低周波振動刺激の等感曲線と閾値曲線

——ヒトの手掌部皮膚の振動感受性について¹——

京 都 大 学 福 田 秀 子

浜松医科大学 佐 藤 愛 子・宮 岡 徹

Equal-sensation contours and a threshold curve for low-frequency vibrotactile stimuli on the glabrous skin of the human hand

Hideko Fukuda (*Department of Psychology, Faculty of Letters, Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606*), Aiko Satow and Tetsu Miyaoka (*Department of Psychology, Hamamatsu University School of Medicine, Hamamatsu-shi, 431-31*)

Using vibrotactile stimuli, equal-sensation contours and a threshold curve were determined on the glabrous skin of the human hand. Equal-sensation contours were measured between 1 Hz and 16 Hz. When plotted on log-log coordinates, they monotonically decreased as a function of frequency and were downward by concaved. The threshold curve was measured between 1 Hz and 50 Hz. Its values decreased linearly from 1 Hz to 16 Hz, became constant at 16-35 Hz, and decreased again at 35-50 Hz. Therefore, at the stimulus range of 1-16 Hz, equal-sensation contours were downward concave and the threshold curve was more or less linear. This discrepancy seems to be caused by the differences in mechanoreceptor types which take part in subjective responses: suprathreshold sensation depends on several types of mechanoreceptors, whereas vibrotactile thresholds depend mainly on RA receptors (Meissner corpuscles).

Key words: vibrotaction, equal-sensation contours, vibrotactile threshold, mechanoreceptors, low frequency (vibratory stimuli), glabrous skin (human hand).

ヒトの手掌部皮膚に振動刺激を呈示したときの等感曲線 (equal-sensation contour) は、ほぼU字型となる。すなわち、刺激周波数 200—250 Hz 付近までは、周波数が高くなるにつれ感度が良くなるが、250 Hz 以上では感度が低下する。振動閾値曲線も、この等感曲線と比較的似たパターンを示すことが知られている (Goff, 1967; Mountcastle, LaMotte, & Carli, 1972; Stevens, 1968; Talbot, Darian-Smith, Kornhuber, & Mountcastle, 1968; Verrillo, Fraioli, & Smith, 1969)。

ところで、ヒトやサル、ネコなどの皮膚無毛部には、振動等の機械的刺激に応ずる機械受容器 (mechanoreceptor) が4種あるとされている。それらは、機械的刺激への応答性の相違と受容野の特性とから、PC (パチニ小体)、RA (速順応型)、SA I (遅順応 I 型)、SA II (遅順応 II 型) に分けられる。PCは機械的刺激の加速度に、RAは速度に、SA I は速度と振幅 (強度) に、

SA II は振幅 (強度) に、それぞれ主として応答する (Johansson, 1979; Johansson & Vallbo, 1979; Knibestöl, 1973, 1975; Knibestöl & Vallbo, 1980; 宮岡・間野, 1980; 小川, 1981; Talbot, et al., 1968; Zimmermann, 1978)。また、これらの受容器の形態は、異論はあるものの、PC がパチニ小体、RA がマイスナー小体、SA I はメルケル盤、SA II はルフィニ終末であると言われている (Johansson, 1979; Mountcastle, 1980; 小川, 1981; Zimmermann, 1978)。

本研究では、ヒトの手掌部皮膚に低周波の振動刺激を与え、等感曲線と閾値曲線を求めた。また、これらの曲線の成立根拠について、各機械受容器の特性との関連から考察を試みた。本研究で低周波の振動刺激を採用したのは、ひとつには、低周波領域で各受容器の特徴がよくあらわれるためであり、いまひとつには、従来の研究でとりあげられることの少なかった周波数領域について探究するためである。

実 験 I

方 法

被験者 20—30 歳代の男性 1 名、女性 2 名。

¹ 本研究は昭和 53 年度文部省科学研究費一般研究 D (課題番号 361035) および、昭和 54 年度文部省科学研究費一般研究 D (課題番号 461031) の助成により、浜松医科大学において行われた。また、本研究の一部は、日本心理学会第 44 回大会 (1980)、および、人間工学会関東支部会 (1981) において発表された。

装置 装置のブロックダイアグラムを Fig. 1 に示す。関数発生器 (Wavetek) で正弦波を発生させ、ドライユニットを駆動した。手掌を支持する台に手をのせ、支持台にあけた直径 1 cm の穴から接触子をつき出させて振動刺激を呈示する方式をとった。先端直径 1 mm の接触子は、刺激部位である左手小指先端にちょうど接するようにあらかじめ調節しておいた。それゆえ、皮膚には半正弦波パターンの刺激が与えられることになった。刺激量の測定にはストレインゲージを用いたので、表示は N 単位となっている。

刺激と手続き 標準刺激 (以下 SS と略す) の周波数は 1, 2, 4, 8, 16 Hz, 比較刺激 (以下 CS と略す) の周波数は 1, 2, 4, 8, 12, 16 Hz とした。被験者に SS と CS を 5 秒間ずつ反復呈示し、SS と主観的に同じ大きさになるよう CS を調節することを求めた。試行数は、SS と CS すべての組合せについて、上昇系列と下降系列各 2 試行ずつ、計 120 試行とした。なお、測定精度の向上を考慮したため、SS の強度は、(1, 2, 4, 8, 16 Hz それぞれに対し) 56, 44, 46, 22, 9 mN とした。

結果と考察

3 名の被験者の結果はよく似ていたもので、その幾何平均値を Fig. 2 に示す。図から明らかなように、SS の周

Fig. 1. Block diagram of apparatus for Experiment I.

² 振動刺激として $y = a \sin 2\pi ft$ (a は振幅, f は周波数) の正弦波が与えられた場合、感覚の大きさが刺激振幅のみによって決まるとすれば、等しい感覚をひきおこす刺激は、周波数に関係なく $a = \text{const.}$ で、等感曲線は Fig. 3 の両対数グラフ上で x 軸に平行な直線となる。つぎに、感覚が刺激速度絶対値 (を平均した値) のみによって決まるとすれば、 $|dy/dt| = |2\pi fa \cos 2\pi ft|$ であるから、等しい感覚をひきおこす刺激は、 $2\pi fa = \text{const.}$ つまり、 $a = Kf^{-1}$ (K : 定数) となる。よって、等感曲線は両対数グラフ上で -1 の勾配をもつ直線となる。また、感覚が刺激加速度絶対値 (を平均した値) のみによって決まるとすれば、 $|d^2y/dt^2| = |4\pi^2 f^2 a \sin 2\pi ft|$ であるから、等しい感覚をひきおこす刺激は、 $4\pi^2 f^2 a = \text{const.}$ となり、等感曲線は -2 の勾配の直線となる。

波数にかかわらず、各等感曲線は CS の周波数の関数として減少するパターンとなる。また、いずれの等感曲線も上に凸の傾向を示している。

もし等感曲線が刺激の振幅にのみ依存して決まるなら、Fig. 3 に示すごとく、両対数グラフ上で、それは x 軸に平行な直線となるはずである。また等感曲線が、刺激の速度 (の絶対値) のみ、あるいは刺激の加速度 (の絶対値) のみ依存して決まるなら、それは両対数グラフ上で、それぞれ、勾配 -1 , 勾配 -2 の直線となるはずである²。しかし実際には、これらのいずれとも異っている。このことは、我々の振動等感曲線が、数種類の受容器の応答を統合した結果に基づくもので、刺激の振幅、速度、加速度すべてに依存していることを示している (宮岡・佐藤・間野・福田, 1981)。

実 験 II

方 法

被験者 20—30 歳代の男性 2 名、女性 2 名。

装置 装置のブロックダイアグラムを Fig. 4 に示す。関数発生器 (Wavetek) で正弦波を発生させ、加振器 (EMIC) を駆動した。実験 I と同じ手掌支持台を用い、その穴から接触子をつき出させ、皮膚にあらかじめ 1 mm くいこませておいた。これは、皮膚への正弦波パターンの呈示を保証するためである。接触子の大きさは 5 mm^2 、刺激部位は左手母指球とした。刺激量の測定には

Fig. 2. Family of equal-sensation contours for vibration derived from data obtained by the method of direct intensity matching. Data points are the geometric means for three subjects. The abscissa scale represents frequency of comparison stimuli (CS), and the ordinate scale represents the intensity ratio of CS to standard stimuli (SS). The parameter is the standard frequency.

非接触変位計 (EMIC) を用いた。

刺激と手続き 極限法により振動の検出閾値を測定した。1, 2, 4, 8, 16, 25, 35, 50 Hz の 8 種の正弦波振動刺激のそれぞれについて、上昇系列 2 回、下降系列 2 回の測定を行なった。刺激強度のきりかえは、実験者が減衰器を 0.1 dB ステップで操作して行なった。系列内における各刺激の呈示時間は 3 秒、刺激呈示間隔は 4 秒とし、各刺激呈示の 1 秒前に発光ダイオードにより被験者に合図した。

結果と考察

4 名の被験者の結果はよく似ていたもので、その幾何平均値を Fig. 5 に示す。求められた閾値は、両対数グラフ上で、刺激周波数が 1 Hz から 16 Hz までは直線的に減少し、16—35 Hz では平坦に、その後 50 Hz でまた幾分低下する傾向を示している。1—16 Hz のデータにべき関数をあてはめると、指数は -0.87 となった ($|r|=0.996$)。この 16 Hz までの結果は、Fig. 3 との比較から、速度にかなり依存した形になっていることがわかる。

Fig. 3. Theoretical equal-sensation contours predicted when the sensation magnitude depends on amplitude, velocity, or acceleration. Each numeral at the right indicates the slope of line predicted from the property of amplitude (0), velocity (-1), or acceleration (-2).

Fig. 4. Block diagram of apparatus for Experiment II.

一方、神経生理学的研究から、RA と PC は振動閾値が低く、その閾値曲線はいずれも U 字型を示すことが知られている。最低閾値は RA が 30—40 Hz 付近、PC が 200—250 Hz 付近であり、その値は RA より PC の方が小さい。そして、40 Hz 付近を境としてそれ以下の周波数では RA が、それ以上では PC が最も低い閾値をもつ受容器となっている (宮岡・間野, 1980; Mountcastle, et al., 1972; 小川, 1981)。また従来の心理物理学的研究によれば、40 Hz 以上の閾値曲線は PC の閾値曲線と一致することが知られている (Capraro, Verrillo, & Zwillocki, 1979; Labs, Gescheider, Fay, & Lyons, 1978; Mountcastle, et al., 1972; Talbot, et al., 1968; Verrillo & Gescheider, 1979)。20 Hz 付近から 40 Hz までの刺激周波数では心理物理実験の結果は二通りに分かれ、閾値が周波数の関数として減少するという報告 (Goff, 1967; Mountcastle, et al., 1972; Talbot, et al., 1968) と、周波数に関係なく閾値は一定であるとする報告がある (Capraro, et al., 1979; Labs, et al., 1978; Verrillo, 1963; Verrillo, et al., 1969; Verrillo & Gescheider, 1979)。Gescheider, Capraro, Frisina, Hamer, & Verrillo (1978) は、Verrillo らが皮膚表面の波動伝播をおさえる手掌支持台を用いているのに対し、Goff らが支持台を用いていないため、両者の相違が生じたのであろうと推測している。

本実験では手掌支持台を用いたため、16—35 Hz の範囲では Verrillo らの報告と一致した結果となったが、手掌支持台を用いた実験のほとんどなされていない 16 Hz 以下の周波数では、周波数の関数として閾値が単調減少するパターンがみられた。このパターンは RA の閾値曲線と割合よく重なる。このように本実験は、基本的には、神経生理学的研究の結果を心理物理的に確認した

Fig. 5. Threshold curve for vibration derived from data obtained by the method of limits. Data points are the geometric means for four subjects. Regarding the regression line between 1 Hz and 16 Hz in log-log coordinates, X, Y, and r indicate stimulus frequency, threshold peak to peak amplitude, and correlation coefficient, respectively.

ものとなった。

全 般 的 考 察

実験Ⅰと実験Ⅱに共通する 1—16 Hz の等感曲線と閾値曲線を比較すると、周波数が高くなる程感度が良くなるという全体的なパターンは同じである。しかしながら、両対数グラフ上で、等感曲線が明らかに上に凸の曲線となるのに対し、閾値曲線はほぼ直線としてあらわれ、しかもその勾配が -0.87 という -1 に近い値を示した。これらの結果より、閾上強度の振動刺激には数種類の機械受容器が心理応答に関与し、閾水準の強度にはおもに RA (マイスナー小体) が心理応答に関与するということが示唆される。

実験Ⅰでは刺激“強度”を測定しようとしたため、我々の装置の性能の関係上刺激が半正弦波となったが、今後は正弦波でも同様な等感曲線が得られるかを確認する必要がある。

要 約

(a) ヒトの手掌部皮膚に低周波振動刺激を呈示したときの等感曲線と閾値曲線を求め、機械受容器との関係を考察した。(b) 実験Ⅰでは 1—16 Hz の範囲で SS と CS をマッチングさせ等感曲線を求めた。得られた等感曲線は両対数グラフ上で周波数の関数として単調減少するパターンを示し、かつ上に凸の曲線となった。(c) 実験Ⅱでは振動の検出閾値を 1—50 Hz にわたり極限法で測定した。求められた閾値は両対数グラフ上で刺激周波数が 1 Hz から 16 Hz までは直線的に減少し、16—35 Hz では平坦に、そして 35—50 Hz では再び減少するパターンを示した。(d) 1—16 Hz の刺激範囲では、等感曲線は上に凸の曲線となり閾値曲線は直線となった。これは心理応答に関与する機械受容器のちがいによると考えられる。すなわち、閾上強度の振動刺激には数種類の機械受容器が心理応答に関与するのに対し、閾水準の強度にはおもに RA (マイスナー小体) が心理応答に関与するためであろうと考察された。

引 用 文 献

- Capraro, A. J., Verrillo, R. T., & Zwillocki, J. J. 1979 Psychophysical evidence for a triplex system of cutaneous mechanoreception. *Sensory Processes*, **3**, 334-352.
- Gescheider, G. A., Capraro, A. J., Frisina, R. D., Hamer, R. D., & Verrillo, R. T. 1978 The effects of a surround on vibrotactile thresholds. *Sensory Processes*, **2**, 99-115.
- Goff, G. D. 1967 Differential discrimination of frequency of cutaneous mechanical vibration. *Journal of Experimental Psychology*, **74**, 294-299.
- Johansson, R. S. 1979 Tactile afferent units with small and well demarcated receptive fields in the glabrous skin area of the human hand. In D. R. Kenshalo (Ed.), *Sensory functions of the skin of humans*. New York: Plenum Press.
- Johansson, R. S., & Vallbo, Å. B. 1979 Tactile sensibility in the human hand: relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin. *Journal of Physiology*, **286**, 283-300.
- Knibestöl, M. 1973 Stimulus-response functions of rapidly adapting mechanoreceptors in the human glabrous skin area. *Journal of Physiology*, **232**, 427-452.
- Knibestöl, M. 1975 Stimulus-response functions of slowly adapting mechanoreceptors in the human glabrous skin area. *Journal of Physiology*, **245**, 63-80.
- Knibestöl, M., & Vallbo, Å. B. 1980 Intensity of sensation related to activity of slowly adapting mechanoreceptive units in the human hand. *Journal of Physiology*, **300**, 251-267.
- Labs, S. M., Gescheider, G. A., Fay, R. R., & Lyons, C. H. 1978 Psychophysical tuning curves in vibrotaction. *Sensory Processes*, **2**, 231-247.
- 宮岡 徹・間野忠明 1980 ヒトの触覚求心性神経発射の解析 臨床脳波, **22**, 800-809.
- 宮岡 徹・佐藤愛子・間野忠明・福田秀子 1981 低周波振動刺激の等感曲線(Ⅱ) 日本心理学会第45回大会発表論文集, 107.
- Mountcastle, V. B. 1980 Neural mechanisms in somesthesia. In V. B. Mountcastle (Ed.), *Medical physiology*. St. Louis: The C. V. Mosby Company.
- Mountcastle, V. B., LaMotte, R. H., & Carli, G. 1972 Detection thresholds for stimuli in humans and monkeys: comparison with threshold events in mechanoreceptive afferent nerve fibers innervating the monkey hand. *Journal of Neurophysiology*, **35**, 122-236.
- 小川 尚 1981 皮膚感覚器の機能 神経進歩, **25**, 471-481.
- Stevens, S. S. 1968 Tactile vibration: change of exponent with frequency. *Perception & Psychophysics*, **3**, 223-228.
- Talbot, W. H., Darian-Smith, I., Kornhuber, H. H., & Mountcastle, V. B. 1968 The sense of flutter-vibration: comparison of the human capacity with response patterns of mechanoreceptive afferents from the monkey hand. *Journal of Neurophysiology*, **31**, 301-334.
- Verrillo, R. T. 1963 Effect of contactor area on the vibrotactile threshold. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **35**, 1962-1966.

Verrillo, R. T., & Gescheider, G. A. 1979 Psycho-physical measurements of enhancement, suppression, and surface gradient effects in vibrotaction. In D. R. Kenshalo (Ed.), *Sensory functions of the skin of humans*. New York: Plenum Press.

Verrillo, R. T., Fraioli, A. J., & Smith, R. L. 1969 Sensation magnitude of vibrotactile stimuli.

Perception & Psychophysics, 6, 366-372.

Zimmermann, M. 1978 Mechanoreceptors of the glabrous skin and tactile acuity. In R. Porter (Ed.), *Studies in neurophysiology*. Cambridge: Cambridge University Press.

——1981. 6. 15. 受稿, 1982. 3. 13. 受理——

The Japanese Journal of Psychology
1982, Vol. 53, No. 3, 173-176

資 料

ストロボ運動における刺激の形態情報とその提示順序効果

九州芸術工科大学 西 郷 賀津雄・大 村 英 子

The effect of form information and presentation order of stimuli on stroboscopic motion

Katsuo Saigo and Hideko Ohmura (*Department of Psychology, Kyushu Institute of Design, Minami-ku, Fukuoka 815*)

The likelihood of stroboscopic motion between different contour combinations was obtained under temporal conditions (duration, ISIs). Three kinds of contour figures were prepared; the real, the subjective and the control. Two stimulus figures for such combinations were chosen from these three; one as the first stimulus and the other as the second. The result was that the likelihood of seeing motion was reduced, when the contour figure of more form information was used as the first stimulus and that of less form information as the second than when they were in the reverse order. This was considered as the effect of order of stimulus presentation.

Key words: stroboscopic motion, subjective contour, form information, order of stimulus presentation, stimuli combination.

Wertheimer は、仮現運動に関する古典的研究において、継時的に提示される2つの光点の間に、形は不明であるが何かしら運動が知覚されるという事実を見出し、これを ϕ 現象と呼んだ (Wertheimer, 1912; Graham, 1965). 形の明確な単一対象が、一方の位置から他方の位置へ運動するように見えるストロボ運動に対し、この ϕ 現象は“対象の形を伴なわない”という意味で“純粹”運動とも呼ばれている。このような両現象の比較を通して、ここに仮現運動と形の知覚との連関が問題になる。一般的には、ストロボ運動の知覚にとって、形態の知覚が必須なものであるか否かという問題が提出されている。そしてこれを肯定するのがゲントルト学派の人々であった (Van der Waals & Roelofs, 1930; von Schiller, 1933; Anstis, 1970). しかし、ストロボ運動における形態知覚の重要性が指摘されても、それが同一対象

の移動 (現象的同一性) という文脈に終始する限り、第1刺激と第2刺激の異同の効果は、まだ問題にならなかった。しかし近年、形態知覚が形態情報のタームで論議されるに及んで、両刺激の構成上の差異と運動対象の形ないしは運動の型との対応が問われるようになった。Kolars らは、2つの刺激図形の形が異なるとき、それらの間に観察される運動対象の形は、第1刺激から第2刺激へ変形しながら運動することを見出した (Kolars & Pomerantz, 1971; Kolars, 1972; Kolars & von Grünau, 1976; White, Wenderoth, & Curthoys, 1979). 著者ら (Ohmura & Saigo, 1982) もまた形の異なる2刺激の幾何学的変換の形式と、知覚される運動の型 (平行移動, 3次元回転, 2次元回転, 可塑的変形) との間に対応関係が存在することを明らかにした。これらの事実はいずれも、両刺激からの形態情報がストロボ