振動負荷による手指尖振動感覚閾値の変化と 負荷振動の物理的パラメーターとの関係

第2報 振動感覚の等 TTS 曲線と許容基準について

Studies on the Changes in the Vibratory Sensation Threshold at the Fingertip
in Relation to Some Physical Parameters of Exposed Vibration
Part 2. A study on the equal TTS curves of the vibratory sensation and the
hygienic allowable limit of portable mechanized tool

名古屋大学医学部衛生学教室

原 田 規 章*

Noriaki Harada*

Department of Hygiene, Nagoya University School of Medicine, Nagoya

The following experiment of vibration exposure was performed with a similar method on the basis of the result of the preliminary study in Part 1. The purpose of this study is to clarify in detail the relationship between the temporary threshold shift (=TTS) of vibratory sensation and the frequency and severity of exposed vibration.

In this case, six subjects, all healthy students, were exposed to localized vibration, which frequencies and levels of acceleration referred to exposure boundary of ISO (1973) (Table 1).

In this paper, vibratory sensation threshold was expressed with peak value of acceleration and exposed vibration with peak value of acceleration, velocity or amplitude.

The result was as follows:

1. TTS of vibratory sensation, immediately after vibration exposure of equal velocity level, showed maximum values at 250 Hz exposure and smooth curves from 8 Hz to 1,000 Hz exposure. On the vibration exposure of the same frequency, the greater the intensity of vibration was, the greater TTS of vibratory sensation was (Fig. 1).
2. On the unexposed side, some TTS of 125 Hz and 250 Hz vibratory sensation were statistically significant (Fig. 2).
3. The changes of skin temperature owing to vibration exposure showed similar pattern on the exposed side and the unexposed side. So fine were the changes that they were not significant immediately after vibration exposure but significant 6 min. after, by the analysis of variance on the both sides (Fig. 1-4, 2-4, 3-4, 4-4). And it was considered that the effect of the skin temperature on the vibratory sensation threshold was negligible, because the average values of skin temperature ranged from 30°C to 35°C.
4. The prediction equations for TTS of vibratory sensation are shown in (Table 2, Fig. 5). The values of TTS of vibratory sensation measured in Part 1 were in reasonably good agreement with the predicted values by these equations (Fig. 6). Therefore, it was considered that these prediction equations have similarity under the condition of this experiment.
5. Equal TTS curves were compared with exposure boundary of ISO (1973) (Fig. 5-2, Fig. 7).

*(現在) 山口大学医学部衛生学教室

*(Present) Department of Hygiene, Yamaguchi University School of Medicine, Ube

As the result, both characteristic curves were similar to each other at the frequencies from 63 Hz to 500 Hz, while different at the higher and lower frequencies. About this difference, it was discussed that Pacinian corpuscle, which is conceivable to be the receptor of vibratory sensation threshold measured in this experiment, has less sensitivity in these lower frequencies and that there would be room for further study in exposure boundary of ISO in that higher frequencies.

And it was considered that 30 min. level of exposure boundary of ISO was equivalent to TTS of 12.5-15 dB on the 63 Hz vibratory sensation, 17.5-22.5 dB on the 125 Hz and 22.5-27.5 dB on the 250 Hz. Eight-hour level of exposure boundary of ISO was equivalent to TTS of 5 dB, 7.5 dB and 10-12.5 dB, respectively.

緒 言

第1報では人体に対する短時間の振動負荷実験の方法について、三つの周波数の振動負荷条件下で基礎的な検討をおこなった。その結果、第1報に示した実験方法は振動負荷が指尖振動感覚閾値に与える影響を観察する方法として満足できるものと考えられた。

そこで、負荷振動の大きさおよび負荷周波数と振動感覚との関係をさらに詳細に検討する目的で、同様な条件のもとに、より広い周波数範囲で、振動加速度を異にする振動負荷をおこなうことにした。

これまでなされた同様な実験についてみると、Bjerkera¹⁾は 50 Hz から 800 Hz の正弦波振動を手指に負荷し、50~800 Hz の範囲で 5 試験周波数の振動感覚閾値を測定し、負荷周波数、負荷振動加速度と振動感覚の TTS (Temporary Threshold Shift, 一時的閾値変動) との関連を検討している。富永²⁾は、40 Hz から 320 Hz の範囲の振動を指尖に負荷し振動感覚 TTS の変化を検討している。Radzyukevich³⁾は 16 Hz から 250 Hz の範囲の振動を負荷し、負荷時間と負荷振動速度を変化させて振動感覚 TTS を検討している。一方、Streeter⁴⁾はハンドルを握らせた状態で 30 Hz から 480 Hz の振動を負荷し、振動の大きさと握り力を変化させて触感覚の TTS を検討している。Reynolds⁵⁾はハンドルを握らせた状態で振動を負荷し、手指の組織における振動エネルギーの吸収の周波数特性を調べている。

これらの報告から、①振動感覚 TTS の回復は時間の対数値に比例すること、②振動感覚 TTS は負荷周波数、負荷振動の大きさ、負荷時間、測定した振動感覚の試験周波数により差がみられること、③触感覚 TTS でも振動感覚 TTS と同様に、負荷周波数、負荷振動の大きさにより差がみられるが、握り力の大きさによる差は小さいこと、④ハンドルを握った状態での振動負荷による振動の伝播は、低周波域では上腕から上半身にまでおよぶが、70 Hz から 150 Hz までの中周波域の振動では手お

よび指、150 Hz 以上の高周波域の振動では指までにしか伝播しないと推定され、また、周波数の高い振動ほど手指組織内での振動エネルギーの吸収が大きいこと、が明らかになってきた。

しかし、これらの研究は、負荷振動の周波数範囲が限られていること、負荷振動エネルギーが望ましい局所振動許容基準のレベルに対して大きすぎること、振動負荷後の振動感覚閾値測定に長い時間を要していること、等の実験条件設定上の限界があることのために、局所振動負荷による人体の生理的反応を明らかにし、産業現場で実際に使用されている手持動力工具の振動の範囲やエネルギーの大きさの衛生的な意義を評価する根拠としては不十分である。ISO(the International Standards Organization)の「手に伝えられる振動の暴露基準^{6),7)}が長年討議されながら、自覚的な苦痛をもとにした等感度曲線を根拠としており、客観的な生理機能変動の成績を根拠としていない⁸⁾理由はここにあると思われる。

そこで、著者は局所振動負荷による人体の生理的反応の特性を明らかにし、生理学的根拠を持った許容基準を検討する基礎的資料を得る目的で、振動感覚閾値を指標とし、把持力の無い状態での局所振動負荷実験を計画した。このさい、前報では、異なる周波数の負荷振動の大きさを加速度を等しくして設定したが、本実験では、前報の結果を考慮して速度を等しくして設定した。その結果について報告する。

なお、本論文では、振動感覚閾値、負荷振動の大きさは、特にことわりのないかぎり、振動加速度(peak 値)で示した。また、振動速度、振幅で示した場合も peak 値表示である。

実験方法

被験者は前報とは異なる学生 6 名であり、20~21歳の全員健康な男性である。被験者は 2 群にわけ、3 名を 1 単位として同時に振動負荷をおこなった。

使用した加振装置、振動板、振動負荷の姿勢、耳栓の

着用, 手指屈伸および足踏み運動のとり入れ, については前報と同じである。

振動感覚閾値については, 3名の被験者を同時に実験するための時間的制約から, 振動負荷前, 直後, 6分後の3回, 左右第Ⅲ指尖の値を測定することにした。測定には前報と同じ振動覚計を使用し, 測定順序も前報と同様, 振動負荷側 125, 250, 63 Hz, 振動非負荷側 125, 250, 63 Hz の順とした。その結果, 各振動感覚閾値の測定時間は, 測定開始後, それぞれ, 6秒, 12秒, 18秒, 26秒, 32秒, 38秒前後となり, 異なる試験周波数間に若干のずれがある。

皮膚温については, 前報同様, 左右第Ⅲ指中節背側において, 自動皮膚温記録器を使用して実験中30秒毎に記録した。

負荷振動は正弦波とし, 各被験者の右手に負荷した。その振動周波数および振動加速度は ISO の暴露基準⁶⁾ (1973) にそって設定したが, 前報の成績に示されたように, 等しい振動加速度であっても低周波振動ほど振動感覚閾値に対して与える影響が大であることを特に考慮した。

すなわち, 負荷振動周波数として, 8, 16, 31.5, 63, 125, 250, 500, 1,000 Hz の8周波数を選び, 負荷振動加速度は, ISO 基準 (1973) の30分暴露値, 8時間暴露値, および, その中間値 (8時間暴露値+10 dB) を peak 値に換算して端数を整理した値を選んだ。ただし, 1,000 Hz 30分暴露値では振動加速度が 48 g と大きく, 加振のさい発生する騒音が大きくなるため負荷条件から省いた。また, ISO 基準は, 16~1,000 Hz まで等速度, 8~16 Hz が等加速度で設定されているため, 今回の実験では, 8 Hz 振動負荷については ISO 基準 (1973) の30分暴露値および他の負荷振動周波数と等しい速度の3振動加速度値の合計4つのレベルを設定した。

このようにして設定された振動負荷条件は24通りとなる。そして, 対照として振動板上に手を載せるのみで振動を負荷しない条件を加えた, 合計25条件を実験条件として Table 1 に示した。Table 1 をみると, これらの振動周波数, 加速度を組み合わせた24通りの条件は, 周波数と速度の系列としてみた場合, 0.74, 2.35, 7.43 cm/s の3系列にまとめられることがわかる。

前報と同様, 一連続振動負荷時間は5分間, 振動負荷の間隔は15分間とした。振動負荷を3回くり返したあとには, 40分間以上の休憩時間をとった。この条件で実験を実施すれば, くり返し暴露による振動感覚閾値変動への蓄積効果は小さいことが, 前報の成績から推定される。

Table 1 Frequency and acceleration of exposed vibration

Frequency	Acceleration of exposed vibration			
8 Hz	0.0375	0.12	0.375	0.75 g
16	0.075	0.24	0.75	
31.5	0.15	0.47	1.5	
63	0.3	0.95	3.0	
125	0.6	1.9	6.0	
250	1.2	3.8	12.0	
500	2.4	7.6	24.0	
1,000	4.8	15.2		
Control	(—)			
Velocity	0.74	2.35	7.43	cm/s

represented by peak value

0.74 cm/s and 7.43 cm/s are equivalent to 30 min./day and 8 h./day value of exposure boundary reported by ISO, 1973, respectively, except 8 Hz.

Table 1 に示した25通りの実験条件を乱数表によりランダムな順に配列し, その順で実験をおこなった。実験は被験者3名の群に対しては同一日に, 同一の負荷順序でおこなった。各被験者について, この25通りの実験条件を異なる実験順序で3回くり返した。したがって, 被験者一人あたりの実験回数は75回となる。また, 同一被験者についての実験は少なくとも, 6日の間隔をあけて実施した。

実験は春季に実施し, 室温は20~25℃に維持した。

結 果

負荷後の振動感覚閾値, 皮膚温の変化は, 前報と同じく前値との差, すなわち, 一過性の変動値で示すことにした。そして, この振動感覚 TTS および皮膚温の変動値は, 各被験者における3回暴露の平均値を算出し, さらに6被験者の平均と標準誤差を算出して示した。

Fig. 1-1, 1-2, 1-3, 1-4 にはそれぞれ, 負荷側における負荷直後の 125 Hz, 250 Hz, 63 Hz の各振動感覚 TTS と皮膚温の変動を示した。同様に, Fig. 2-1, 2-2, 2-3, 2-4 には非負荷側における負荷直後の各変動, Fig. 3-1, 3-2, 3-3, 3-4 には負荷側における負荷6分後の各変動, Fig. 4-1, 4-2, 4-3, 4-4 には非負荷側における負荷6分後の各変動を示した。

これらの Fig. 1~4 では, 特に, 等しい速度の振動負荷での変動値を線で結んで示した。これは, ISO の暴露基準にもとづいて設定した今回の実験の振動負荷条件は, Table 1 に示したように, 3つの等速度の系列で示すこ

Fig. 1 TTS of vibratory sensation and change of skin temperature of the right middle finger (exposed side) immediately after 5 min. vibration exposure

Fig. 2 TTS of vibratory sensation and change of skin temperature of the left middle finger (unexposed side) immediately after 5 min. vibration exposure

Fig. 3 TTS of vibratory sensation and change of skin temperature of the right middle finger (exposed side) 6 min. after 5 min. vibration exposure

Fig. 4 TTS of vibratory sensation and change of skin temperature of the left middle finger (unexposed side) 6 min. after 5 min. vibration exposure

とができるからであり、実験結果と ISO の暴露基準を直接比較できる点で意義がある。

1. 振動負荷側での変化

i) 振動負荷直後の振動感覚閾値の変化

Fig. 1-1, 1-2, 1-3 において、等速度の振動負荷における振動感覚 TTS は、7.43 cm/s の速度で 31.5 Hz の振動を負荷した場合にやや突出する傾向があるものの、ほぼ滑らかな曲線を描く。この曲線は、125 Hz, 250 Hz, 63 Hz の各振動感覚 TTS と、負荷振動周波数 250 Hz の場合を最高値とし両側にゆるやかに下降してゆく型をとっており、等速度においては 250 Hz の振動負荷が振動感覚閾値に最も大きい影響を与えたことがわかる。また、同一周波数の振動負荷では速度が大きいほど振動感覚閾値に大きな影響を与えている。

ii) 振動負荷後の振動感覚閾値の回復の経過

振動負荷 6 分後の負荷側の振動感覚 TTS について示した Fig. 3-1, 3-2, 3-3 では、振動感覚 TTS はかなり回復している。しかし、そのなかでも 250 Hz 振動感覚では 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz の各振動負荷の場合にかなり大きな TTS が残っている。

iii) 手指皮膚温の変化

負荷直後の皮膚温の変動を示した Fig. 1-4 では、変動値の分散が大きく、対照との間に有意差は認められない。しかし、負荷 6 分後を示した Fig. 3-4 では、250 Hz と 500 Hz 負荷で有意な変動がみられ、分散分析においても負荷振動の周波数要因は有意であった ($p < 0.05$)。

Fig. 1-4 と Fig. 3-4 は類似したパターンを示しており、これらを総合すると、振動負荷側における皮膚温低下には、16 Hz ないしは 31.5 Hz の振動負荷と 250 Hz 前後の振動負荷における 2 峰性のピークがみられるようである。

2. 振動非負荷側での変化

振動負荷が神経中枢を介して他側に影響を及ぼすか否かをみるために、非負荷側について検討してみた。

i) 振動感覚閾値の変化

非負荷側の負荷直後の振動感覚 TTS について示した Fig. 2-1, 2-2, 2-3 では、63 Hz の振動感覚 TTS では対照との間に有意差は認められないが、125 Hz と 250 Hz の各振動感覚 TTS では一部に有意差が認められる。

非負荷側の負荷 6 分後の振動感覚 TTS を示した Fig. 4-1, 4-2, 4-3 では、特に特徴的な傾向を認めない。

ii) 手指皮膚温の変化

非負荷側の負荷直後の皮膚温の変動を示した Fig. 2-4 では、負荷側の皮膚温変動を示した Fig. 1-4 と数似し

たパターンを示すが、前値からの変動の程度が小さく、対照との間に有意差がみられない。

非負荷側の負荷 6 分後の皮膚温の変動を示した Fig. 4-4 では、250 Hz 負荷で有意な変動がみられ、また、分散分析でも周波数要因は有意であり ($p < 0.05$)、負荷側の皮膚温変動を示した Fig. 3-4 に類似したパターンを示している。

3. 振動感覚 TTS 予測式による振動パラメータの意義の検討

負荷振動の振動感覚閾値に与える影響の周波数特性を明らかにするため、負荷振動周波数と負荷振動の大きさに関する負荷直後の振動感覚 TTS の予測式を作製し、図示した。

すなわち、数学的モデルとして、

$$z = a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4y + a_5y^2 + a_6y^3 + a_7xy + a_8x^2y + a_9xy^2 + a_{10}$$

z : 負荷直後の振動感覚 TTS 値

x : 負荷振動周波数の常用対数値

y : 負荷振動の大きさの常用対数値

を仮定し、stepwise 方式で各回帰係数 ($a_1 \sim a_9$) と回帰定数 (a_{10}) の値の推定および有意性の検定をおこなった (重回帰分析)。

このさい、振動の大きさの指標として、加速度、速度、振幅のうち、どのパラメータがすぐれているかを検討した。その結果、振動の大きさの指標として振幅を採用した場合、 x と y との交互作用も少なく次元も低い、最も単純な形の回帰式を得られること、寄与率 (R^2) は 0.9 以上であり、加速度や速度を指標とした場合と大差なく、回収率は非常によいことがわかった。そこで、振動感覚 TTS 値の予測式として、周波数と振幅で推定された式を採用することにした。

各試験周波数の振動感覚 TTS 予測式を Table 2 に示し、等 TTS のレベルを、負荷振動の、周波数と加速度、周波数と速度、周波数と振幅、の 3 通りの方式で Fig. 5-1, 5-2, 5-3 に示した。

Fig. 5 では、各試験周波数について、それぞれ 3 つの振動感覚 TTS 値を設定して等 TTS 曲線を示した。これらの振動感覚 TTS 値は、各試験周波数でほぼ等値の振動負荷の大きさであること、図表上できるだけ多数点が得られ、しかも、予測式上矛盾のない数値であることを基準として設定した。これらの曲線は、等しい振動感覚 TTS を生じる振動負荷条件を示すもの (等 TTS 曲線) と考えられ、各試験周波数で非常に類似したパターンを示す点が注目される。

Table 2 Regression equation for TTS of vibratory sensation of right middle fingertip immediately after 5 min. vibration exposure

125 Hz TTS	
$z=31.38x+7.45y+1.30x^2+7.00xy+4.58y^2-1.00xy^2-18.68$ ($R^2=0.90$)	
250 Hz TTS	
$z=42.18x+5.80y+1.43x^2+9.85xy+4.65y^2-0.95xy^2-28.05$ ($R^2=0.91$)	
63 Hz TTS	
$z=28.98x+0.28y-1.38x^2+5.58xy+0.43y^2-0.08y^3-19.50$ ($R^2=0.94$)	
z: predicted value (dB)	
x: logarithmic value of exposed vibration frequency ($\log_{10}$ (Hz))	
y: logarithmic value of exposed vibration amplitude ($\log_{10}$ (cm))

[5-1] The ordinate is amplitude of the exposed vibration

[5-2] The ordinate is acceleration of the exposed vibration

[5-3] The ordinate is velocity of the exposed vibration

Fig. 5 Equal TTS curves of vibratory sensation of fingertip for 5 min. vibration exposure on the hand

- [5-1]: relationship of the exposed vibration amplitude and frequency
[5-2]: relationship of the exposed vibration acceleration and frequency
[5-3]: relationship of the exposed vibration velocity and frequency

	a	b	c
----- 63Hz TTS	12.5 dB	7.5 dB	2.5 dB
———— 125Hz TTS	17.5	10	2.5
———— 250Hz TTS	20	12.5	5

This is an inclusive explanation of [5-1], [5-2] and [5-3]

Fig. 6 Compatibility of average TTS values of 5 subjects (Part 1) and predicted values by regression equation (Part 2, Table 2)

Five subjects in Part 1 differ from Part 2
The ordinate is the average TTS value of vibratory sensation of 5 subjects in Part 1
The abscissa is predicted value

次に、こうして得られた予測式の普遍性を検討するために、予測式を算出した本実験とは異なる、前報の5名の被験者について得た振動感覚 TTS の平均値(実験値)と予測式より算出される予測値の関係を Fig. 6 に示した。

Fig. 6 から、予測値が 0 dB に近い場合に実験値がやや大きい傾向にあるが、全体的には予測値と実験値は良く対応していると判断される。

考 察

振動感覚については、19世紀後半以後、受容器、神経経路、皮膚知覚としての独立性などが生理学的に検討されてきた。現在では、振動感覚は触感覚や圧感覚が一時的に modulate されたものと考えられ^{9,10)}、また、Talbot ら¹⁰⁾は、手指の無毛部における振動感覚の受容器として、40 Hz 以下の低周波域ではマイスネル小体、40~60 Hz 以上の高周波域ではパチニ小体を考えている。

本実験における振動感覚閾値の測定部位は手指尖であり、試験周波数は、63 Hz, 125 Hz, 250 Hz であるため、以下の考察は受容器としてパチニ小体を想定しておこなった。

なお、前報および本報を通じて、振動の大きさのパラメーターとして原則的には振動加速度が用いられている。しかし、本報における Fig. 1~Fig. 4 では、得られた振動感覚 TTS および皮膚温変動を等速度の振動負荷例について線で結んであることに注意せねばならない。

1. 手指皮膚温の低下と、その振動感覚閾値へおよぼす影響について

i) 手指皮膚温の変化

振動負荷による手指皮膚温の低下傾向は、負荷振動周波数 16 Hz ないしは 31.5 Hz と、250 Hz 前後の2点をピークとした2峰性のパターンを示すようにみられた。

この傾向は分散が大きいため対照と比較して必ずしも有意でないが、振動負荷後の各測定値で認められ、特に負荷6分後では負荷側、非負荷側とも分散分析で有意な変動として認められた。

このうち、非負荷側にみられた手指皮膚温の変動については、振動負荷側への振動刺激によって反対側にも生じた、反射性の血管収縮として理解される。

一方、Malinskaya ら³⁾は、著者のおこなった振動負荷の振動速度、0.74, 2.35, 7.43 cm/s の中央値に近い3.54 cm/s の周波数別の振動を手に実験的に負荷し、①5分間の振動負荷では 16 Hz, 63 Hz 負荷で軽度の充血を、250 Hz, 1,000 Hz 負荷で血液供給の低下をきたすこと、②30分間の振動負荷ではこの現象は逆転し、16 Hz, 63 Hz, 125 Hz 負荷で血液供給の低下を、250 Hz, 1,000 Hz 負荷で充血をきたすこと、③14.11 cm/s のような大きい振動負荷では5分間の振動負荷でこの逆転現象が出現すること、などを指摘している。

本実験の結果は Malinskaya らの実験結果の①における負荷振動周波数と末梢血流の変化の關係にやや類似した特徴を示している。

ii) 手指皮膚温の低下による振動感覚閾値への影響

大河内¹¹⁾、小谷ら¹²⁾は、手指皮膚温の指尖振動感覚閾値へ与える影響について検討し、手指皮膚温の低下により振動感覚は鈍麻するが、この現象は高周波域の振動感覚で強いこと、しかし、28℃~36℃前後の手指皮膚温では、ほぼ安定した振動感覚閾値を示すことを明らかにしている。

今回の実験では振動負荷により手指皮膚温が低下する傾向があるが、その程度は小さく、絶対値はほぼ30℃から35℃の範囲内にあることが観察された。したがって、今回の実験でも、前報と同様、振動感覚閾値に及ぼす手指皮膚温低下の影響は無視できると考えられる。

2. 振動負荷側の振動感覚 TTS について

等速度の振動負荷による振動感覚 TTS は、63 Hz, 125 Hz, 250 Hz の各試験周波数閾値とも 250 Hz 振動負荷時をピークとして平滑な曲線を形成し、負荷振動速度の増加とともに TTS が大きくなることを示した (Fig. 1-1, 1-2, 1-3)。すなわち、今回の実験条件のもとでは、等速度の振動負荷による振動感覚閾値の上昇は 8 Hz から 1,000 Hz までのすべての負荷周波数でみられ、250 Hz 振動負荷で最大値を示す。

ここで、Fig. 1-1, 1-2, 1-3 において、速度レベル 7.43 cm/s の場合、31.5 Hz 振動負荷でやや突出したパターンがみられる。その理由としては、31.5 Hz の振動負荷では手指組織に共振が発生する可能性が考えられるが断定はできない。

3. 振動感覚 TTS の発現機序について

i) 振動負荷側の振動感覚 TTS

振動負荷後、振動負荷側に 5~10 分にわたって認められた振動感覚の TTS は、現象的には、生理学の分野でいうところの posttetanic depression に類似したものと考えられる。

しかし、このような振動感覚における抑制現象についての生理学的機序は充分には解明されていない。

最近、パチニ小体へ分布する遠心性神経が存在することが Santini ら^{13,14)}により指摘されており、振動負荷後の振動感覚 TTS を遠心性抑制による現象として説明できるかもしれない。

一方、Diamond ら¹⁵⁾は、分離したパチニ小体に条件刺激を与えたのち試験刺激を与え、その 2 刺激の間隔が 10 msec より小であると試験刺激により生じる receptor potential が抑制されること、この抑制は二つの刺激の間隔が小さいほど、また、条件刺激の振幅が大きいほど強いことを指摘している。

これは、連続する 2 刺激に対するパチニ小体の反応を調べた実験であり、連続した振動刺激を与えた本実験の結果とは直接比較できないが、条件刺激の間隔、大きさと、その結果として得られた抑制反応の特性に類似した点があり、振動負荷後の振動感覚の抑制現象の機序を考える上で、今後の参考になるかもしれない。

そのほか、中枢神経系内での抑制等の吟味も必要であり、振動感覚 TTS の生理学的機序については今後の検討課題として残される。

ii) 非負荷側の振動感覚 TTS

振動非負荷側においても、Fig. 2 に示したように、振動負荷後、統計的に有意な振動感覚 TTS が部分的に認められ、これは、63 Hz 振動感覚閾値ではなく、125 Hz

Fig. 7 Exposure boundary of ISO, 1973 (octave bands). represented by peak value

振動感覚閾値で弱く、250 Hz 振動感覚閾値で強いという特徴的な傾向をもっていった。この傾向は、負荷側における振動感覚の閾値上昇が 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz の順に大きくなる傾向と一致している。

前報では、振動非負荷側における振動感覚閾値の変化は明確でなかった。これは、前報の実験では被験者の年齢構成がやや高く幅が広いこと、設定した実験条件の種類が限られていたことなどによると考えられる。今回の実験ではこれらの点が改善されていたために、非負荷側における振動感覚閾値の微妙な変化が検出されたものであろう。

非負荷側に振動感覚の抑制がみられる理由としては、振動負荷に伴う騒音の影響、統計的には検出されない程度の、振動負荷による軽度の皮膚温変動による効果、中枢を介した反対側への抑制効果、等が考えられるが、これらの点についても今後の検討課題である。

4. ISO の局所振動暴露基準の提案について

手持動力工具の振動による健康障害は各国で発生しており、工具の発生する振動の許容値の設定が検討課題となっている。ソ連、チェコスロバキアは独自に、それぞれ、許容基準、許容基準案を持っており¹⁶⁾、これらをもとにして国際的に ISO の暴露基準が作製されている。しかし、これらの基準値はその労働衛生学的根拠が充分でないために過渡的なものと考えられ、ISO の暴露基準^{6,7)}にも、主として主観的な心理反応にもとづいた試案であ

ることが強調されている。

局所振動が人体に与える影響は、振動の大きさとともに周波数によって異なるため¹⁷⁾、許容値の設定にあたっては、その周波数特性が重要な検討課題となる。

本実験で得られた等 TTS 曲線は、限定された条件のもとではあるが、振動負荷による生理的影響の周波数特性の一面を示すものと位置づけることができる。そこで、この等 TTS 曲線と ISO の暴露基準⁶⁾ (1973) との比較検討を試みた。なお、ISO の暴露基準⁷⁾ (1975) は、ISO 暴露基準 (1973) より若干、基準値が大きくなっているが、その周波数特性は全く同じである。

Fig. 7 に ISO の基準値を図示した。上の斜線は30分暴露基準値、下の斜線は8時間暴露基準値である。ここでは振動の大きさの指標として加速度が用いられているため、同じ表示法で示した Fig. 5-2 の等 TTS 曲線と比較する。

ISO の基準値は、8 Hz～16 Hz で等加速度、16 Hz～1,000 Hz では1オクターブで6 dB 上昇する加速度値、すなわち等速度のレベルで示されているのに対し、Fig. 5-2 の等 TTS 曲線は 63 Hz を頂点とするUカーブを示す点が大きく異なる。また、等 TTS 曲線の 125 Hz から 500 Hz にいたる右上りの傾きは、ISO 基準値の傾きに類似しているが、500 Hz から 1,000 Hz の傾きは、著者の等 TTS 曲線の方がやや大きい。

63 Hz 以下の低周波域で等 TTS 曲線が上昇する理由は、パチニ小体は 40 Hz 以下の振動刺激に対して感受性が小さい^{10, 18)} ことによると考えられる。すなわち、本実験では振動感覚閾値を 63 Hz、125 Hz、250 Hz の3周波数で測定しているために、独自の受容器の存在が考えられている¹⁰⁾ 低周波域における振動影響を充分検出していない可能性がある。

したがって、局所振動負荷の生理的影響を評価する目的で、本実験で得られた等 TTS 曲線と ISO 暴露基準を比較検討することは、63 Hz 以下の低周波域では適当でないのかもしれない。

500 Hz より 1,000 Hz の高周波域では ISO 暴露基準より等 TTS 曲線の傾きがやや大きい。三輪⁸⁾ は、手腕系への振動負荷に対する等感度曲線の研究から、ISO の暴露基準は 300 Hz 以上の周波数域ではオクターブあたり +12 dB の傾きにすべきであると提案している。これらの点を考えると、ISO 暴露基準における高周波域の周波数特性については、なお検討の余地があるといえよう。

つぎに、ISO の30分基準値と8時間基準値が、本実験において、どの程度の振動感覚の閾値変動に相当するか

を Fig. 1 より読みとった。前述したように等 TTS 曲線と ISO 暴露基準の特性は 125 Hz より 500 Hz の振動負荷周波数で比較的一致するため、この周波数帯で評価するならば、ISO の30分基準値は 63 Hz 振動感覚で12.5～15 dB、125 Hz 振動感覚で 17.5～22.5 dB、250 Hz 振動感覚で 22.5～27.5 dB の閾値変動に相当し、8時間基準値は、それぞれの振動感覚試験周波数で、5 dB、7.5 dB、10～12.5 dB の閾値変動に相当することがわかる。

著者の経験では 5 dB 前後の振動感覚の閾値変動は生理的にも存在すると考えられる。したがって、ISO 暴露基準 (1973) の8時間基準値は、この生理的変動に近い程度の振動負荷といえよう。

5. 今後の課題について

第2報では、局所振動負荷による人体の生理的反応の特性を明らかにし、生理学的根拠を持った許容基準のための基礎的資料を得る目的で振動負荷実験をおこない、得られた等 TTS 曲線と ISO 暴露基準との比較検討をおこなった。

その結果、振動負荷周波数 63 Hz から 500 Hz の範囲では両者の特性曲線はかなり一致していたが、低周波域と高周波域では異なる傾向を持つことが判明した。

これらの点については、4. で考察したこと以外に、63 Hz より低周波の振動負荷では手指組織に共振現象が発生する問題や、低周波域の振動負荷では振幅が大きくなるために上肢の骨・関節・筋肉系への影響が発生する問題の検討が残されている。

さらに、局所振動負荷が末梢循環へ与える影響と負荷振動パラメータとの関係の検討も今後の課題である。

また、本実験では振動負荷中に上肢の筋緊張が一定に保たれていない。このように握り圧の無い状態で振動を負荷することによって、手指皮膚温の変動を一定の範囲にとどめ、皮膚温低下による振動感覚閾値への影響を除外できた。しかし、一定の大きさの筋緊張が加わった状態での振動負荷による生理的反応についても検討を要する課題である。

今後、人体への長期にわたる職業性の局所振動暴露の評価のためには、気温、工具の握り圧、暴露時間、暴露姿勢等、実際の労働条件を多く加味した実験を、末梢知覚のみでなく、末梢循環、筋機能等の生理的指標についてもおこなう必要がある。

総括および結論

第1報における予備的検討の結果にもとづいて、負荷振動の周波数および大きさと振動感覚 TTS との関係

さらに詳細に検討する目的で、第1報と同様な手法での振動負荷実験をおこなった。

今回の被験者は6名の健康な男子学生であった。負荷振動の周波数、加速度はISO暴露基準⁶⁾(1973)に準じて設定した。

その結果は次のようであった。

1. 等速度の振動負荷において、負荷直後の負荷側指尖振動感覚 TTS は、負荷周波数 250 Hz で最高値を示し、8 Hz および 1,000 Hz に向って低下する平滑な曲線を示した。

同一周波数の振動負荷では、負荷振動加速度が大きいほど、大きな振動感覚 TTS を示した。

2. 非負荷側では、負荷直後に、125 Hz と 250 Hz の振動感覚の一部に有意な TTS がみられた。

3. 振動負荷による手指皮膚温の変化は、負荷側、非負荷側とも類似したパターンを示した。しかし、その変化は軽度であり、分散分析では、負荷側、非負荷側とも、負荷直後値では有意でなく、負荷6分後値で有意であった。また、手指皮膚温の平均値は30℃から35℃の範囲であったため、皮膚温変動による振動感覚閾値への影響は除外されたと考えられた。

4. 振動負荷側における、負荷直後の振動感覚 TTS の予測式を作製し、図示した。

第1報における実験値と予測式から算出された予測値とを比較検討した結果、第2報に示された振動感覚TTSの予測式は、本実験条件のもとでは、普遍性があると考えられた。

5. 振動感覚 TTS の予測式より得られた等 TTS 曲線と ISO 暴露基準 (1973) を比較した。

その結果、振動負荷周波数 63 Hz から 500 Hz の範囲では両者の特性曲線はかなり一致していたが、低周波域と高周波域では異なる傾向がみられた。このうち、低周波域においては、本実験で測定した振動感覚閾値の受容器と考えられるパチニ小体の感受性の問題があること、高周波域においては、ISO 暴露基準に検討の余地があること等について考察した。

また、ISO の30分基準値は、本実験における、63 Hz 振動感覚で 12.5~15 dB、125 Hz 振動感覚で 17.5~22.5 dB、250 Hz 振動感覚で 22.5~27.5 dB の閾値変動に相当し、8時間基準値は、それぞれ、5 dB、7.5 dB、10~12.5 dB の閾値変動に相当すると考えられた。

稿を終えるに当たり、ご校閲いただいた井上俊教授(名古屋大学医学部衛生学教訓)、実験のご指導、ご校閲

をいただいた山田信也教授(同、公衆衛生学教室)、貴重なご示唆をいただいた伊藤文雄教授(同、第2生理学教室)に感謝の意を表します。

本論文の要旨は第50回日本産業衛生学会において発表した。

本論文中の統計処理については、名古屋大学大型電算機センター FACOM 230-60、230-75 を使用した。

文 献

- 1) Bjerker, N., Kylin, B. and Lidström, I. M.: Changes in the vibratory sensation threshold after exposure to powerful vibration, *Ergonomics*, **15**, 399-406 (1972).
- 2) 富永洋志夫: 局所振動の指尖振動感覚におよぼす影響, *労働科学*, **49**, 17-25 (1973).
- 3) 伊藤史子, 訳: 産業における振動, p. 130-135, *労働科学研究所*, 川崎 (1975).
- 4) Streeter, H.: Effects of localized vibration on the human tactile sense, *Amer. Industr. Hyg. Ass. J.*, **31**, 87-91 (1970).
- 5) Reynolds, D. D. and Jokel, C. R.: Hand-arm vibration—an engineering approach, *Amer. Industr. Hyg. Ass. J.*, **35**, 613-622 (1974).
- 6) ISO/TC 108/SC 4/WG 3 (Sweden-1): Guide for the evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration, January (1973).
- 7) ISO/TC 108/SC 4/WG 3 (Southampton-1): Draft proposal for guide for the measurement and the evaluation of human exposure to vibration transmitted to the hand, September (1975).
- 8) 三輪俊輔: 局所振動の許容基準, その後, *労働科学*, **28**(11), 59-63 (1973).
- 9) Calne, D. B. and Pallis, C. A.: Vibratory sense—a critical review, *Brain*, **89**, 723-746 (1966).
- 10) Talbot, W. H., Darian-Smith, I., Kornhuber, H. H. and Mountcastle, V. B.: The sense of flutter vibration—comparison of the human capacity with response patterns of mechanoreceptive afferent from the monkey hand, *J. Neurophysiol.*, **31**, 301-335 (1968).
- 11) 大河内凱男: 振動知覚能力の定量的測定とその臨床的応用について, *臨床神経*, **12**, 413-422 (1972).
- 12) 小谷諒夫, 宮田昭吾, 岩田弘敏: チェンソー取扱者の振動感覚閾値, *日衛誌*, **31**, 583-588 (1976).

- 13) Santini, M., Ibata, Y. and Pappas, G. D.: The fine structure of the sympathetic axons within the Pacinian corpuscle, *Brain Research*, **33**, 279-287 (1971).
- 14) Schiff, J. D.: Role of the sympathetic innervation of the Pacinian corpuscle, *J. Gen. Physiol.*, **63**, 601-608 (1974).
- 15) Diamond, J., Gray, J. A. B. and Inman, D. R.: The depression of the receptor potential in Pacinian corpuscles, *J. Physiol.*, **141**, 117-131 (1958).
- 16) 渡部真也: 局所振動の許容基準, *労働の科学*, **25** (11), 58-61 (1970).
- 17) 山田信也, 高城 晋: いわゆる白ろう病(振動障害), *新内科学大系*59巻B, p. 248-280, 中山書店, 東京 (1976).
- 18) Sato, M.: Response of Pacinian corpuscles to sinusoidal vibration, *J. Physiol.*, **159**, 391-409 (1961).

(受付 1978年7月14日)