

# 振動障害予備群における初期末梢神経症状に着目した指先振動感覚閾値を援用した新しい指標 VPTW の提案†

柴田 延幸\*1

振動ばく露作業は技能・体力ともに必要とする作業であることから、60歳以上の高年齢振動ばく露作業者は若い時から数十年にわたって種々の振動ばく露作業に従事しているケースが大半である。したがって、高年齢振動ばく露作業者の場合、就業期間の長期化によって総振動ばく露時間が増大することにより、経年的な振動ばく露による蓄積性の健康影響が増大することが危惧される。本研究では、長期間にわたって振動ばく露作業に従事している高年齢労働者を振動障害予備群と位置づけ、末梢神経系障害の診断指標の中から指先振動感覚に着目して、新たな振動感覚閾値モデルを構築することにより高年齢労働者の振動ばく露による潜在的健康リスクを評価した。その結果、上昇法によって得られた指先振動感覚閾値と下降法によって得られた指先振動感覚閾値の差によって定義された振動感覚閾値幅 (VPTW) は、手腕振動ばく露直後の回復過程において、高齢者非ばく露群および若年者非ばく露群いずれの場合も急性的な影響を受けずほぼ一定であること、高齢者ばく露群の場合は有意に変動することが示された。また、手腕振動ばく露後の振動感覚閾値 (VPT) の回復係数は、高齢者ばく露群の場合有意に小さい値となることが示された。これら二種類のパラメータを組み合わせることで、手腕振動の長期ばく露による高年齢労働者の蓄積性の健康影響と手腕振動発症のリスクを評価できることが示された。

**キーワード:** 振動障害, 手腕振動, 指先振動感覚閾値, 閾値幅, 末梢神経症状。

## 1. はじめに

近年、医療の進歩や個人々の健康リテラシーの向上により長寿化が一層進みつつある。健康リテラシーの高い人々が健康改善することにより、ますます長寿化しかつ従来の定年を超えて健康に働くことができる。こうした人々の働き方の変化により、一人一人の総労働時間は増大することになる<sup>1)</sup>。同様に、手持ち動力工具を使用する作業者たちは、60歳以上になっても振動ばく露作業に従事し続ける。一般に製造業や建設業および重工業等で手腕振動ばく露作業に従事する60歳代および70歳代の作業者たちは、その年代になって初めて手持ち動力工具を使用する作業に就くことはなく、たいてい既に数十年手持ち動力工具を使用する作業に従事してきている。したがって、手腕振動ばく露作業に従事する高年齢労働者の総作業時間は以前よりも長くなり、手腕振動ばく露による健康影響リスクは、ますます蓄積していく方向にある。さまざまな産業における高年齢振動ばく露作業者は、振動障害に対してより高いリスクにさらされていることになる。

本プロジェクト研究では、指先における個人の神経感覚特性を反映する一種の物理量であり、振動感覚の測定において環境条件や健康状態に影響されない、振動感覚に関する新しい指標を確立することを意図している。指先で測定される振動感覚閾値 (VPT) は、手腕振動障害の確定診断によく用いられるスクリーニングパラメータの一つである<sup>2)</sup>。しかし、VPTは上昇法による閾値と下降

法による閾値を平均化することで得られるが、この値はVPT測定時の環境条件や健康状態に敏感に影響される<sup>3)</sup>。そのため、従来の手腕振動障害のスクリーニング検査では、すでに手腕振動障害を発症している患者 (通常のVPTよりもはるかに大きなVPTを呈することが知られている) を検出する指標として用いられてきた。

本研究の目的は、手腕振動ばく露に対する潜在的影響を特徴付け、手腕振動障害の末梢神経系障害の罹患リスク上昇を評価する新しい指標を提案し、検証することである。本研究では、手腕振動ばく露後の回復過程において手指先端で観察されるVPTの上昇法による閾値と下降法による閾値の差から計算される振動感覚閾値幅 (VPTWと定義) および振動感覚閾値の残留移動に注目した。本研究で得られる知見は、手腕振動障害の前駆症状とされる末梢神経系障害の発症を予測する新たな指標の確立に貢献することにより、手腕振動障害予備群をいち早く発見することで手腕振動障害の発症を未然に防ぐための一助となり得る。

## 2. 方 法

### 1) 被験者

合計30人の健康な男性 (非喫煙者かつ手腕に循環系および神経系障害がない人) が本実験に被験者として参加した。被験者は3つの被験者群すなわち、グループ1 (G1): 職業的に手腕振動ばく露している60歳以上の男性10人 (平均年齢: 65.8歳, 平均身長: 170.0cm, 平均体重: 76.0kg), グループ2 (G2): 職業的な手腕振動ばく露経験がない60歳以上の男性10人 (平均年齢: 70.8歳, 平均身長: 164.1cm, 平均体重: 59.8kg), グループ3 (G3): 手腕振動ばく露経験がない20-30歳の男性10名 (平均年齢: 21.8歳, 平均身長: 174.1cm, 平均体重:

† 本報は、Vibration 5(4), pp.803-816, 2022の記述の一部を加筆修正し、まとめ直したものである。

\*1 労働安全衛生総合研究所 研究推進・国際センター  
連絡先: 〒214-8585 神奈川県川崎市多摩区長尾6-21-1  
労働安全衛生総合研究所 研究推進・国際センター 柴田延幸  
E-mail: shibata@h.jniosh.johas.go.jp

64.1kg) からなる。G2 および G3 の被験者には、仕事や余暇での手持ち式電動工具の定期的な使用歴はなかった。

被験者は、検査 4 時間前から検査中にかけてカフェインの摂取を控えるよう求められた。被験者は全員、検査手順の説明を受け、この研究に参加することに同意した。実験プロトコルは、労働安全衛生研究所研究倫理審査委員会の承認を得ている（申請番号 2020N-1-17）。

## 2) 実験装置

本研究では、国際規格 ISO 13091-1 (2001)<sup>4)</sup> に規定された要件を満たす振動感覚計 (AU-06, リオン株式会社製) を使用した。この振動感覚計で使用したプローブは、直径 4.0mm、指先の接触面積は直径  $4.0 \pm 2.0$ mm である。プローブと指先の接触状態は、ISO 13091-1 で規定されている方法 B に分類される。プローブとその周囲の隙間は  $1.5 \pm 0.6$  mm であった。

振動感覚閾値測定は、振動ばく露直後の影響が顕著に誘発される可能性が高いことを示した過去の実験結果<sup>5)</sup>に基づいて 125Hz と 31.5Hz の 2 つの試験周波数で行った。125Hz と 31.5Hz の試験周波数は、それぞれ FA II および FA I 機械受容器の反応範囲に属する。

振動感覚閾値測定は、右手の人差し指遠位指骨の位置で行った。被験者は、右手の人差し指の先端を遠位指骨の中心とプローブの中心が一致するように、右手の人差し指の先端を置くように指示された。さらに被験者は左手に反応ボタンを持ち、振動を感じ始めたらすぐに反応ボタンを押し、振動を感じなくなったら即座に反応ボタンを離すように指示された (図 1 参照)。試験刺激の提示は、von Békésy アルゴリズムにもとづいて 2.5dB/s で試験刺激の大きさを自動的に上昇または下降させた。

## 3) 模擬手腕振動ばく露タスク

国内市場に供給されている手持ち振動工具の振動加速度の大きさを調査した過去の報告書によると、空気式インパクトレンチ、サンダー、ハンマードリル、チェーンなどの主要な手持ち振動工具の周波数補正振動加速度実効値の平均値の多くが  $5.0 \sim 6.0$  m/s<sup>2</sup> であった。このことから、模擬手腕振動ばく露タスクの周波数補正加速度実効値をこの値の範囲に収まるように  $5.9$  m/s<sup>2</sup> および  $5.3$  m/s<sup>2</sup> (以降、高 HAV および低 HAV と呼ぶ) に設定した。

振動信号は、パワースペクトル密度 (PSD) が  $6.3 \sim 1,250$ Hz の周波数範囲において  $1.0$  (m/s<sup>2</sup>)<sup>2</sup>/Hz で一定 (周波数補正加速度実効値で  $5.9$  m/s<sup>2</sup> に相当) となるように擬似ランダム信号セグメントを設計した。次に、このセグメントは、周波数補正加速度実効値が  $5.3$  m/s<sup>2</sup> になるようにゲイン調整を行った。

信号シーケンスは、製造ライン等における手持ち工具の断続的な操作を模擬した。周波数補正加速度実効値の異なる 2 系列の手腕振動シーケンスを作成し、それぞれのシーケンスは同じ振動の大きさ ( $5.9$  m/s<sup>2</sup> または  $5.3$  m/s<sup>2</sup>) からなる 18 個の振動信号セグメントを順次接

続する。各振動信号の持続時間は 30 秒で、その後 5 秒のインターバルを設けて断続的な振動ばく露状態を模擬した。したがって、1 シーケンスにおける手腕振動ばく露時間は合計 9 分である。

VPT 測定の実験に先立ち、各被験者は単軸手腕振動試験装置<sup>9)</sup>に固定された実験用ハンドルを把持することにより、模擬手腕振動ばく露タスクを行った。試験装置は、水平加振用に設置した静電型加振装置 (VE-100S; IMV 社製) に円筒形の実験用ハンドル (直径 40mm、長さ 100mm、グリップ長さ 100mm) を取り付けられている。ハンドルは、ハンドルベースと測定用キャップで構成され、中心線上に設置された握力測定用の 2 つの圧電式力センサー (Type 9212; Kistler 社製) と振動測定用加速度センサー (356A12; PCB 社製) が両者の間に挟まれた構造をしている。ハンドルの共振周波数は 1250Hz 以上である。床上にフォースプレートを固定して、被験者はフォースプレートの上に立位姿勢をとった。被験者の足とプレート表面の間に水平方向に働く反力は、被験者が手のひらを介してハンドルを押し込む力と釣り合うことから、被験者の足とプレートとの間に水平方向に働く反力を測定することによりハンドルの押し込み力を算出した。



図 1 VPT 測定および振動ばく露タスク中の被験者の姿勢及び

## 4) 実験手順

実験は室温  $23 \pm 2$ °C の制御下で行った。また、実験に先立ち、被験者の頸部周辺で騒音計 (2250 型, ブリュエル・ケアー社製) を用いて暗騒音レベルを測定したところ、80 dBA であった。実験室では、空調装置が発する騒音、振動制御用に PC に接続された信号処理装置に起因する騒音が暗騒音として存在するため、被験者には耳栓 (NRR31 相当の遮音性能) を装着してもらうことにより、VPT 測定時における暗騒音の影響を排除した。したがって、耳栓をした被験者がさらされる騒音レベルは 70dBA 以下であると予想された。

模擬手腕振動ばく露タスクで被験者に適用された姿勢条件は、ISO 10819 テストプロトコル<sup>10)</sup>にしたがった。被験者は加振器の前に直立し、加振器のシャフトに水平

に接続された実験用ハンドルを右手で握り、右前腕を水平に保ち、肘の角度を  $90 \pm 10$  度以内、手首の角度を  $0 \sim 40$  度の間に保つように指示された。さらに、上腕が被験者の身体に触れないよう維持した。1 セグメント分 (30 秒間) の手腕振動ばく露の間、被験者はハンドル把持力を  $30 \pm 5$  N 以内、押し込み力を  $50 \pm 8$  N 以内にコントロールすることが求められた。

模擬手腕振動ばく露タスクの終了直後、被験者はハンドルから手を放して背もたれのある椅子に座り、右前腕と右腕をリラックスさせた。その後、右前腕をアーム固定具の上に置いてリラックスしてもらい、プローブの中心が指紋の渦の中心と爪の遠位角の間に位置するように右手の人差し指を置くように指示された。VPT 測定は、試験周波数 125Hz, 31.5Hz の順に行った。この VPT 測定は、模擬手腕振動ばく露タスク実施直後の最初の 90 秒間を皮切りに、その後 5 分間隔で 30 分間後まで測定した。一連の VPT 測定の間隔ごとに、被験者はプローブから人差し指を離し、指をリラックスさせた。

### 5) 新しい振動感覚知覚モデルの構築

国際規格 ISO 13091-1<sup>4)</sup>では、振動感覚知覚閾値(VPT)を心理測定関数において純音振動刺激を検出する際の陽性反応率が 50%となる皮膚表面加速度レベルと定義し、von Békésy アルゴリズムにもとづいて振動刺激を増減させた際の上昇法による閾値と下降法による閾値の平均値として求めている。下降法による閾値は、指先の皮膚に連続して振動強度が下降する刺激を、刺激が検出されなくなるまで印加することによって得られる。一方、上昇法による閾値は、刺激が検出されるまで、振動強度が順次増加する刺激を指先の皮膚に印加したときに得られる。したがって、上昇法による閾値を測定する際の手指先端における力学的接触条件は、下降法による閾値を測定する場合とは全く異なる。本来、データの平均化は、対象となるデータがすべて同じ条件で測定された場合にのみ意味を持つ。この点において、上昇法による閾値と下降法による閾値の算術平均をとる従来の平均化法では、心理物理学的な考察にもとづく 50%正答率は得られない。

そこで本研究では、図 2 に示すような振動感覚と振動刺激に関するヒステリシスモデルを提案する。図 2 の実線で描かれるように、振動刺激が増加するときと減少するときでは、振動感覚の知覚反応は異なり、その結果、上昇過程における閾値  $T_{a1}$  と下降過程における閾値  $T_{d1}$  は異なる。また、別の異なる振動刺激-知覚条件では、図 2 の破線で示すように主観的な反応の閾値が異なり、その結果、上昇過程における閾値  $T_{a2}$  と下降過程における閾値  $T_{d2}$  が異なる。上昇閾値と下降閾値は、周囲温度などの環境条件や、指先の生理的・生体力学的条件等によって明らかに影響を受けるが、VPTW で示されるこれらの閾値の差は、材料特性等も含めた接触系固有の諸特性によって決まり、上記の条件の影響をほとんど受けない可能性がある。同様の類似性は、粘弾性材料の応力-ひ

ずみ関係で認められる弾性ヒステリシスにも見受けられる。

### 6) データ解析

VPT は、ISO 13091-1 にしたがって上昇法における閾値と下降法における閾値 3 組の算術平均から算出した。一方、上昇法における閾値と下降法における閾値 3 組の

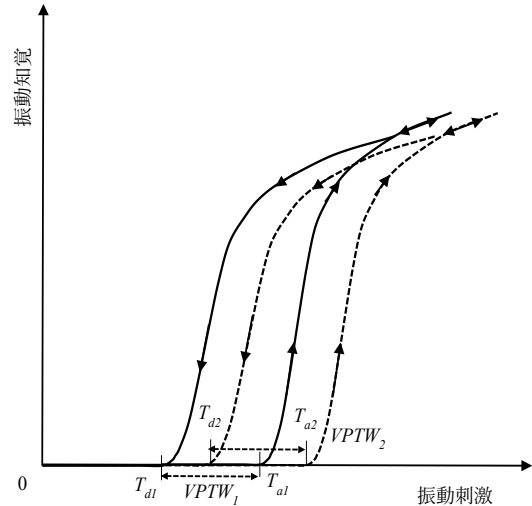


図 2 ヒステリシスを考慮した振動知覚-振動刺激モデル

差の算術平均を算出し、これを振動感覚知覚閾値幅 (VPTW) と定義した。

$$VPTW_f = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 |T_{a,f}(i) - T_{d,f}(i)| \quad (1)$$

ただし、 $T_{a,f}(i)$ は試験周波数  $f$ における  $i$  番目の上昇法による閾値であり、 $T_{d,f}(i)$ は試験周波数  $f$ における  $i$  番目の下降法による閾値である。上昇法による閾値と下降法による閾値の最初の組は、VPT と VPTW の計算から排除した。

VPT の一時的な閾値移動 (TTS) は以下の式より計算した。

$$TTS_f(t) = VPT_f(t) - VPT_{f,0} \quad (2)$$

$t$  は模擬手腕振動ばく露タスク終了後の経過時間である。 $VPT_{f,0}$ は、模擬手腕振動ばく露タスク開始前に試験周波数  $f$  で測定した VPT 値であり、個々の被験者特有のベースライン VPT に相当する。 $VPT_f(t)$ は、試験周波数  $f$  で時間  $t$  経過後に測定された VPT の値である。

本研究では、VPT の回復過程を一次系としてモデル化した<sup>11,12)</sup>。すなわち、VPT の回復過程は次式で与えられる指数モデル<sup>12)</sup>によって評価される。

$$TTS_f(t) = TTS_m \cdot \exp[-t/\tau] \quad (3)$$

$\tau$  は時定数 (以降、回復係数と呼ぶ)、 $TTS_m$  は残留閾値移動である。過去の研究では、TTS の回復過程を経過時間の対数の関数として線形に変化するようモデル化している<sup>7)</sup>。しかし、このモデル化の場合経過時間 0 付近の TTS 回復を外挿すると無限大になるという欠点がある。これに対して本研究で使用する指数モデルは、経

過時間 0 近傍で有限の値を持つことができるので、TTS の予測が可能である。

得られたデータに対する ANOVA は、統計ソフト SPSS (ver.14.0) を用いて実施した。分析結果は、 $p < 0.05$  の水準で有意であるとみなした。ANOVA の結果にしたがい、異なる経過時間で測定された VPTW データ間の多重比較は Tukey 法を用いて行った。

ベースライン VPT に対して予備的に行った ANOVA の結果によると、人体測定データに含まれる被験者の身長、体重、手の大きさ等のパラメータは、ベースライン VPT に有意な影響を及ぼさなかったため、これらのパラメータは、以降の ANOVA では変数から除外した。

### 3. 結果

図 3 は、試験周波数 125Hz (図 3a) および 31.5Hz (図 3b) において右手人差し指の先端で測定されたベースライン VPT と被験者の年齢の関係を示す。同図中には、ISO 13091-2 (2003) <sup>14)</sup> の附属書 A に示されたデータを用いて年齢の関数として予測された健康な男性の 15 パーセンタイル、50 パーセンタイル、85 パーセンタイルの VPT が、それぞれ点線、実線、破線で示されている。若年者非ばく露群 (G3) の 125Hz と 31.5Hz で得られた VPT は、50 パーセンタイル線付近に分布している。一方、高齢者非ばく露群 (G2) の 125Hz における VPT は、50 パーセンタイル線までの範囲に分布している。高

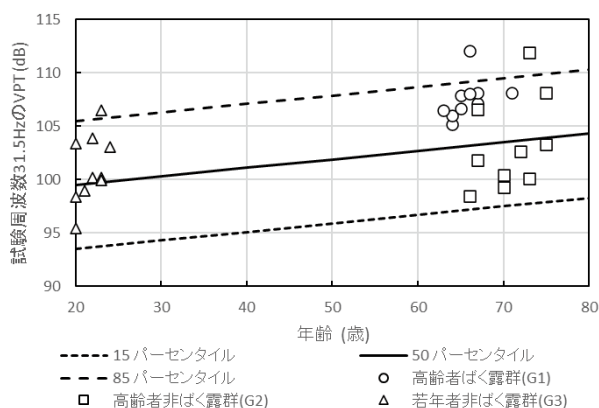
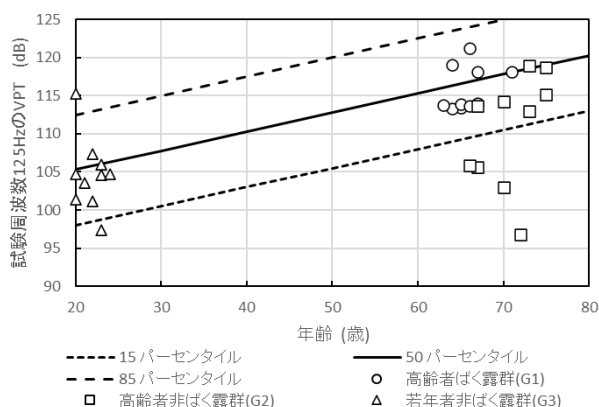


図 3 試験周波数 125Hz (a: 上段), 31.5Hz (b: 下段) の時のベースライン VPT

齢者ばく露群 (G1) の 31.5Hz における VPT は上位半分に属していた。

模擬手腕振動ばく露タスク開始前の定常状態で予備的に測定したベースライン VPT の平均値を、各被験者群について表 1 にまとめた。年齢とばく露経験の主効果は 125Hz で認められた ( $p < 0.05$ )。G1 の 125Hz におけるベースライン VPT の平均値は、G2 ( $p < 0.05$ ) および G3 ( $p < 0.05$ ) の 125Hz における VPT よりも有意に大きかった。ばく露経験の主効果は 31.5Hz で認められたが ( $p < 0.01$ )、31.5Hz では年齢の主効果は認められなかった ( $p = 0.13$ )。G1 の 31.5Hz における平均ベースライン VPT は、G2 の 31.5Hz における VPT ( $p < 0.01$ ) および G3 の 31.5Hz における VPT ( $p < 0.001$ ) よりも有意に大きかった。G2 と G3 では、31.5Hz における VPT に有意差は認められなかった ( $p = 0.20$ )。

表 1 各被験者群のベースライン VPT の平均値

被験者群	平均 VPT (SD) dB	
	125 Hz	31.5 Hz
高齢者ばく露群 (G1)	115.9 (2.9)	107.6 (1.9)
高齢者非ばく露群 (G2)	110.5 (7.3)	103.3 (4.3)
若年者非ばく露群 (G3)	104.6 (4.7)	101.0 (3.2)

VPT 試験周波数が 125Hz の時、高 HAV もしくは低 HAV にばく露した後、5 分ごとに測定した振動感覚閾値の TTS 平均値と SD を図 4 に示す。高 HAV では、いずれの被験者群でも TTS の回復が認められた。低 HAV 条件の G3 では、TTS はほぼゼロであった。試験周波数 125Hz の時の TTS について実施した混合デザイン

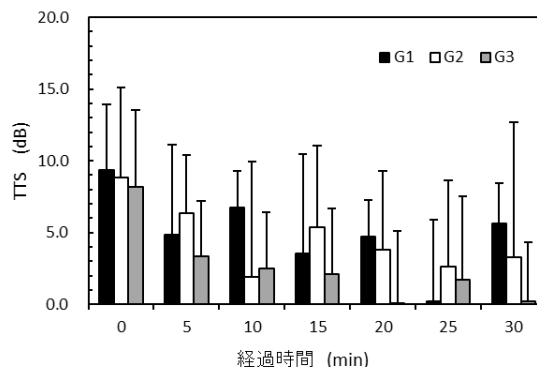
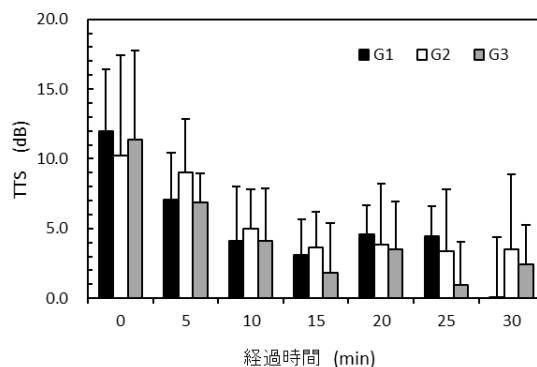


図 4 試験周波数 125Hz の時の高 HAV 時の TTS (a: 上段) および低 HAV 時の TTS 回復過程 (b: 下段)

ANOVA の結果によると、振動強度、ばく露経験、経過時間、年齢の主効果はすべて有意であった ( $p < 0.05$ )。振動強度と年齢 ( $p < 0.05$ )、振動強度とばく露経験 ( $p < 0.05$ ) の間には有意な交互作用が認められた。

VPT 試験周波数 31.5Hz で高 HAV にばく露した後、5 分ごとに測定した振動感覚閾値の平均 TTS を図 5a に、低 HAV にばく露した後の TTS 平均値と SD を図 5b に示す。模擬振動ばく露タスク後の TTS 回復は、いずれの被験者群でも認められなかった。経過時間にかかわらず、G2 と G3 の平均 TTS は G1 の平均 TTS より小さな値を示した。低 HAV 条件の G3 では、ベースラインより低い TTS を示す負の TTS 値が認められた。31.5Hz の TTS について実施した混合デザイン ANOVA によれば、振動強度、ばく露経験、年齢の主効果はいずれも有意であった ( $p < 0.05$ )。一方、経過時間の主効果は有意ではなかった ( $p = 0.39$ )。VPT 試験周波数 31.5Hz では、有意な交互作用効果は認められなかった。

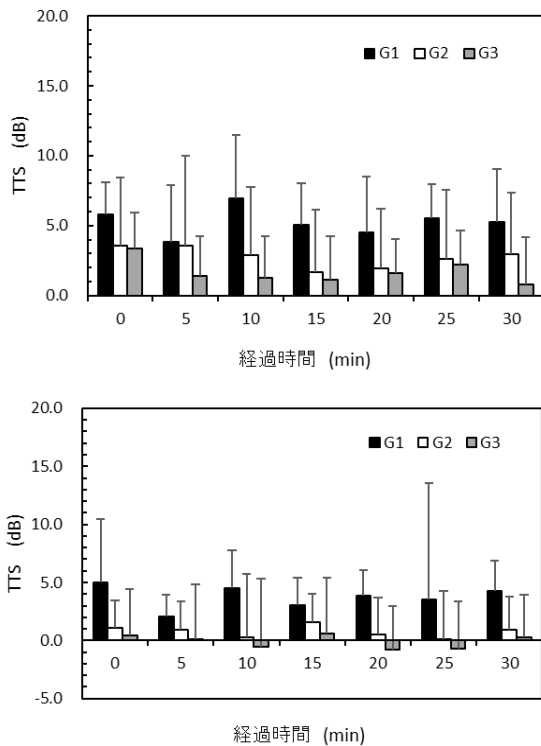


図 5 試験周波数 31.5Hz の時の高 HAV 時の TTS (a: 上段) および低 HAV 時の TTS 回復過程 (b: 下段)

てまとめたものである。各群とも 125Hz で顕著な TTS の回復が観察された (図 4a 参照)。結果として、被験者 3 群の 125Hz における相関係数は 0.78~0.88 と比較的高かった。一方、31.5Hz での TTS 回復は一見して認められず (図 5a 参照)、被験者 3 群の相関係数はいずれも 1.0 にはほど遠いものであった。

VPT 試験周波数 125Hz で高 HAV にばく露した後、5 分ごとに測定した VPTW の平均値と SD を図 6a に、低 HAV にばく露後のものを図 6b に示す。G2 と G3 の平均 VPTW は、いずれの条件のばく露タスク後も経時的な変化はほとんど認められなかった。一方、G1 の平均 VPTW はいずれのばく露タスク後も、時間の経過とともに漸増が認められた。G1 の平均 VPTW は G2 および G3 よりも常に大きな値を示した。VPTW について、年齢、ばく露経験、振動強度、経過時間の反復測定 (ばく露直後から 30 分まで 5 分ごと) を変数とする混合デザイン ANOVA の結果、試験周波数 125Hz の VPTW では、ばく露経験の主効果は有意であった ( $p < 0.001$ )。年齢 ( $p$

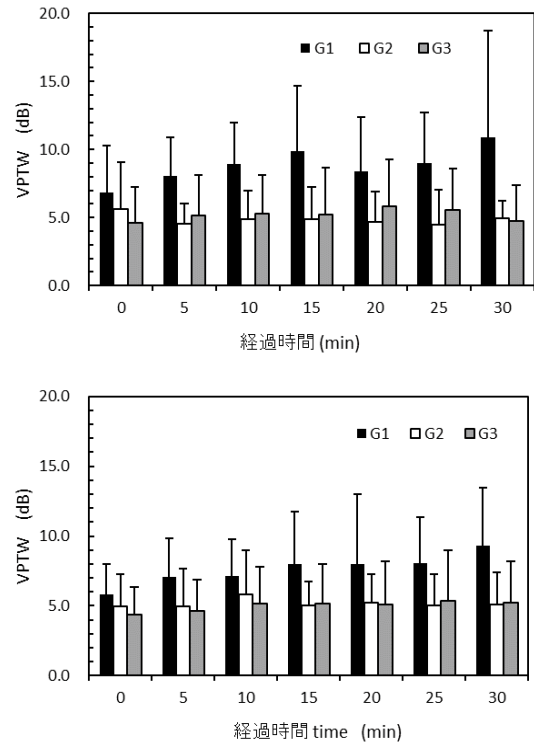


図 6 試験周波数 125Hz の時の高 HAV ばく露後の VPTW (a: 上段) および低 HAV ばく露後の VPTW (b: 下段)

表 2 高 HAV ばく露後の TTS 回復過程における各種パラメータの算出

被験者群	VPT 試験周波数					
	125 Hz		31.5 Hz			
	$TTS_m$ (dB)	$\tau$ (min)	$r$	$TTS_m$ (dB)	$\tau$ (min)	$r$
高齢者ばく露群 (G1)	12.0	8.20	0.78	9.3	15.9	0.51
高齢者非ばく露群 (G2)	10.2	22.2	0.88	8.9	22.2	0.46
若年者非ばく露群 (G3)	11.4	13.3	0.79	8.2	8.13	0.73

表 2 は、高 HAV ばく露後の TTS 回復に関する時定数  $\tau$ 、残留閾値移動  $TTS_m$  および式 (3) を用いた回帰分析から算出された相関係数  $r$  のセットを各被験者群につい

= 0.768) や経過時間 ( $p = 0.073$ ) については、主効果における有意性は認められなかった。一方、振動強度の主効果はほぼ有意であった ( $p = 0.059$ )。振動強度とばく

露経験の間にものみ、有意な交互作用が認められた ( $p < 0.05$ )。

VPT 試験周波数 31.5Hz で高 HAV ばく露タスク後、5 分ごとに測定した VPTW の平均値と SD を図 7a に、低 HAV ばく露後に測定した VPTW の平均値と SD を図 7b に示す。ばく露強度にかかわらず、G2 と G3 の平均 VPTW はばく露タスク後、時間が経過しても変化は認められなかった。対照的に、G1 の平均 VPTW に経時的変動が認められた。G1 の平均 VPTW の値は G2 および G3 よりも常に大きな値を示した。試験周波数 31.5Hz における VPTW について行った ANOVA の結果によれば、ばく露経験の主効果は有意であった ( $p < 0.001$ )。一方、年齢 ( $p = 0.611$ )、振動強度 ( $p = 0.300$ )、経過時間 ( $p = 0.793$ ) については、有意な主効果は認められなかった。どの因子の組み合わせにおいても、有意な交互作用は認められなかった。

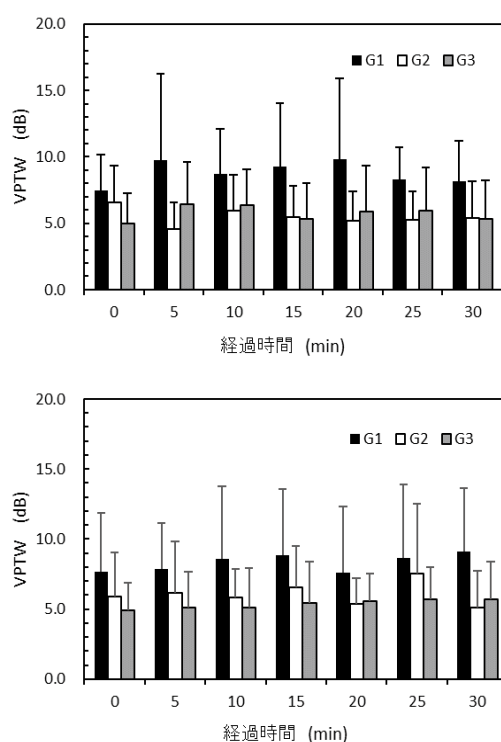


図 7 試験周波数 31.5Hz の時の高 HAV ばく露後の VPTW (a: 上段)および低 HAV ばく露後の VPTW (b: 下段)

#### 4. 考 察

本研究で得られた結果は、VPTW は指先の個々の神経感覚特性に依存しない一種の物理量であるという仮説を支持するものである。特に非ばく露群の VPTW 測定値は、模擬手腕振動ばく露タスク直後の経過時間にかかわらずほぼ一定であったことから、VPTW は手腕振動ばく露の急性影響を受けないことが示唆された (図 6 および 7)。さらに、VPTW は年齢の影響を受けないことも示された。

このことから、VPTW は、手腕振動障害の初期徴候として認められる末梢神経障害のみを有する潜在的な患者を見つけ出すパラメータとなり得る。本研究で得られた結果によると、職業的に手腕振動ばく露した高齢被験者の VPTW は、ばく露していない高齢被験者の VPTW よりも一貫して大きかった。このことは、VPTW が、手腕振動ばく露の長期的影響、例えば、手持ち式振動工具の使用による職業的手腕振動ばく露の影響を受けていることを示唆している。さらに、高齢者ばく露群のみに認められた VPTW の特徴は、試験周波数 125Hz の VPTW が手腕振動ばく露後の経過時間の増加とともに徐々に増加することであった。試験周波数 125Hz の時の VPTW が経過時間の増加とともに徐々に増加した理由を解明するためには、今後の研究が必要であるが、職業的に手腕振動ばく露された高齢被験者の VPTW に認められたこれら 2 つの特徴は、手腕振動障害の初期症状として末梢神経障害のみを有する潜在的な患者を同定するのに役立つ可能性が高い。

手指先端で測定するベースライン VPT は、手腕振動障害を発症している労働者を検出するために広く用いられているスクリーニングパラメータの 1 つである。しかし、すでに言及したようにベースライン VPT では、手腕振動障害の初期症状として知られる末梢神経障害のみを有する潜在的な患者を検出することはできない。本研究で得られた結果によれば、年齢および職業的な手腕振動ばく露経験の有無によって分類された 3 つの被験者群のベースライン VPT の平均値は、年齢および日常的な手腕振動ばく露量が増加するにつれて増加する傾向があった。表 1 に示すように、試験周波数 125Hz で測定した平均ベースライン VPT では、年齢とばく露経験の主効果が認められた ( $p < 0.05$ )。さらに、高齢者ばく露群 (G1) の 125Hz における平均ベースライン VPT は、高齢者非ばく露群 (G2) ( $p < 0.05$ ) および若年者非ばく露群 (G3) ( $p < 0.05$ ) の 125Hz における VPT よりも有意に大きかった。しかし、ベースライン VPT は個人差も大きく広い範囲に分布していた (図 3 参照)。この分散は、神経感覚的、生理学的、生体力学的特性など、個人の特性に影響されるものであり、指の皮膚温度に代表される環境条件にも影響されることが知られている。

試験周波数 125Hz における手腕振動ばく露直後の TTS の回復過程は、時定数  $\tau$ 、ある経過時間での残留閾値移動  $TTS_m$  によって特徴づけられる一次モデルに従うと考えられる。一方、試験周波数 31.5Hz における TTS 回復曲線の相関係数は、G1、G2、G3 それぞれで 0.51、0.46、0.73 であり、125Hz での相関係数と比較して低い値を示した。手腕振動ばく露後の TTS とその回復は、ばく露振動の振幅と試験周波数に影響される。本報では、手腕振動ばく露後の残存 TTS を評価する上で、試験周波数 125Hz での TTS 回復予測で得られる一連のパラメータは、31.5Hz で得られるものよりも有用であることが示唆された。しかし、TTS の時系列変化から得られる回復パラメータは、被験者間およびベースラインの VPT に

よって有意に変化するのも事実である。したがって、試験周波数 125Hz における TTS 回復パラメータは、手腕振動障害の末梢神経障害のみを有する潜在的な患者を検出するために、効果的なスクリーニングパラメータである VPTW と組み合わせて使用するのが有効である。

指先振動感覚閾値測定としては、31.5Hz よりも 125Hz の方が試験周波数として適している。手腕振動ばく露タスクで使用される振動周波数は 6.3Hz~1.250Hz と広く、FA II および FA I 機械受容器の反応域に含まれる。したがって、指先に埋め込まれた FA II および FA I 機械受容器は、手腕振動ばく露によって必然的に影響を受け、その結果、指先の知覚低下が生じ、結果として VPT が上昇する。しかし、試験周波数 31.5Hz で測定した VPT では TTS の回復は認められなかったが、試験周波数 125Hz の VPT では TTS の回復が認められた。これはおそらく、2 種類の機械受容器の感度の違いに関係していると思われる。以前の研究では、指先での VPT 測定において最も感度の高い周波数は 125Hz であったとの報告がある<sup>16)</sup>。

強度の低い手腕振動ばく露後に観察される指先振動感覚閾値の TTS は、測定誤差や被験者の反応のばらつきのため小さく、時には負の値を示すことが報告されている。一次モデルによるカーブフィッティング手法で TTS 回復量を予測することの限界は、TTS データに負の値が存在する場合、TTS の予測値と TTS の測定値の間の相関がかなり低くなることである。これは、式 (3) で与えられる予測モデルが、応答変数の正の領域でのみ定義されるためである。

## 5. まとめ

本研究では、手腕振動障害の感覚神経系初期症状を検出するために、指先の振動感覚知覚閾値 (VPT) を用いた代替指標 VPTW を提案した。VPTW は、上昇法による感覚閾値と下降法による閾値の差にもとづいている。平時の VPT であるベースライン VPT を用いる従来の健診方法では、明らかな VPT の永久閾値移動は症状の進行した手腕振動発症者にしか認められず、振動障害予備群を発見するための指標となり得ないが、新しく提案した指標 VPTW と手腕振動ばく露試験後の VPT 回復係数を組み合わせて評価することにより、年齢の影響を排除して手腕振動障害の感覚神経系初期症状を検出可能であることが示された。

本研究では、VPTW は個々人の指先振動知覚特性に本質的に依存しないことが示された。このことから、VPTW は、手腕振動障害の初期症状として専ら観察される感覚神経系症状のみを呈する潜在的な患者を検出するスクリーニングパラメータとして使用することが可能である。今後、手腕振動への反復ばく露が VPTW と残留閾値移動  $TTS_m$  に及ぼす影響を検討する必要がある。

謝 辞

振動感覚閾値の測定実験における被験者日程調整およびデータ取得の補助にご協力いただいた山口さち子氏 (当時、労働安全衛生総合研究所 環境計測研究グループ 上席研究員) に謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 厚生労働省. 人生 100 年時代に向けた高年齢労働者の安全と健康に関する有識者会議報告書—エイジフレンドリーな職場の実現に向けて—. 2019.  
<https://www.mhlw.go.jp/content/11302000/000585317.pdf> (最終アクセス日 2023 年 7 月 3 日)
- 2) Nilsson, T., Wahlström, J. and Burström, L. Hand-arm vibration and the risk of vascular and neurological diseases—A systematic review and meta-analysis. *PLoS ONE* **2017**, *12*, e0180795.
- 3) Ye, Y. and Griffin, M.J. Assessment of thermotactile and vibrotactile thresholds for detecting sensorineural components of the hand-arm vibration syndrome. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* **2018**, *91*, 35–45.
- 4) *ISO13091-1: Mechanical Vibration—Vibrotactile Perception Thresholds for the Assessment of Nerve Dysfunction—Part 1: Methods of Measurement at the Fingertips.* International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2001.
- 5) Bovenzi, M., Apostoli, P., Alessandro, G. and Vanoni, O. Changes over a workshift in aesthesiometric and vibrotactile perception thresholds of workers exposed to intermittent hand transmitted vibration from impact wrenches. *Occup. Environ. Med.* **1997**, *54*, 577–587.
- 6) Burström, L., Lundström, R., Hagberg, M. and Nilsson, T. Vibrotactile perception and effects of short-term exposure to hand-arm vibration. *Ann. Occup. Hyg.* **2009**, *53*, 539–547.
- 7) Harada, N. and Griffin, M.J. Factors influencing vibration sense thresholds used to assess occupational exposures to hand transmitted vibration. *Br. J. Ind. Med.* **1991**, *48*, 185–192.
- 8) Malchaire, J., Rodriguez Diaz, L.S., Piette, A., Goncalves Amaral, F., and de Schaetzen, D. Neurological and functional effects of short-term exposure to hand-arm vibration. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* **1998**, *71*, 270–276.
- 9) Shibata, N., Hosoya, N. and Maeda, S. Establishment of one-axis vibration test system for measurement of biodynamic response of human hand-arm system. *Ind. Health* **2008**, *46*, 629–634.
- 10) *ISO10819: Mechanical Vibration and Shock—Hand-Arm Vibration—Method for the Measurement and Evaluation of the Vibration Transmissibility of Gloves at the Palm of the Hand.* International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2013.

- 11) Nishiyama, K., Taoda, K., Yamashita, H. and Watanabe, S. The temporary threshold shift of vibratory sensation induced by hand-arm vibration composed of fourone-third octave band vibrations. *J. Sound Vib.* **1997**, *200*, 631–642.
- 12) Nishiyama, K. and Watanabe, S. Temporary threshold shift of vibratory sensation after clasping a vibrating handle. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* **1981**, *49*, 21–33.
- 13) Malchaire, J., Piette, A. and Rodriguez Diaz, L.S. Temporary threshold shift of the vibration perception threshold following a short duration exposure to vibration. *Ann. Occup. Hyg.* **1998**, *42*, 121–127.
- 14) *ISO13091-2* Mechanical Vibration—Vibrotactile Perception Thresholds for the Assessment of Nerve Dysfunction—Part 2: Analysis and Interpretation of Measurements at the Fingertips. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2003.
- 15) Skov, T., Steenland, K. and Deddens, J. Effect of age and height on vibrotactile threshold among 1663 U.S. workers. *Am. J. Ind. Med.* **1998**, *34*, 438–444.
- 16) Hong, C., Xiangchun, Z., Li, D., Yongkui, M. and Jianxin, W. Equal vibrotactile sense thresholds of the fingers and its diagnostic significance for hand-arm vibration syndrome. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* **1995**, *56*, 11–15.