

手指および手掌における振動感覚順応¹⁾

宮岡 徹・間野 忠明

浜松医科大学

名古屋大学

Vibrotactile adaptation on the glabrous skin of the human hand

Tetsu MIYAOKA

Hamamatsu University School of Medicine

Tadaaki MANO

Nagoya University

Vibrotactile adaptation was measured on four human subjects at the middle finger and the thenar eminence of the left hand, using six sinusoidal stimuli between 10 Hz and 300 Hz. The amount of adaptation at the thenar eminence was significantly greater than that at the middle finger under all frequency conditions. On the other hand it is known in neurophysiology that the density of mechanoreceptive units increases from palm to finger tip. From the results of our study and from neurophysiological findings, it was concluded that the main factor determining the adaptation amount was the number of mechanoreceptive units which took part in psychological response, and that the greater the number of mechanoreceptive units participating in the response, the smaller the adaptation amount became.

Key words: vibrotactile adaptation, mechanoreceptive units, adaptation amount, density of units.

一定強度の刺激を長時間提示し続けたとき、その刺激に対する感覚量が次第に減少していく順応現象は、視覚をはじめとする様々な感覚モダリティで観察される。触覚、圧覚、振動覚を含む皮膚機械受容感覚においても、明瞭な順応の見られることが報告されてきた。例えば Hahn (1966) は、60Hz の順応刺激を示指先端に提示したときの振動感覚順応と順応からの回復を、閾値法とマッチング法を用いて測定し、いずれの方法によっても、順応曲線は負に加速された増加関数、回復曲線は正に加速された減少関数となることを見出した。ただし彼は、両方法間で、測定された順応量および回復曲線の時定数が異なっていたと指摘している。Gescheider &

Wright (1968, 1969) は、60Hz の順応刺激を示指先端に提示した後の順応からの回復過程を、閾値法 (1968) 及びマッチング法 (1969) により測定し、やはり正に加速された減少関数を得た。また Berglund & Berglund (1970) は、250Hz の順応刺激を中指先端に提示して、順応と順応からの回復過程を、クロスモダリティマッチングとマグニチュード産出法 (magnitude production method) の組み合わせにより測定した。その結果、彼らは、刺激の主観的大きさが刺激提示時間の関数として指数関数的に減少すること、刺激強度が大きいときは、それが小さいときに比べ、完全に順応するまでの時間が長いこと、また順応前の主観量と順応後の主観量の差は、順応刺激強度が大きいときの方が大となることなどを発見した。

1) 本研究の一部は、文部省科学研究補助金 (奨励研究 (A), No. 57710039) による。

近年、心理物理学や神経生理学の進歩により、ヒトの振動検出閾値が少なくとも2種の機械受容器メカニズムにより決定されていることが次第に明らかになってきた。Hahn (1968) は、10Hz と 200Hz の振動刺激の相互順応効果を示指で測定し、それぞれの周波数の刺激は他の周波数の刺激に対し順応効果を持たないことを示した。この結果は2種の機械受容器の存在を支持するものと、彼は考えた。また、Verrillo & Gescheider (1977), Gescheider, Frisina, & Verrillo (1979) は、選択的順応の手続きを用い、約40Hz より高周波側を受け持つパチニ型システム (Pacini system) と 40Hz 以下の周波数部分を受け持つ非パチニ型システム (non-Pacini system) を、相互に独立に順応させることが可能なことを実験的に証明した。

このように、振動感覚順応現象は様々の側面から研究されているが、皮膚の異なった部位における順応量の相違を比較検討するという問題に関する研究は、ほとんどなされていない。しかし、この問題は触によるパターン認識などにも関連して重要な意味を持つはずである。神経生理学的研究の結果によれば、例えば、手指先端と手掌とでは機械受容器の密度が異なることが知られている (Johansson & Vallbo, 1979a)。この機械受容器の密度差が、振動感覚の順応量に影響することは十分考えられる。そこで本研究では、手指先端部と母指球で振動感覚順応量を測定し、それらの順応量の異同を調べることが第一の目的とした。また、様々の周波数の振動刺激を提示し、それらの順応進行過程を系統的に調べた研究もみられないので、それを測定することも本研究の目的であった。

実 験 I

順応刺激の強度および順応量をあらわすには、振動検出閾値を 0dBSL (Sensation Level, 感覚レベル) とした dB 値を用いるのが妥当と考えられる。そのためには、順応量測定に用いる各刺激周波数、各測定部位について振動検出閾値の値を知っておく必要がある。Miyaoaka, Mano, & Fukuda (1985) は、1-50Hz の正弦波振動刺激を用い、手指、手掌、足底部において振動検出閾値を測定した。そこで、50Hz までの 0dBSL 値には、これらの値を使用することができる。しかし、刺激周波数が 50Hz を越える場合の手指および手掌における振動検出閾値については、新たに測定する必要がある。実験 I では 50-300Hz の正弦波振動刺激を左手中指先端部と左手母指球に提示し、振動検出閾値を求めた。50Hz の刺激について改めて閾値測定を行ったのは、以前の結

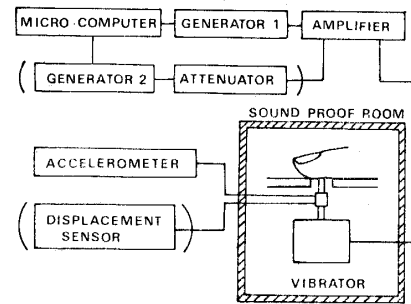


Fig. 1 Block diagram of apparatus in Experiment I. The apparatus in parentheses were also used in Experiment II.

果と比較検討するためである。

方法

被験者: 22-33歳の男子3名、女子1名が実験に参加した。いずれの被験者も、以前に心理物理学実験の経験を有していた。

装置: Fig. 1 に示すような装置を用いた。被験者は防音室に入り、椅子に腰かけて、手掌支持台に左手をのせた。手掌支持台はアクリル板製で、中央部に直径10mmの穴があけてあり、そこから接触子を突き出させて、皮膚の当該部位に振動刺激を提示した。接触子はやはりアクリル製で、先端部は直径2.5mmの円盤型の形状をしており、支持台表面から0.5mm突き出すようあらかじめ調節された。これは、皮膚への正弦波振動刺激提示を保証するためであった。接触子は加振器 (EMIC 511B) の可動部に取り付けられており、この加振器を駆動することにより、振動刺激を提示した。振動刺激の波形および振幅は、加速度計 (KYOWA DPM307A) での測定結果に基づき、計算された。刺激提示時間等の時間制御にはマイクロコンピュータを用いた。

実験手続き: 被験者の左手中指先端または左手母指球に正弦波振動刺激を提示し、極限法により振動検出閾値を測定した。1/3オクターブフィルタを通過させた50, 100, 200, 300Hzの4種の正弦波刺激のそれぞれにつき、上昇系列2回、下降系列2回、計4回の測定を行った。いずれの系列内においても、振動刺激の強度は1dBステップ単位で変化させた。各系列内における各刺激の提示時間は3秒、刺激間隔は4秒とし、各刺激提示の1秒前に、LEDにより刺激提示を被験者に合図した。

結果

各被験者の測定結果は、いずれも同様の傾向となったので、左手中指先端、左手母指球のそれぞれについて被験者の閾値を幾何平均した値を Fig. 2 に示す。図中の白丸は中指先端、白四角は母指球の閾値である。また、

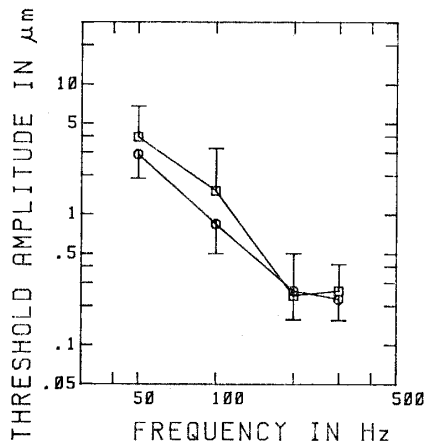


Fig. 2 Vibrotactile thresholds obtained by the method of limits. Empty circles are the thresholds at the middle finger, and empty squares are the thresholds at the thenar eminence of the left hand. The vertical line at each point shows the standard deviation of four subjects' data.

図中の縦棒は標準偏差をあらわす。各刺激周波数ごとに母指球と中指先端の閾値を比較すると、すべての周波数について、*t* 検定で有意差はみられなかった。

中指先端および母指球の閾値曲線パターンを比較すると、両者はほぼ同一の形状を示していた。即ち、振動刺激の周波数が50Hz から 200Hz までは、振動検出閾値の振幅は両対数グラフ上でほぼ直線的に減少し、200Hz 以上では、その減少が頭打ちとなった。50-200Hz のデータにベキ関数をあてはめると、そのベキ指数は中指先端で-1.74、母指球で-1.97となり、ほぼ-2に近い値であった。

考察

実験 I で得られた中指先端と母指球の閾値曲線は同一のパターンを示したが、これらはまた、従来の研究で得られた 50Hz 以上の振動検出閾値曲線のパターンとよく似ていた (Gescheider, 1976; Goff, 1967; Mountcastle, LaMotte, & Carli, 1972; Verrillo, 1962, 1963)。諸実験の実験条件が相互に相違しているにもかかわらず、同一の閾値曲線が得られる背後には、それらの閾値曲線をもたらす一定の神経生理学的メカニズムがあると考えられる。

最近の神経生理学的研究によれば、皮膚に与えられた触、圧、振動などの機械的刺激に反応する大径有髄の受容単位 (receptive unit)——第一次求心線維とその末梢側の機械受容器を合わせたものを、このように呼ぶ——は 4 種類であるとされている (間野・宮岡, 1982; 宮岡・間野, 1985; Vallbo & Johansson, 1984)。即ち、機械

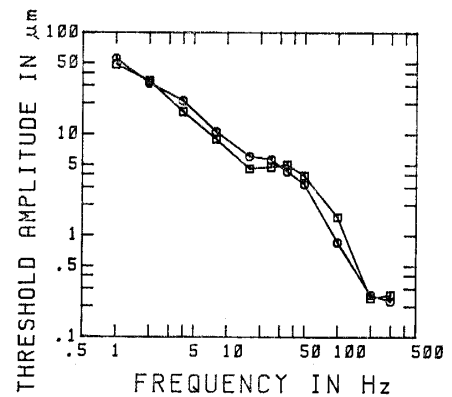


Fig. 3 Vibrotactile threshold curves based on Experiment I and the previous experiment on the glabrous skin of humans (Miyaoaka et al., 1985). Empty circles are the thresholds at the middle finger, and empty squares are the thresholds at the thenar eminence.

的刺激の速度に対して神経発射する速順応単位 (rapidly adapting unit, RA)、機械的刺激の加速度に反応するパチニ型単位 (Pacini corpuscle unit, PC)、機械的刺激の速度および変位に反応する遅順応 I 型単位 (slowly adapting type I unit, SAI)、主に刺激の変位量に反応する遅順応 II 型単位 (slowly adapting type II unit, SAII) である。このうち RA と PC は神経発射閾値が特に低く、ごく弱い刺激にも反応する (Johansson & Vallbo, 1979b)。この 2 者に正弦波振動刺激を与えると、両対数グラフ上で、RA は 20-50Hz 付近に最低閾値を持つ U 字型の閾値曲線を、PC は 250Hz 付近に最低閾値を持つ V 字型の閾値曲線を示し (Mountcastle et al., 1972)、最低閾値の絶対値は PC の方が小さい。結局、約 40Hz 以下では RA が、それ以上の周波数では PC が最も敏感な機械受容単位となっている。

Miyaoaka et al. (1985) の 50Hz の振動検出閾値と実験 I の 50Hz の閾値の間に有意差はなかったため、両者の結果を中指先端と母指球についてそれぞれ平均し、刺激周波数 1Hz から 300Hz までの振動検出閾値曲線をまとめて示すと、Fig. 3 のようになる。この図の白丸は中指先端、白四角は母指球の閾値曲線である。両対数グラフ上でこれらの閾値曲線のパターンを見ると、刺激周波数が 1Hz から 16Hz までは、振動検出閾値は減少し続け、16Hz 以上で一度平坦となり、35Hz 以上で再び減少する形を示す。これらは、Mountcastle et al. (1972) が見出した RA と PC の閾値曲線の下縁部と重なっている。

1-16Hz の範囲の振動閾値曲線の勾配は、両対数グラフ上で -1 付近にあり (中指先端で -0.8、母指球で

-0.9), 50-200Hz では, 上記のごとく閾値曲線の勾配は-2に近い値となっていた. 振動刺激の検出が刺激の速度に依存し, 振動速度が一定値を越えたとき振動検出がなされるなら, 振動検出閾値曲線の勾配は, 両対数グラフ上で-1となるはずである. また, 振動刺激検出が刺激の加速度に依存しているなら, 振動検出閾値曲線の勾配は-2となるはずである. RA の神経発射閾値曲線と重なる部分の振動検出閾値曲線の勾配が -1 で, RA が刺激速度に反応する受容単位であること, PC の神経発射閾値曲線と重なる部分の振動検出閾値曲線の勾配が -2 で, PC が刺激の加速度に反応する受容単位であることを考慮すると, ヒトの心理物理学的に測定された振動検出閾値曲線は RA と PC によって決定されていると推測される.

実験 II

Fig. 3 に示したように, 中指先端と母指球の振動検出閾値振幅の間には有意差はなかった. 他方, 微小電極を用いた神経生理学的実験の結果では, 手指と手掌の機械受容単位密度の間に大きな差のみられることが明らかにされている (Johansson & Vallbo, 1979a). おそらく振動検出閾値レベルでは, 一個ないし数個の機械受容単位の神経発射により刺激検出が行われているため, 機械受容単位の密度差の影響がみられなかったものと考えられる.

実験 II では, 振動感覚順応量を振動検出閾値振幅の変化としてとらえることを試みた. この場合, 各機械受容単位の密度などが検出閾値量に影響を与え, その結果手指と手掌で順応量が異なることも考えられた. そこで実験 II では, 中指先端部と母指球で振動感覚順応量を測定し, 両者の間に差がみられるかどうか注目した. また実験 I で明らかにされたように, 振動検出閾値曲線は約 40 Hz 付近を境として2つの部分に分かれ, それぞれ関与する受容単位の種類が異なっていると推測される. 振動感覚順応現象においても, 刺激周波数が異なると順応パターンに差がみられるという現象が存在するかどうか調べることも, 実験 II の目的であった.

方法

被験者: 心理実験の経験を有する22-33歳の男性3名, 女性1名, 計4名が実験に参加した.

装置: 装置のブロックダイアグラムは Fig. 1 に示した通りである. 発振器1で正弦波状の順応刺激を発生させ, 加振器を駆動することにより, 被験者の手掌部に振動刺激を提示した. 順応量は発振器2で発生させた正弦波状のテスト刺激により測定した. 刺激振幅は, 周波数

が100Hz未満の場合は非接触変位計により測定し, 周波数が100Hz以上の場合は加速度計で測定した値を積分して用いた. 実験中, 被験者は防音室内で椅子に腰かけ, 手掌支持台に左手をのせた. 支持台の構造は実験 I と同一であり, 直径2.5mmの接触子により皮膚の当該部分を刺激した. なお, 正弦波刺激の提示を保証するため, 接触子はあらかじめ皮膚に1mmくいこむように——即ち, 手掌支持台の表面から1mm突き出すように——調節された.

実験手続き: 振動感覚順応の測定部位は, a) 左手中指先端と, b) 左手母指球とした. 以前に行った研究および実験 I から, いずれの周波数についても中指先端の振動検出閾値と母指球の振動検出閾値の間に有意差のないことが明らかとなっているので, 各周波数ごとに両者を幾何平均した値を 0dBSL とした. このときいずれの周波数条件においても, 順応刺激の振幅には20dBSL を採用した.

順応量測定実験に際しては, 皮膚の当該部位に正弦波の振動刺激を与え, 順応量をテスト刺激の閾値変化として測定した. 従来の振動感覚順応実験の結果から, 振動感覚順応曲線は負に加速された関数となることが予測されたので, 順応刺激を $T_n = T_0 + \sum_{i=1}^n 2^{i-1}$ 秒 ($T_0 = 10s$, $n = 1, 2, \dots$) と与えるごとに, 皮膚上の同一部位に順応刺激と同一周波数のテスト刺激を提示して, 順応量を測定した (Fig. 4). テスト刺激は, 刺激提示時間, 刺激間隔が共に500msの断続刺激とし, 1秒1dBステップでその振幅を増大方向に変化させた. 被験者がテスト刺激を検出すると直ちに, Fig. 4 に示すごとく, 再度順応刺激が提示された. テスト刺激提示時には, テスト刺激の on-off にあわせて発光ダイオードを点滅させ, テスト刺激が提示されていることを被験者に知らせた. 中指先端, 母指球とも, 提示する刺激の周波数は10, 25, 50, 100, 200, 300Hzの6種とし, 50Hz以下の刺激は50Hzローパスフィルタを, 100Hz以上の刺激は1/3オクターブフィルタを通過させて用いた. いずれの被験者も, 各周波数についてそれぞれ4回の試行を行った. 各

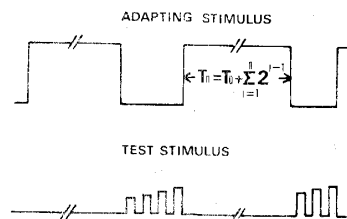


Fig. 4 Timing relationships of adapting stimulus and test stimulus.

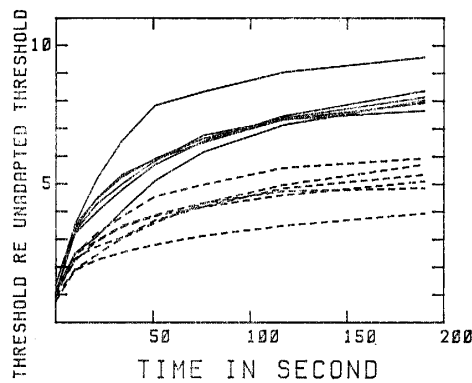


Fig. 5 Courses of vibrotactile adaptation. Amplitude of adapting stimulus was 20dBSL. Stimulus frequencies were 10, 25, 50, 100, 200, and 300Hz. Solid lines show the adaptation courses measured at the thenar eminence. Dotted lines show the adaptation courses measured at the middle finger.

試行の間には5分間以上の休憩をおき、順応から回復させるようにした。また、振動刺激が聴覚的に検知されるのを防ぐために、マスク音をスピーカで提示した。

結果

中指先端で得られた結果と母指球で得られた結果をそれぞれの部位ごとにみると、いずれの刺激周波数についても、被験者の順応パターンの個人差は少なかった。そこで、両部位のそれぞれについて、各周波数ごとに個人結果を幾何平均して求めた順応曲線を Fig. 5 に示す。Fig. 5 の縦軸では、いずれの周波数条件の場合も、Fig. 3 の中指と母指球の閾値を幾何平均した値を1、順応刺激振幅 (20dBSL) を10とした相対値が用いられている。図中の点線は中指先端で測定された順応曲線であり、実線は母指球で測定された順応曲線である。両部位における順応量を比較してみると、提示された順応刺激の振幅は中指先端と母指球で同一であるにもかかわらず、いずれの周波数においても、順応刺激提示開始後190秒経過した時点での順応量は、母指球の方が中指先端におけるより大きくなり、両者の間には明らかな有意差があった ($t(10)=7.81$, $p<.001$)。また順応曲線は、いずれの部位、いずれの周波数で測定されたものも負に加速された増加関数となり、上に凸のパターンを示していた。

考察

上に述べたごとく、順応曲線は負に加速された増加関数のパターンとなった。これについて、順応速度が、順応開始後の時点 t における振動検出閾値 $A(t)$ と順応最大時の振動検出閾値 A_{max} の差に比例すると考えると、

$$\frac{dA(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} \{A_{max} - A(t)\} \quad (1)$$

となる。よって

$$A(t) = A(0) + \{A_{max} - A(0)\} \left\{1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right\} \quad (2)$$

が得られる。ただし $A(0)$ は順応前の閾値、 τ は時定数である。(2)式は、Berglund & Berglund (1970) により順応量を表わす式として提出されたものと同様の形式となっている。(2)式の順応曲線の形状は、2つのパラメータ $A_{max} - A(0)$ と τ により決定される。Fig. 5 に示した中指と母指球で得られた順応曲線に SALS (statistical analysis with least squares fitting; 中川・小柳, 1982; Oyanagi & Nakagawa, 1981) を用いて (2) 式をあてはめると、いずれの順応曲線にもよくあてはまった。そのときの $A_{max} - A(0)$ と τ の推定値を Table 1 に示す。中指と母指球を比較すると、すべての周波数条件について、 $A_{max} - A(0)$ の値が両者の間で大きく異なっているのがわかる。また50Hz付近を境として、刺激周波数が高いときは、それが低い場合に比べ、時定数 τ が大きくなる傾向が見られた。このことは、刺激周波数が高い場合の方が順応がゆっくり進行することを示している (Fig. 6)。

同一振幅の順応刺激を提示したとき、中指と母指球で順応量が異なっている原因としてまず考えられるのは、両部位における機械受容単位の密度差である。Johansson & Vailbo (1979a) は、手指先端部の機械受容単位密度の方が手掌におけるそれよりも高く、特に RA ではその比が4倍に達することを見出した。両部位における機械受容単位の密度差については宮岡・間野 (1983) も確認している。

このような条件下で、例えばつぎのような仮説が可能であろう。即ち、順応前は、振動刺激に対する各機械受容単位の神経発射閾値は相互にかなり異なっており、そ

Table 1. Parameters estimated using SALS.

	$A(0)$	A_{max}	$\frac{A_{max}-A(0)}{A(0)}$	τ
middle finger				
10Hz	1.25	5.87	4.62	4.09E01
25Hz	1.25	4.89	3.64	3.88E01
50Hz	1.14	4.77	3.63	3.21E01
100Hz	1.02	3.78	2.76	4.39E01
200Hz	1.29	5.40	4.11	5.74E01
300Hz	1.13	5.99	4.86	7.10E01
thenar eminence				
10Hz	1.04	9.33	8.29	3.07E01
25Hz	1.22	7.38	6.16	3.06E01
50Hz	1.37	7.75	6.38	3.87E01
100Hz	1.72	7.86	6.14	4.03E01
200Hz	1.43	8.28	6.85	5.03E01
300Hz	1.06	8.38	7.32	6.47E01

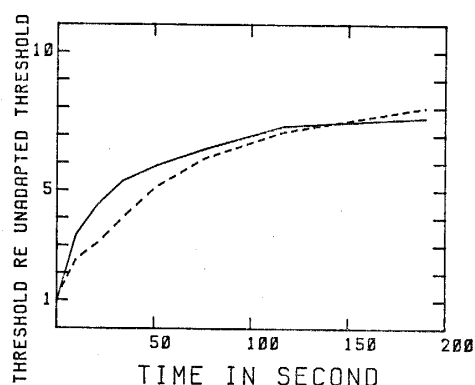


Fig. 6 The comparison of adaptation courses when stimulus frequencies are 25Hz and 300Hz. The solid line shows the adaptation courses of 25Hz and the dotted line shows that of 300Hz measured at the thenar eminence.

これらのうち感度のよい数個以内の受容単位が神経発射することで、振動刺激の存在が心理的に検出される。このとき手指先端部と母指球の間で、振動検出閾値にあまり差はみられない。これに対し、順応が進行した時点においては、閾値の低い機械受容単位の順応量は大きく、閾値の高い機械受容単位の順応量は小さく、各受容単位の神経発射閾値の分散が減少する。この場合、あるレベル（順応時の振動検出閾値付近）で、かなりの数の機械受容単位が一斉に神経発射するようになる。しかも順応が進行した時点では、振動刺激に対する神経発射は不規則となり、刺激1周期に1パルスという状態には達しにくい。中枢では、これらの神経発射情報を加算し、それが一定の基準を超えると振動刺激を知覚するのだと推測される。この場合は、振動検出に關与する機械受容単位の数が振動検出閾値を決定する。手指先端部と母指球では機械受容単位の密度が異なるため、同じ面積の接触子を用いたときには、両部位における振動検出閾値が異なってくるものと考えられる。心理応答に關与する機械受容単位の数が順応量を決定するという仮説の当否については、皮膚の同一部位で、互いに大きさの異なった接触子を用いて順応下の振動検出閾値を測定し、それらの値の高低を比較する実験を行うことにより、確かめることが出来よう。

また実験IIでは、刺激周波数により順応時定数が異なり、周波数が高い方が時定数が大となる結果が得られた。機械受容単位の種類と順応速度との間になんらかの關係があるとも考えられるが、順応が進行した時点で振動検出に關与する機械受容単位の種類を同定するのは難しく、明確な原因は不明である。

要 約

10—300Hzの正弦波振動刺激を、4人の被験者の左中指先端部と左母指球に提示し、振動感覚順応量を振動検出閾値の変化として測定した。その結果、提示したすべての周波数について、中指と母指球の順応量は有意に異なっており、母指球の方が大きかった。神経生理学の知見によれば、手指先端部の機械受容単位密度は母指球の密度の数倍に達する。本研究における両部位の順応量の差は、この機械受容単位の密度差に起因するものと推測された。

引用文献

- Berglund, U., & Berglund, B. 1970 Adaptation and recovery in vibrotactile perception. *Perceptual and Motor Skills*, 30, 843-853.
- Gescheider, G. A. 1976 Evidence in support of the duplex theory of mechanoreception. *Sensory Processes*, 1, 68-76.
- Gescheider, G. A., Frisina, R. D., & Verrillo, R. T. 1979 Selective adaptation of vibrotactile thresholds. *Sensory Processes*, 3, 37-48.
- Gescheider, G. A., & Wright, J. H. 1968 Effects of sensory adaptation on the form of the psychophysical magnitude function for cutaneous vibration. *Journal of Experimental Psychology*, 77, 308-313.
- Gescheider, G. A., & Wright, J. H. 1969 Effects of vibrotactile adaptation on the perception of stimuli of varied intensity. *Journal of Experimental Psychology*, 81, 449-453.
- Goff, G. D. 1967 Differential discrimination of frequency of cutaneous mechanical vibration. *Journal of Experimental Psychology*, 74, 294-299.
- Hahn, J. F. 1966 Vibrotactile adaptation and recovery measured by two methods. *Journal of Experimental Psychology*, 71, 655-658.
- Hahn, J. F. 1968 Low-frequency vibrotactile adaptation. *Journal of Experimental Psychology*, 78, 655-659.
- Johansson, R. S., & Vallbo, Å. B. 1979a 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.
- Johansson, R. S., & Vallbo, Å. B. 1979b Detection of tactile stimuli. Thresholds of afferent units related to psychophysical thresholds in the human hand. *Journal of Physiology*, 297, 405-422.
- 間野忠明・宮岡 徹 1982 単一神経線維の生理 神経研究の進歩, 26, 248-257.
- 宮岡 徹・間野忠明 1983 皮膚振動感覚順応 バイオメカニズム学術講演会論文集, 4, 149-152.
- 宮岡 徹・間野忠明 1985 生体の触覚 応用物理, 54,

- 368-372.
- Miyaoka, T., Mano, T., & Fukuda, H. 1985 Threshold curves and equal-sensation contours for low frequency vibrotactile stimuli on the human glabrous skin. *Japanese Psychological Research*, **27**, 145-153.
- 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**, 122-136.
- 中川 徹・小柳義夫 1982 最小二乗法による実験データ解析 東京大学出版会
- Oyanagi, Y., & Nakagawa, T. 1981 *SALS user's manual (version 2.5)*. University of Tokyo Computer Centre.
- Vallbo, Å. B., & Johansson, R. S. 1984 Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation. *Human Neurobiology*, **3**, 3-14.
- Verrillo, R. T. 1962 Investigation of some parameters of the cutaneous threshold for vibration. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **34**, 1768-1773.
- 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. 1977 Effect of prior stimulation on vibrotactile thresholds. *Sensory Processes*, **1**, 292-300.

—1986. 9. 1 受稿—