正規分布に従うことがわかる。なおここでは三つの場合の結果しか示していないが、 $(N_m, N_f) = (2, 3), (3, 2), (3, 4), (4, 3)$ のそれぞれに対しても同様の傾向が得られた。

5.3 考察と検討

第2過程の実験は5.1節で述べたごとく、2次元カテゴリーを同時に呈示した時のカテゴリー判断時間の分布を求めたものである。一方、第3過程のそれは各次元のカテゴリー i, j を逐次的に呈示して、カテゴリー (i, j) を同定させようとした時の判断時間の分布を測定するものであった。ここで、この実験から得られる測定結果は見方を変えれば2次元刺激の判断過程を、各次元を個別に参照することによってその刺激がどのカテゴリーに属する刺激であるかを判定するというモデルで記述できるとした時の2次元刺激に対する判断時間の推定値を与えるものともみなすことができる。Fig. 8(a), (b), (c)の測定結果は2次元刺激を直接判断することから求めた判断時間 T_{2D} と次元を個別に参照するとして評価した2次元刺激の判断時間 $T_f + T_m$ とが、それぞれ異なった値になることを示している。すなわち呈示カテゴリー数が少ない場合には、 T_{2D} のほうが、 $T_f + T_m$ よりも小さくなる確率が高い。そして呈示カテゴリー数が増加するにつれてその差は接近し、次第に百分位数の低い領域をのぞき逆転する傾向が見られる。

このような結果は上述の二つの実験過程の内容を考慮すると、2次元刺激を呈示されてカテゴリー判断を求められた場合、カテゴリーが少ない時は各次元を個別に見ず、一種のパターンとしてそれを認知すること、すなわち、複数の情報の一種の総合化が知覚過程で行われることを示唆するものと考えられる。

しかしカテゴリーが多くなると、その総合化も困難になる。この場合の判断過程は、本実験の結果のみか

らでは詳細に論ずることはできないが、多分、Millerらが2種の多次元情報が異種か同種かを判定する際の判断過程では、対象が複雑になると情報の総合化と個別に参照する過程の双方が繰り返されるとしていることから¹⁴⁾、ほぼそのような状況が生じて、判断時間が長くなるものとも解釈される。また、カテゴリーの多い場合でも、百分位数の低い領域で2次元カテゴリーを直接判断した場合のほうが判断時間が速くなっているが、これは、Pollack ら⁵⁾も指摘しているごとく、端点のカテゴリーに対して(たとえば、 $(1, 1), (N_f, N_m)$)カテゴリーの記憶が一般的に容易であり、比較的模式としてそれを認知しやすいということの効果が表われているものと思われる。このことは、各カテゴリーに対する判断時間の測定結果の分布形状から一応確認された。

2種の実験過程から得られた判断時間の相異をより定量的に把握し、かつ2次元情報伝達に有効な呈示カテゴリー数の範囲を明らかにするために、つぎに統計的検定を行った。まず、 F 検定により分散に有意差のないことを確認した後、判断時間の平均値間の有意差検定(t 検定)を行った結果をTable 3に示す。特に $N_f = 4, N_m = 4$ に対しては、判断時間の百分位数が50[%]となる点の前後に対しても検定を行った。この表から $p < 0.05$ で、 $N_m = 3, N_f = 3$ までが差が有意となることがわかる。また、 $N_f = 4, N_m = 4$ では百分位数50[%]以上で、逆の方向に差が有意となる。

Table 3 Mean reaction time for the simultaneous presentation of two dimensional stimuli and the sequential presentation of them and associated t -tests (N_f : Number of category of frequency dimension, N_m : Number of category of magnitude dimension, RT : Mean reaction time for the simultaneous presentation of two dimensional stimuli [ms], RTS : Mean reaction time for the sequential presentation of two dimensional stimuli [ms])

N_f	N_m	RT	RTS	t^*	Freedom
2	2	317	437	-2.14	38
	3	487	583	-2.18	38
3	2	506	629	-2.53	38
	3	643	774	-2.56	38
	4	770	874	-1.15	38
4	3	773	886	-1.15	38
				0.82(0-100%)	38
	4	1079	965	-0.58(0-50%)	16
				2.52(50-100%)	18

* Critical $t(38) = 1.68$, $t(18) = 1.73$ and $t(16) = 1.75$, $p < 0.05$, one-tailed

て、情報伝達特性が低下することを明らかにした。

(iii) 2次元情報に対するカテゴリー判断断時間を測定し、情報伝達速度の面からは、カテゴリー数 $N_m \leq 3$ 、 $N_f \leq 3$ の場合に対してのみ、2次元情報伝達か有利になることを指摘した。また種々のカテゴリー数に對する、2次元情報の情報伝達速度は、4.5~6.4 [bit/s] 程度になることを明らかにした。

最後に、常日頃ご指導いただき早稲田大学 加藤一郎教授、また本研究に対し多大のご支援をいただいた機械技術研究所 本田富士雄所長、木村 誠次長、清水重郎システム部長、および実験にご協力いただいた、早稲田大学学生 三浦正明(現、ヤマハ発動機(株))、淺羽樹一郎、富田良幸の各氏に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 恒川, 加藤: 電気刺激に対する人間の情報処理能力, 人間工学, 6, 181/187 (1970)
- 2) R. E. Prior: Study of Electrocortaneous Parameters Relevant to Dynamic Tactual Communication Systems, Doctoral thesis, UCLA (1972)
- 3) 鶴, 谷江, 阿部: 経皮電気刺激の強度感覚に対するパルス高とパルス幅の効果, 医用電子と生体工学, 15-5, 13/18 (1977)
- 4) 谷江, 鶴, 小森谷, 阿部: 電気パルス刺激エネルギーに対する皮膚の強度感覚と丁度可差異, 計測自動制御学会論文集, 13-6, 595/602 (1977)
- 5) I. Pollack: The Information of Elementary Auditory Displays, II, J. Acoust. Soc. Am., 25, 765/769 (1953)
- 6) 谷江, 鶴, 谷, 前田, 大野, 藤川, 阿部: 多同時刺激装置の開発, 機械技術研究所報, 31-2, 32/44 (1977)
- 7) 谷江, 鶴, 小森谷, 阿部, 三浦: 刺激エネルギーを強度次元パラメータとして用いる定エネルギー型電気パルス刺激情報伝達装置, 医用電子と生体工学, 18-1, 40/42 (1980)
- 8) 谷江, 鶴, 小森谷, 阿部: 電気パルス刺激情報伝達における周波数次元の検討, 機械技術研究所報, 33-4, 159/170 (1979)
- 9) 市川, 山本, 三浦, 阿部: 皮膚電気刺激による情報伝達の基本的特性, パイオメカニクス 4, 17/24, 東大出版会 (1978)
- 10) 谷江, 鶴, 小森谷, 阿部, 三浦: 電気パルス刺激における2次元情報伝達, 第17回日本エム・シー学会大会論文集, 268 (1978)
- 11) 谷江, 鶴, 小森谷, 阿部, 三浦: 電気パルス刺激情報伝達における多カテゴリー判断実験, 第17回 SICPE 學術講演会予集, 407/408 (1978)
- 12) T. B. Sheridan and W. R. Ferrell: Man-Machine Systems, p. 111, The MIT Press (1974)
- 13) F. Athreave (小野, 羽生訳): 心理学と情報理論, p. 102, ライオン (1968)
- 14) J. Miller: Multidimensional Same-Different Judgments: Evidence Against Independent Comparisons of Dimensions, J. Experimental Psychology, Human Perception and Performance, 4-3, 423/439 (1978)

(i) 2次元情報伝達における通信容量を算出する際、刺激の識別点を等強度感覚曲線と等周波数感覚曲線の交点として評価すべきことを指摘し、結果として、通信容量は、最低刺激レベルにおける、周波数弁別閾および強度弁別閾のダイナミックレンジ間で取りうるスライツ数の積で求められることを明らかにした。またこの方法で3名の被験者に対し、通信容量を算出したところ、5.6~6.0 [bit/symbol] 程度となつた。

(ii) 2次元情報伝達における情報伝達特性をカテゴリー判断実験に基づき検討し、呈示カテゴリーが $N_m = N_f = 4$ の場合に対して、伝達情報量はほぼ最大となり、2.7~3.2 [bit/symbol] 程度になると、また2次元カテゴリーを呈示する場合には、次元に相互干渉が生じ、特に、強度次元が他の次元の干渉をうけ

6. お 結 語

合が最も有利であることがわかる。

という場合には、カテゴリー数 $N_f = 2$, $N_m = 2$ の場合がなく、単に単位時間により多くの情報を伝達したいに特に、一定時間内に呈示するカテゴリー数に制限により変化し、ほぼ 4.5~6.4 [bit/s] であること、その情報伝達における情報伝達速度は呈示カテゴリー数平均値 [s] で算出した結果を示す。これから2次元: 2次元伝達情報量 [bit/symbol], T : 判断時間の数に対して、情報伝達速度を $H(x, y; z)/T(H(x, y; z))$ に Table 4 に2次元情報伝達か有効となるカテゴリーと示唆される。

味では2次元情報伝達はそれほど有効とはならない、増加しても、時間当りの情報を増加させるという意味では2次元情報伝達はそれほど有効とはならないと示唆される。

断時間の差は有意とはならず、単位刺激当りの情報量判断する。一方、 $N_m > 3$, $N_f > 3$ の場合は、平均判断場よりも伝達速度的には明らかに有利となることが次元を複合して送ったほうが、各次元を逐次的に送るすなわち、このことから、 $N_m \leq 3$, $N_f \leq 3$ までは、

N_f	N_m	$H(x, y; z)/T$ bit/s
3	2	5.0
	3	4.5
2	2	6.4
	3	5.1

Table 4 Two dimensional information transmission rate for three subjects (N_f : Number of category of frequency dimension, N_m : Number of category of magnitude dimension, $H(x, y; z)/T$: Information transmission rate)