

レーザースペックルフローグラフィーを用いた 累積振動ばく露による振動工具取扱者の手指末梢循環の評価

吉 武 英 隆^{*1}, 道 井 聡 史^{*1}, 白 坂 泰 樹^{*1}, 菅 野 良 介^{*1}
安 藤 肇^{*1}, 野 澤 弘 樹^{*1}, 長谷川 将 之^{*1}, 池 上 和 範^{*1}
大 成 圭 子^{*2}, 足 立 弘 明^{*2}, 大 神 明^{*1}

我が国で、振動障害はチェーンソーによる白ろう病が広く認知されているが、使用時間の制限や機械の低振動化によりそれらは減少傾向にある。一方、製造業を中心にグラインダーなどの振動工具を取扱う作業者は100万人を超えると推定されるが、振動業務健康診断の受診者は約63000人程度にとどまっている。近年、レーザースペックルフローグラフィー (LSFG) を用いた皮膚血流測定に適応可能性が示されたことから、我々はその客観性や簡便性に優れた特徴から振動ばく露による末梢血流変化の早期検出が可能であると考えた。そこで、振動工具取扱者の作業歴、作業頻度から振動ばく露の累積値 (累積振動ばく露量) を用いて末梢血流と累積振動ばく露量との関連を明らかにすること、振動障害の早期検出にLSFGを用いた冷水浸漬検査の有用性を明らかにすることを目的とした。その結果、末梢血流と累積振動ばく露量には明らかな関連を認めなかったが、LSFGの客観性、再現性は振動業務健康診断においてもその利点を活用出来る可能性がある。しかし、実際の活用にはさらなる調査が必要である。

キーワード: 振動ばく露量, 振動業務健康診断, LSFG, スクリーニング, 末梢循環障害.

1 はじめに

振動障害とは、振動工具を使用することで生じる健康障害であり、末梢循環障害や末梢神経障害、筋骨格系障害の3系統への影響が良く知られている。振動障害の歴史としては、主たる症状としてのレイノー現象、しびれ、感覚の鈍麻を1911年にLorigaが世界で初めて報告した¹⁾。我が国ではチェーンソーが普及しはじめた1950年頃より林業従事者の間で確認され、1960年代には手指が蒼白した特徴的な所見から「白ろう病」として社会的な問題となった。1975年に、労働省 (現厚生労働省) から振動工具の連続作業時間規制の通達が出されたこと²⁾や、チェーンソーの低振動化がなされたことなどもあり、林業での新規発症は減少傾向にある。一方、グラインダーなどの振動工具が現在でも多くの産業現場で使用されており、近年でも年間300件近くの労災認定新規発生が認められている³⁾。

我が国では振動工具の取扱い業務に係る特殊健康診断 (以下、振動業務健康診断) が実施されているが、いくつかの課題がある。第一に、振動業務健康診断の未受診者への対応である。本邦において、振動工具を取扱う作業者は、100万人を超えると推定されるが⁴⁾、厚生労働省の調査によると振動業務健康診断の受診者数は約63000人 (平成29年業務上疾病発生状況等調査⁵⁾) である。林業・木材製造業労働災害防止協会の報告では振動業務健康診断の未受診者がいる事業所は全体の57%、また3年以上

振動業務健康診断を受けていない労働者が全体の9.7%存在している⁶⁾。第二に、現在の振動業務健康診断の妥当性に関する問題である。一次健康診断として利用されている爪圧迫検査、指尖振動感覚閾値検査は、検査者による視診による評価や参加者の検査協力が必要となる主観的評価によって実施されており客観性や再現性に乏しいことがある。一次健康診断から二次健康診断に至る統一した判定基準は明確ではなく、健診機関や診療施設によって検査項目や判定基準も異なっている。二次健康診断としては冷水浸漬検査を用いた手指皮膚温測定が利用されてきたが、レイノー現象を呈する振動障害患者を主な対象にした調査結果であるため、レイノー現象陰性の振動工具取扱い作業者がどのような病状経過を辿るかは不明である⁷⁾。精密検査として冷却負荷手指血圧 (FSBP; finger systolic blood pressure %) 検査も存在するが、振動業務健康診断の項目には含まれていない。我々は振動障害の進行を簡便かつ客観的に定量評価可能な新たなスクリーニング手法が振動業務健康診断に必要であると考えた。

先行研究として、振動障害患者を対象にレーザー血流画像化装置を用いて末梢循環を評価しレイノー現象の有無を判断する際に有用性を認めたという報告がなされている⁸⁾。近年、日本において末梢循環評価を行うレーザー血流画像化装置として、レーザースペックルフローグラフィー (Laser speckle Flowgraphy, 以下LSFGと略す。ソフトケア社製, 日本) を用いた網膜血流や皮膚血流の測定の有効性を示す多くの研究が報告されている⁹⁻¹²⁾。従来のレーザードップラー式血流計は、レーザーを照射し、反射光を変換することで血流情報を得ている。LSFGはレーザーを照射し、発生する散乱光同士が干渉することで生じる斑点模様 (スペックル) を利用することで血流量を測定している。LSFGは、非侵襲的かつ短

原稿受付 2020年4月15日 (Received date: April 15, 2020)

原稿受理 2020年6月29日 (Accepted date: June 29, 2020)

J-STAGE Advance published date: August 7, 2020

*1 産業医科大学産業生態科学研究所作業関連疾患予防学

*2 産業医科大学医学部神経内科学講座

連絡先: 〒807-8555 福岡県北九州市八幡西区医生ヶ丘1-1

産業医科大学産業生態科学研究所作業関連疾患予防学 吉武英隆

E-mail: hide-yoshitake@med.uoeh-u.ac.jp

doi: 10.2486/josh.JOSH-2020-0004-GE

時間で測定が簡便といった特徴や正確にレーザーを当てることができれば、どのような条件でも皮膚の血流量が測定できるという特徴をもちつつ、複数部位の画像を同時に撮像できるという点でレーザードップラー式血流計などの従来のレーザー血流計より優れた特徴を持っている。さらに、LSFGは手指の末梢循環の定量的評価が可能であり、振動ばく露による末梢血流変化の早期検出が可能であると考えた。

我が国では厚生労働省により2009年7月10日に「チェーンソー以外の振動工具の取扱い業務に係る振動障害予防対策指針について」が示された¹³⁾。本指針により、振動ばく露の管理として周波数補正振動加速度実効値の3軸合成値を用いる方法が導入された。そして、日振動ばく露量の管理基準として対策値および限界値が示されている。振動障害の発症は、振動工具取扱い期間、振動の強さおよびばく露時間などが影響すると考えられるが、明確な用量反応関係を示した疫学研究は少ない。この点も含めた振動工具の使用による振動ばく露量と振動障害の発症リスクを明らかにする必要がある。

本研究の目的は、振動工具取扱い者のこれまでの作業歴を詳細に調査することで得られた振動ばく露の累積値（累積振動ばく露量）を用いて、末梢血流と累積振動ばく露量との関連を明らかにすることである。加えて、振動工具取扱い作業者に対する振動障害のスクリーニングとして、LSFGを用いた冷水浸漬検査の有用性を明らかにすることである。

2 方法

1) 研究デザインとセッティング

調査期間は2016年6月から2019年2月に実施した。各年夏期（7-9月）と冬期（12-2月）の年2回の調査を実施した。2年6カ月間で全6回の調査を実施した。LSFGを用いた手指冷水浸漬検査は、初回調査で冷水循環装置の改善すべき点を認めたため、装置を新たに再作成した。そのため2016年夏期に行った手指冷水浸漬試験のデータは使用せず、参加者登録と質問紙・問診調査を行った。2016年冬期には装置の作成が完了していたため、LSFGを用いた手指冷水浸漬検査を含む全調査は2016年冬期から開始し、2016年夏期と2016年冬期を合わせて初回調査とすることで全5回実施とした。

2) 参加者

福岡県内の振動工具取扱い業務がある複数の製造・建設業で本研究参加者の募集を行い、73名の男性から参加の申し込みが得られた。参加者の業務は金属製品加工、生産設備保全や設備工事などであった。本研究においては、参加者は振動障害の既往歴がない者と設定した。初回調査にて、質問紙による手指の自覚症状の調査、医師によるインタビュー調査を実施し、振動障害の国際的な振動障害重症度分類であるストックホルムスケール¹⁴⁾において循環障害のstage0（レイノー現象が存在しない）に該当するのは72名であった。除外した1名は、初回調査でストックホルムスケールのstage2であった。参加者

は、振動工具取扱いの有無により調査開始時に振動工具非取扱い群：31名、振動工具取扱い群：41名に分類された。調査開始時から初回調査までに、振動工具非取扱い者1名と振動工具取扱い者3名が参加を辞退し、振動工具非取扱い群の1名が振動工具の取扱い者となった。最終的に、振動工具非取扱い群：29名、振動工具取扱い群：39名、計68名を調査対象とした。

3) 手順

我々は、各調査の前に参加者に生活歴や現病歴、職業歴、自覚症状に関する質問紙と振動工具の取扱い状況に関する質問紙を送付し、回答を収集した。調査日には、各参加者の質問紙の回答について、医師によるインタビュー調査を実施した。続いて、人工気候室内で末梢血流測定検査を実施した。末梢血流測定検査への影響を可能な限り避けるため、ISO14835-1:2016¹⁵⁾の測定基準に則り、参加者には検査前12時間以降は禁酒、検査前3時間以降は禁煙、カフェインなどの刺激物の摂取も避けるよう調査開始前に指示した。

4) 生活歴および職業歴に関する質問紙、健康情報

参加者は郵送された質問紙を調査前に記入し、検査当日に持参した。持参した質問紙の全設問について、産業医資格を有する医師が確認し、内容の不備や不明点があれば本人に聴取し、記載内容について最終的な確認を実施した。用いた質問紙は、振動障害の診断ガイドライン2013⁷⁾の参考資料として用いられている二次健康診断用の自覚症状・業務問診票の内容を採用し、年齢、現病歴、既往歴、現在の喫煙状況などの生活習慣、職業歴について調査した。自覚症状については、手指の冷え、しびれ、痛みについて「全くない」、「まれにある」、「時々ある」、「いつもある」の四件法で尋ねた。毎回の調査時に質問紙とあわせて定期健康診断結果を持参してもらい、一般健康診断の法定項目内容（健康情報）を収集した。

5) 振動工具取扱いに関する質問紙

全参加者に対し、振動工具の過去および現在の取扱いの有無を確認した。初回調査で、振動工具取扱いが有ると回答した参加者に対して、今までに取扱ってきた振動工具の種類と作業内容、作業・休憩時間、保護具の使用状況、振動工具の作業時間記録の有無、振動障害に係る健康診断の受診の有無、振動工具に係る教育受講の有無を確認した。振動工具取扱い状況について、振動工具の種類と型番について尋ねた。初回調査では、調査開始前までの振動工具の取扱い歴を全て把握することを目的とした。初めて振動工具を使用した年から初回調査時点までの、1年毎の振動工具の取扱い状況（振動工具の種類、1日当たりの合計作業時間、使用頻度）を尋ねた。使用頻度は「ほぼ毎日」「週に3~4日」「週に1~2日」「月に1~2日」「数か月に1日」「全くなし」の六件法で尋ねた。初回調査以降の質問紙調査では、現状の振動工具の取扱い歴を把握することを目的とした。前回の調査から今回の調査期間の振動工具取扱い状況について聴取する目的で、振動工具の種類と型番、使用する日の平均作業時間、月平均使用日数、前回の調査から今回の調査期間までの

約半年間で使用した月数を確認した。その他は初回調査と同様の調査を実施した。

6) 累積振動ばく露量の定義

「チェーンソー以外の振動工具の取扱い業務に係る振動障害予防対策指針について」では、1日当たりの振動ばく露を制限する考えにより日振動ばく露量の計算式(1)が定義されている¹³⁾。

$$A(8) = \sqrt{\frac{1}{8} \sum_{i=1}^n a_{hvi}^2 \cdot t_{hi}} \quad (1)$$

a_{hvi} : 周波数補正振動加速度実効値の3軸合成値

t_{hi} : 1日当たり作業合計暴露時間

日振動ばく露量の計算式(2)を用いて参加者が受けた振動ばく露量を推測する研究が報告されており^{16, 17)}、本研究でも同様の手法での振動ばく露量の推測を試みた。

$$\text{Cumulative exposure index(CEI)} = \sum A(8)_i^2 \cdot t_{ai} \quad (2)$$

t_{ai} : 振動工具の年間作業日数

t_{yi} : 振動工具の年間使用日数

振動工具の周波数補正振動加速度実効値の3軸合成値は、2009年の厚生労働省指針にしたがって、各工具メーカーが取扱説明書に表示、もしくはホームページ上で公表している。本研究では、質問紙調査により各振動工具の型番を確認し、周波数補正振動加速度実効値の3軸合成値を取得することを試みたが、質問紙調査で型番に関する情報はほぼ得られなかった。そのため、各振動工具の周波数補正振動加速度実効値の3軸合成値は、2006年に厚生労働省が実施した「振動障害等の防止に係る作業管理のあり方検討会」内の資料に存在する「主な国内メーカーの振動工具の振動レベル」¹⁸⁾の平均値を用いた。また、「振動工具一覧表」¹⁹⁾を参考に、類似の作用機構を持つ工具は同様の周波数補正振動加速度実効値の3軸合成値を用いた。上記資料に含まれていない振動工具が用いられていた場合には、各工具メーカーがホームページ上で公開している振動工具の周波数補正振動加速度実効値の3軸合成値から振動工具の種類別に平均値を求め、換算表を作成した。

1年間の振動工具の使用日数は、質問紙で聴取した使用頻度から、1年間の労働日を240日として、振動工具をほぼ毎日使用した場合は240日、週に3~4日使用した場合は168日、週に1~2日は72日、月に1~2日は18日、数か月に1日は6日、全くなしは0日とした。初回調査以降は、それぞれの振動工具ごとの「1日の平均使用時間」「1ヵ月の平均使用日数」「年間の使用月数」から、前回の調査より増加分の累積振動ばく露量を求めた。

7) 冷水浸漬検査

産業医科大学人工気候室において室温を $22 \pm 1^\circ\text{C}$ に設定し、参加者を部屋で10分以上安静にさせた後、 $15 \pm 0.5^\circ\text{C}$ に調整した水の中に手指から手関節まで浸し5分間の冷水負荷を行った。測定する手は、先行研究⁸⁾において「原則として利き手側」を用いており、本研究でも利き手側を測定とした。我が国では冷水浸漬検査は 10°C 10分法が幅広く使用されている^{20, 23)}が、ISO 14835-1:2016¹⁵⁾

において冷水浸漬検査(水温・時間)は、 $12 \pm 0.5^\circ\text{C} \cdot 5$ 分、 $12 \pm 0.5^\circ\text{C} \cdot 2$ 分、 $15 \pm 0.5^\circ\text{C} \cdot 5$ 分、 $10 \pm 0.5^\circ\text{C} \cdot 10$ 分、の4種類の条件が提示されている。水温が低下し、冷却時間が長いほど参加者の苦痛が大きくなることが知られているため²²⁾、本研究では水温が最も高い条件にて実施した。

水温維持のため、本調査では内寸 $600\text{mm} \times 300\text{mm} \times 190\text{mm}$ の発泡スチロールの水槽を用意し、冷却器にはチラー式のZC-a200(Zensui co. ltd, 日本)、循環ポンプには、エーハイム水陸両用ポンプ1250(EHEIM GmbH & Co. KG, ドイツ)を使用した。なお、予備実験にて冷却装置の稼働性能を評価し、本試験中に水温は設定温度を上回らないことを確認している。

8) LSFGを用いた末梢血流評価

手指皮膚血流の測定にはLSFGを用い、示指、中指、環指全体を含む手掌全体を撮像した。血流測定後はLSFG Analyzer ver. 3(ソフトケア社製、日本)を用いて、各指のMP関節から手指先端の各指全体の皮膚面を選択し、選択範囲内の各調査時点の値を平均した血流パラメータを算出した。

LSFGで得られた血流値は、Mean Blur Rate(MBR)という相対値で示される。撮像した際にシャッター時間内に入ってくるスペckル数により画像の光強度が変化する。移動速度が速いとスペckル数が大きくなり、光強度の変動が小さくなるため、ブレが大きい画像となる。つまり、移動(血流)速度が速いほどブレが大きいということになる。イメージセンサーが検出する光強度の標準偏差の逆数を血流評価量として用い、BR(Blur rate)値としている。BR値はスペckル強度コントラストの逆数であるS/N比(Signal to Noise ratio)という物理的な意味があり、以下の式(3)で表される²⁴⁾。

$$BR_k = \frac{\langle I_k \rangle}{\frac{1}{N} \sum_n |I_k(t_n, v) - \langle I_k \rangle|} \quad (3)$$

k: 画素, I_k : 光強度の平均値

BR値の2乗が血球の移動速度と比例関係にあることが明らかになり、MBR値を使用することとなった。MBRは $2BR^2$ で表される。各参加者の基準値を算出するために、人工気候室内で安静後に3回の連続測定を行った。その後は冷水浸漬検査開始のタイミングを0分とし、冷水浸漬中の5分間と冷水から室温に戻した10分間の計15分間にわたり、1分ごとに4秒間の撮像時間で計15回測定した。

安静時に3回測定した値の平均MBR値を基準値(100)とし、各調査時点の実測MBR値をMBR相対値に変換した(4)。

$$\text{MBR 相対値} = \frac{\text{各調査時点における実測 MBR 値}}{\text{MRB 基準値 (安静時 3 回連続測定の平均 MBR 値)}} \times 100 \quad (4)$$

9) グループ化

(1) 過去CEIによるグループ化(群1)

振動工具取扱い者の振動ばく露による長期的影響を評価するため、初回調査までに得られたCEIを用いてグループ化を行った。CEIが $90000 (\text{m}^2 \text{yr d s}^{-4})$ 以上を過去

高ばく露群, CEIが90000未満を過去低ばく露群, 過去に振動工具取扱い歴がないものを過去非ばく露群とした(図1)。なお, CEI 90000とは, 振動工具を日振動ばく露量限界値 ($5.0\text{m}^2/\text{s}^2$) までほぼ毎日, 15年間にわたって使用したとして算出される。

(2) 現CEIによるグループ化 (群2)

振動工具取扱い者の振動ばく露による短期的影響を評価するため, 前回の調査期間から今回の調査までの期間 (0.5年間) 中のCEI (0.5yr-CEI) を用いて, 調査ごとにグループ化を行った。0.5yr-CEIが750以上を現在高ばく露群, 0.5yr-CEIが750未満を現在低ばく露群, 調査期間中に振動工具取扱い歴が全くないものを現在非ばく露群とした(図2)。なお, CEI750とは, 振動工具を日振動ばく露量対策値 ($2.5\text{m}^2/\text{s}^2$) までほぼ毎日使用したとして算出される。

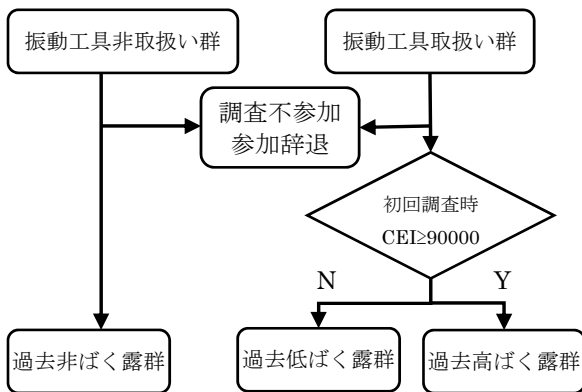


図1 群1のグループ化

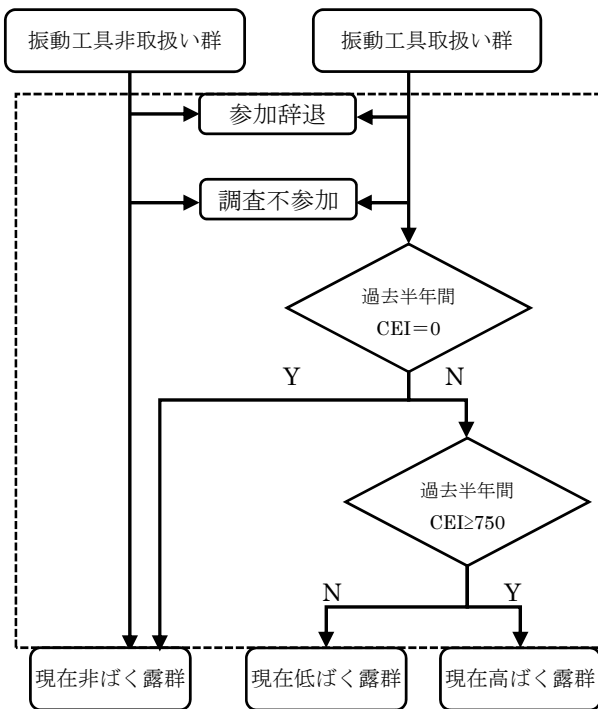


図2 群2のグループ化

注) 初回測定は上記フローで群分けを行った。2回目以降は半年ごとに, 点線枠内を繰り返し確認し, 都度群分けを行った。

10) 研究方法の概要

研究方法の概要を表1に示す。

11) 統計解析

群1では, 過去ばく露の末梢血流に影響を与える要因を評価するために多元配置分散分析 (anova) を行った。目的変数はLSFGの各指標 (冷水浸漬中MBR相対値 (5分平均), 回復5分MBR相対値, 回復10分MBR相対値) とした。説明変数は過去振動ばく露量 (3群), 年代 (30歳未満, 30歳代, 40歳代, 50歳以上), 肥満 (Body mass index ≥ 25) の有無, 糖尿病の有無, 現在の喫煙の有無として処理した。

群2では, 半年ごとの繰り返しデータを評価するために Linear mixed model (LMM) による分析を行った。目的変数は, 各調査期間のLSFGの各指標 (冷水浸漬中MBR相対値 (5分平均), 回復5分MBR相対値, 回復10分MBR相対値) とした。説明変数は, 参加者を random effect として処理し, 振動工具取扱い状況 (3群), 調査時点, 年代 (30歳未満, 30歳代, 40歳代, 50歳以上), 肥満 (Body mass index ≥ 25) の有無, 糖尿病の有無, 現在の喫煙の有無を fixed effects として処理した。その後の多重比較検定は, どちらも Bonferroni法を用いた。統計解析には, IBM SPSS 24.0J (IBM corp. ニューヨーク) を使用した。有意水準は $P < 0.05$ とした。

12) 倫理的配慮

本調査は, 産業医科大学倫理委員会での承認 (H28-036号) を得て実施した。調査参加者には本調査の概要を説明し調査協力への承諾ならびに同意書を取得した上で実施した。

本調査へ不参加を希望する場合には自由意志に基づき中止可能であることや, 参加者自身が検査中に体調不良を認めた時は, 即時検査を中止することを説明した。

3 結果

1) 参加者の基本属性

群1においては, 初回調査に2名が不参加であったため過去非ばく露群が28名, 過去低ばく露群が18名, 過去高ばく露群が20名の全66名であった。基本属性に関しては表2に示す。群2における各群の参加者数は, 現在非ばく露群, 現在低ばく露群, 現在高ばく露群の順に初回調査時が32名, 8名, 26名, 2回目調査が32名, 12名, 17名, 3回目調査が31名, 12名, 13名, 4回目調査が29名, 10名, 11名, 5回目調査が30名, 10名, 7名だった。基本属性に関しては表3に示す。

2) 振動工具取扱い状況

振動工具取扱い者の振動工具作業歴について, 参加者39名中, 1種類だけの振動工具を取り扱った者は4名 (10.3%), 2種類の振動工具を使用した者は8名 (20.5%), 3種類以上の工具を取り扱っている者が27名 (69.2%) であった (表4)。また取り扱った工具の種類の中で頻出のものはグラインダー34名 (87.2%) とインパクトレンチ32名 (82.1%) であった。振動工具使用時の手袋の使用について, 参加者39名中38名 (97.6%) が使用していた。

表1 研究方法の概要

	2016年夏期 初回調査 (第1調査時点)	2016年冬期	2017年夏期 第2調査時点	2017年冬期 第3調査時点	2018年夏期 第4調査時点	2018年冬期 第5調査時点
調査時点						
振動工具取扱いに関する質問紙調査		○	○	○	○	○
振動ばく露 群1の期間	←————→		←————→	←————→	←————→	←————→
群2		←————→	←————→	←————→	←————→	←————→
生活歴および職業歴に関する質問紙調査	○	(○)				
健康情報の取得	○	○	○	○	○	○
LSFGによる血流測定	△	○	○	○	○	○

注) 生活歴及び職業歴に関する質問紙に関しては、2016年夏期に取得できなかった者のみ2016年冬期に調査を行った。
振動工具取扱いに関する質問紙調査で取得する振動ばく露の期間は群1では初回調査以前の期間全て、群2では調査時点より過去半年間である。LSFG: Laser speckle Flowgraphy
LSFGによる血流測定は2016年夏期後に冷水循環装置を再作成したため2016年夏期のデータは使用しなかった。

表2 群1に応じた対象者の基本属性

	過去非ばく露群 (n=28)	過去低ばく露群 (n=18)	過去高ばく露群 (n=20)
	mean (SD) / n (%)	mean (SD) / n (%)	mean (SD) / n (%)
年齢	41.9 (11.2)	36.2 (10.9)	34.8 (7.8)
肥満 (BMI≥25)	10 (35.7)	6 (33.3)	10 (50.0)
糖尿病	2 (7.1)	4 (22.2)	0 (0.0)
喫煙者	5 (17.9)	10 (61.1)	10 (50.0)

注) BMI:Body Mass Index

表3 群2に応じた調査時点毎の対象者の基本属性

	現在非ばく露群	現在低ばく露群	現在高ばく露群
	n / mean (SD) / n (%)	n / mean (SD) / n (%)	n / mean (SD) / n (%)
第1調査時点			
参加者	32	8	26
年齢	42.9 (11.3)	34.1 (8.3)	33.5 (7.6)
肥満 (BMI≥25)	12 (37.5)	1 (12.5)	13 (50.0)
糖尿病	4 (12.5)	2 (25.0)	0 (0.0)
喫煙者	7 (21.9)	6 (75.0)	13 (50.0)
第2調査時点			
参加者	32	12	17
年齢	43.2 (10.9)	33.0 (6.1)	33.9 (8.5)
肥満 (BMI≥25)	12 (37.5)	1 (8.3)	11 (64.7)
糖尿病	4 (12.5)	2 (16.7)	0 (0.0)
喫煙者	6 (18.8)	6 (50)	9 (52.9)
第3調査時点			
参加者	31	12	13
年齢	41.9 (10.7)	33.6 (8.0)	33.0 (6.7)
肥満 (BMI≥25)	11 (35.5)	2 (16.7)	7 (53.8)
糖尿病	4 (12.9)	1 (8.3)	0 (0.0)
喫煙者	5 (16.1)	7 (58.3)	6 (46.2)
第4調査時点			
参加者	29	10	11
年齢	42.3 (10.2)	34.9 (8.7)	32.1 (6.6)
肥満 (BMI≥25)	9 (31.0)	2 (20.0)	7 (63.6)
糖尿病	3 (10.3)	2 (20.0)	0 (0.0)
喫煙者	4 (13.8)	6 (60.0)	5 (45.5)
第5調査時点			
参加者	30	10	7
年齢	43.1 (10.3)	32.9 (6.8)	32.4 (7.3)
肥満 (BMI≥25)	10 (33.3)	4 (40.0)	4 (57.1)
糖尿病	3 (10.0)	2 (20.0)	0 (0.0)
喫煙者	4 (13.3)	7 (70.0)	4 (57.1)

注) BMI:Body Mass Index

38名の主に使用する手袋の種類の内訳は、軍手27名、防振用手袋（防振手袋と振動軽減手袋いずれか）7名、皮手袋2名、ビニール手袋が2名であった。振動工具の定期的なメンテナンスの実施については、26名（66.7%）が実施していた。過去に、振動業務健康診断を1回以上受診したことがある作業者は9名（23.1%）であり、毎年受診している作業者は1名（2.6%）であった。過去に、振動障害に関する教育を受けたことがある参加者は20名（51.3%）であった。

3) 過去累積振動ばく露量分類（群1）による比較

過去非ばく露群、過去低ばく露群、過去高ばく露群の3群において、手指の自覚症状（冷え、しびれ、痛み）が「時々ある」あるいは「いつもある」と回答した参加者の割合は次の通りであった。手指の冷えは、過去非ばく露群3.6%、過去低ばく露群0%、過去高ばく露群0%、手指のしびれは、過去非ばく露群3.6%、過去低ばく露群0%、過去高ばく露群5%、手指の痛みは過去非ばく露群0%、過去低ばく露群0%、過去高ばく露群10%であった。過去非ばく露群、過去低ばく露群、過去高ばく露群の3群間で、各手指のMBR相対値を比較した。全測定手指の

冷水浸漬中MBR相対値、回復5分MBR相対値および回復10分MBR相対値において、中指の冷水浸漬中のみ有意な主効果を認めた（ $P=0.044$ ）。その後の検定では、各群間の有意差を認めなかった。表5に全測定手指のMBR相対値の結果を示す。

4) 現累積振動ばく露量分類（群2）による比較

現在非ばく露群、現在低ばく露群、現在高ばく露群の3群において、手指の自覚症状（冷え、しびれ、痛み）が「時々ある」あるいは「いつもある」と回答した参加者の割合[第1調査時点、第5調査時点]は次の通りであった。手指の冷えは、現在非ばく露群[3.1%、6.7%]、現在低ばく露群[0%、0%]、現在高ばく露群[0%、0%]、手指のしびれは、現在非ばく露群[3.1%、6.7%]、現在低ばく露群[0%、0%]、現在高ばく露群[3.8%、28.6%]、手指の痛みは現在非ばく露群[0%、3.3%]、現在低ばく露群[0%、10.0%]、現在高ばく露群[7.7%、0%]であった。

現在非ばく露群、現在低ばく露群、現在高ばく露群の3群間で、各手指のMBR相対値を比較した。手指の冷水浸漬中MBR相対値、回復5分MBR相対値および回復10分MBR相対値において、現在非ばく露群、現在低ばく露

表4 使用した振動工具の種類と当該工具取扱回数（複数回答）および周波数補正振動加速度実効値の3軸合成値の換算値（回答者数：39名）

振動工具の種類	N=39	周波数補正振動加速度実効値の3軸合成値の換算値 [m/s ²]
削岩機	5	27.4
コンクリートブレード	13	27.4
ピックハンマー	21	30.0
チェーンソー	7	8.5
エンジンカッター	7	4.2
刈払機	8	6.1
コンクリートパイプレータ	11	5.8
インパクトレンチ	32	7.8
エアドライバ	5	7.4
グラインダー	34	6.2
ディスクサンダー	12	4.0
パイプレーションシャワー	1	4.2
ジグソー	6	4.2
スーパーケレン	11	26.5
その他	5	

表5 群1における全測定手指のMean Blur Rate (MBR) 相対値

	過去非ばく露群	過去低ばく露群	過去高ばく露群	P value
	mean (SD)	mean (SD)	mean (SD)	
示指				
冷水浸漬中	47.5 (11.4)	42.5 (9.3)	46.8 (11.5)	0.170
回復5分	73.8 (23.1)	76.0 (23.8)	74.0 (26.8)	0.804
回復10分	123.5 (36.7)	116.1 (22.0)	115.5 (24.5)	0.549
中指				
冷水浸漬中	51.4 (12.7)	45.1 (10.4)	52.5 (13.3)	0.044
回復5分	75.9 (25.9)	74.7 (24.3)	75.6 (23.4)	0.566
回復10分	122.9 (38.1)	115.2 (24.4)	118.4 (23.9)	0.718
環指				
冷水浸漬中	49.9 (11.1)	46.4 (9.5)	50.9 (11.4)	0.176
回復5分	80.0 (23.0)	76.0 (22.3)	80.7 (23.1)	0.541
回復10分	116.0 (26.9)	117.1 (24.8)	113.5 (23.8)	0.850

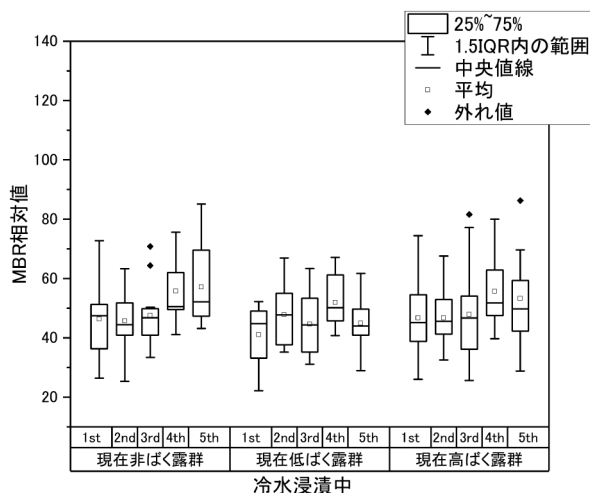


図3 示指の冷水浸漬中MBR相対値の期間中の群別推移
注) MBR:Mean Blur Rate

1st:第1調査時点, 2nd:第2調査時点, 3rd:第3調査時点, 4th:第4調査時点, 5th:第5調査時点

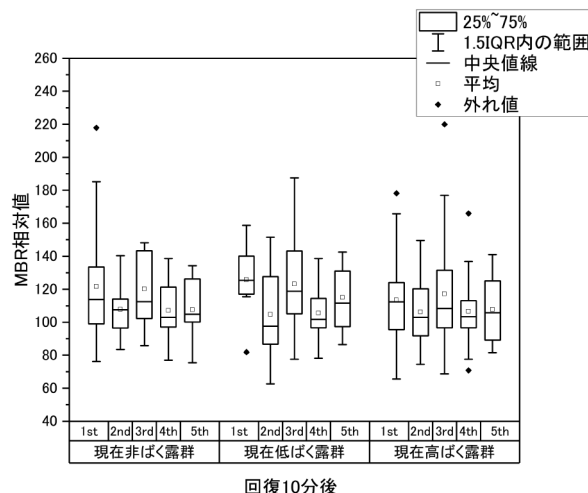


図5 示指の10分回復MBR相対値の期間中の群別推移
注) MBR:Mean Blur Rate

1st:第1調査時点, 2nd:第2調査時点, 3rd:第3調査時点, 4th:第4調査時点, 5th:第5調査時点

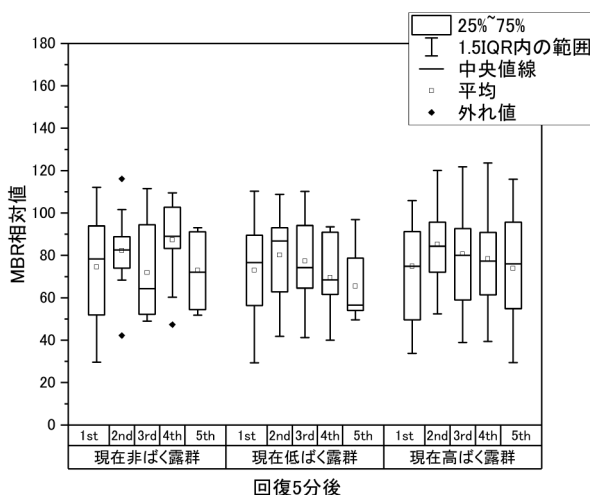


図4 示指の回復5分MBR相対値の期間中の群別推移
注) MBR:Mean Blur Rate

1st:第1調査時点, 2nd:第2調査時点, 3rd:第3調査時点, 4th:第4調査時点, 5th:第5調査時点

群, 現在高ばく露群の3群間の有意な主効果は認められなかった. また, 年代, 肥満, 糖尿病および喫煙の主効果を認めず, これらの各変数と調査時点の交互作用も認められなかった. 図3, 4, 5に, 示指の3群別のMBR相対値の調査時点毎の推移を示す.

4 考察

本調査では, 振動工具ごとに算出される周波数補正振動加速度実効値の3軸合成値と使用頻度を用いて対象者の累積振動ばく露量を推算することを試みた. 本調査対象者の振動工具取扱いは複数の振動工具を使用しており, その中でも3種類以上の振動工具を使用した経験がある作業者が69.2%と約7割を占めた. 製造業においては様々な工具を使用するため, 振動障害をより正確に評価するためには, 複数の振動工具を使用した場合のばく露について正確に評価していくことが重要と考えられ

る.

過去累積振動ばく露量による分類において, 自覚症状は過去ばく露群で手指の痛みがやや高い以外の明らかな傾向は認めなかった. また, 示指, 環指の冷水浸漬検査でのMBR相対値に群間有意差は認められなかった. 中指の冷水浸漬中のみ有意な主効果を認めたものの, その後の検定では有意差を認めておらず, 本研究では, 累積振動ばく露量による末梢循環障害への明らかな影響は認められないと考えた. いくつかの先行研究で, 末梢循環障害の指標であるレイノー現象の発症率は振動工具取扱いの総取扱い時間が延長することにより発症率が上昇することが示唆されている^{16, 17, 25, 26}). しかし, 振動工具の末梢循環への影響は, 振動工具使用中止によって, 症状が回復することが報告されている²⁸⁻³⁰). 加えて, レイノー現象の回復は振動障害の重症度に依存し, 軽症であるほど症状回復が顕著であることが示唆されている³¹). 今回の調査の全参加者において, 医師による問診でレイノー現象が疑われる参加者は認められなかった. これらの結果からは, 末梢循環障害を発症する振動ばく露には一定の閾値が存在することが仮定として考えられ, 過去に累積された振動ばく露量が閾値を越えなければ末梢循環障害を来すまでには至らない可能性が示唆された.

現累積振動ばく露による分類においても5回の測定全てで示指, 中指, 環指全ての冷水浸漬検査でのMBR相対値に有意差は認められなかった. また, 手指の冷え, 手指の痛みは現在高ばく露群であっても第1調査時点から第5調査時点にかけて症状発生は増加しなかった. 振動障害による末梢循環障害は, 長期間のばく露がその発生に関わると知られている. 短期間の振動ばく露において, LSFで検出可能な程度の末梢循環障害は発生しないと考えた. ただし, 現在高ばく露群では, 手指のしびれの症状がある参加者の割合が, 第1調査時点と比べて第5調査時点で高かった. 短期間の影響としては末梢循環障害より末梢神経障害として症状が現れる可能性が示

唆され、神経症状に関する更なる検討が必要である。

本研究において用いたLSFGによる冷水浸漬検査は以下の点で有用性が高いと考えられる。現在、振動業務健康診断の二次健康診断として行われる冷水浸漬後の皮膚温検査では、手指全体の温度データは取得できず指尖のみしか測定することができない。また、振動障害の診断ガイドライン2013においては、精密検査としてサーモグラフィ検査も挙げられている⁷⁾が原理上冷水浸漬中の測定は困難である。LSFGは、手指全体の血流測定が短時間で容易に実施でき、さらに冷水浸漬中でも精緻に測定することが可能である。LSFGの測定結果は数値として示されるため、客観的評価が可能である。レーザーを用いるため非侵襲的であり、さらに検者の技術や経験を必要としない。これらの特徴より、LSFGは一次健康診断においても適用できる可能性があると考えられる。現行の一次健康診断で実施されている末梢循環機能検査としては常温下における手指の皮膚温検査、爪圧迫検査があるが、客観性や再現性に乏しいといった課題があり、LSFGはこれらの課題の解決に寄与する可能性が示唆される。

本研究の強みは、調査期間中の振動ばく露量を2.5年間のコホート調査にて評価した点が挙げられる。調査期間中、毎回の調査時点で作業員自身が記載した質問紙を元に、産業医の資格をもつ医師が振動工具の取扱いを詳細に把握した。また、レイノー現象などの振動障害を発症していない一般作業員を対象とした点も強みとして挙げられる。振動障害患者を対象とした調査ではなく国内製造業の事業場より募集した参加者であるため、実際の産業現場で振動業務健康診断を受けている振動工具取扱い作業員に幅広く応用できる調査内容だと考えられる。

本調査にはいくつかの限界点がある。第一に、本調査の過去の振動工具取扱い歴に関しては、参加者の記憶に基づく自記式の質問紙調査であることから思い出しバイアスが生じている。第二に、参加者が使用した振動工具の機種情報を取得することができなかった点があげられる。当初、参加者が使用している振動工具の機種情報の取得を試みたが、参加者の多くは、メーカーや型式の異なる同種の工具を複数使用しており、また機種情報についても記憶していないため、機種同定は困難であった。そのため、2006年の振動障害等の防止に係る作業管理のあり方検討会資料¹⁸⁾などの周波数補正振動加速度実効値の3軸合成値を利用し、累積振動ばく露量を推定せざるを得なかった。これらの2つの理由から、過去累積振動ばく露量は、正確に評価ができていない。CEI90000という数値は、 $A(8) = 5.0 \text{ m/s}^2$ の振動ばく露を年間240日を15年分に相当する。 $A(8) = 5.0 \text{ m/s}^2$ におけるレイノー現象の10%発生率は、約5.6年³²⁾であり、CEI90000以上の群ではさらに高い割合でレイノー現象の発生が考慮される。しかしながら本研究において、レイノー現象陽性者は参加者72名中0名であったことから、本研究においては、過去累積振動ばく露量を過大評価している可能性が高い。振動工具取扱い状況を正確に記録すること

が作業管理、健康管理を適切に行うために重要と考えられた。第三に、末梢循環評価に用いたLSFGは絶対的な血流量を測定できない。客観的な数値が得られるものあくまで相対値であることから、LSFGを利用する際には縦断的な評価を行うといった検討をしていく必要がある。第四に、本調査で行った冷水浸漬検査は15℃5分法にて手指を冷却しており、10℃10分法と比較して十分な寒冷負荷を実施していない。その理由として、予備実験として参加者5名程度に冷水負荷試験を行ったが10℃10分法に耐えることが難しく今回の調査での使用を断念した。また本研究は、夏と冬に実施したが、各指の回復10分MBR相対値は夏よりも冬に高い傾向を認めたが、各手指の測定点による主効果はいずれも有意でなかった。LSFGの評価値が相対値であることや、サンプル数が少ないことによる第二種過誤によると考えられる。最後に、本研究は血流障害のみを評価対象としているが、振動障害には神経障害、筋骨格系障害が含まれており、それらについては別途評価していく必要がある。

5 結論

累積振動ばく露量に応じた手指末梢循環への影響は認めなかった。LSFGを用いた検査は客観性、評価の簡便性に優れており血流障害の評価方法としては有用であるが、振動障害の早期検出に用いるにはさらなる調査が必要である。

6 謝辞

研究に協力頂いた事業所、従業員に感謝する。本研究は厚生労働科学研究費補助金「振動工具作業員における労働災害防止対策に関わる研究」の助成によって行われた。

文 献

- 1) Loriga, G., Il lavoro coi martelli pneumatici. Boll Ispett Lavoro, 1911. 2: p. 35-60.
- 2) 厚生労働省, 昭和50年10月20日付け労働省労働基準局長通達「振動工具の取扱い業務に係る特殊健康診断の実施手技について」. 1975.
- 3) 厚生労働省. 厚生労働省 業務上疾病の労災補償状況調査結果(全国計) 平成29年度. 2018 cited 2019 July 1); Available from: https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/koyou_roudou/roudokujun/gyomu_00531.html.
- 4) 原田 規章, 産業医学に関する調査研究助成 振動曝露作業員の健康管理における新しい診断体系の確立に関する研究. 産業医学ジャーナル, 2012. 35: p. 58-62.
- 5) 厚生労働省. 厚生労働省 業務上疾病発生状況等調査(平成29年) 特殊健康診断(対象作業別) 第4表. 2018 cited 2019 July 1); Available from: <https://www.mhlw.go.jp/bunya/roudokujun/anzensei11/h29.html>.
- 6) 林業・木材製造業労働災害防止協会. 平成30年度事業報告. 2018 cited 2019 July 1); Available from: <http://www.rinsaibou.or.jp/cont01/items05/pdf/r0/jigyo-hokoku.pdf>.

- 7) 日本産業衛生学会振動障害研究会. 振動障害の診断ガイドライン 2013. 2013 cited 2019 July 1); Available from: http://joh.sanei.or.jp/pdf/J55/J55_6_03.pdf.
- 8) Terada, K., et al., Laser Doppler Imaging of Skin Blood Flow for Assessing Peripheral Vascular Impairment in Hand-Arm Vibration Syndrome. *Industrial Health*, 2007. 45 (2): p. 309-317.
- 9) Kiyota, N., et al., Relationship between laser speckle flowgraphy and optical coherence tomography angiography measurements of ocular microcirculation. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2017. 255 (8): p. 1633-1642.
- 10) Aizawa, N., H. Kunikata, and T. Nakazawa, Diagnostic power of laser speckle flowgraphy- measured optic disc microcirculation for open-angle glaucoma: Analysis of 314 eyes. *Clin Exp Ophthalmol*, 2019.
- 11) Kikuchi, S., et al., Laser speckle flowgraphy can also be used to show dynamic changes in the blood flow of the skin of the foot after surgical revascularization. *Vascular*, 2019. 27 (3): p. 242-251.
- 12) Miyaji, A., S. Hayashi, and N. Hayashi, Regional differences in facial skin blood flow responses to thermal stimulation. *Eur J Appl Physiol*, 2019. 119 (5): p. 1195-1201.
- 13) 厚生労働省. 平成21年7月10日付け労働省労働基準局長通達「チェーンソー以外の振動工具の取扱い業務に係る振動障害予防対策指針について」. 2009.
- 14) Gemne, G., et al., The Stockholm Workshop scale for the classification of cold-induced Raynaud's phenomenon in the hand-arm vibration syndrome (revision of the Taylor-Pelmear scale). *Scand J Work Environ Health*, 1987. 13(4): p. 275-8.
- 15) International Organization for Standardization., ISO 14835-1 :Mechanical vibration and shock - Cold provocation tests for the assessment of peripheral vascular function - Part 1: Measurement and evaluation of finger skin temperature. 2016.
- 16) Su, A.T., et al., Dose-response relationship between hand-transmitted vibration and hand-arm vibration syndrome in a tropical environment. *Occup Environ Med*, 2013. 70 (7): p. 498-504.
- 17) Sauni, R., et al., Dose-response relationship between exposure to hand-arm vibration and health effects among metalworkers. *Ann Occup Hyg*, 2009. 53 (1): p. 55-62.
- 18) 厚生労働省. 振動障害等の防止に係る作業管理のあり方検討会（第4回）2006 cited 2019 8/25); Available from: <https://www.mhlw.go.jp/shingi/2006/07/s0728-17d.html>.
- 19) 厚生労働省. 振動障害等の防止に係る作業管理のあり方検討会（第6回）. 2007 cited 2019 8/25); Available from: <https://www.mhlw.go.jp/shingi/2007/01/s0125-16c.html>.
- 20) Harada, N., M. Yoshimura, and M.S. Laskar, A mini-review of studies conducted in japan using finger-skin temperature during cold-stress tests for the diagnosis of hand-arm vibration syndrome. *Int Arch Occup Environ Health*, 1999. 72 (5): p. 330-4.
- 21) Sakakibara, H., et al., Autonomic nervous activity during hand immersion in cold water in patients with vibration-induced white finger. *Ind Health*, 2002. 40 (3): p. 254-9.
- 22) Laskar, S. and N. Harada, Different conditions of cold water immersion test for diagnosing hand-arm vibration syndrome. *Environ Health Prev Med*, 2005. 10 (6): p. 351-9.
- 23) Miyai, N., et al., Preliminary study on the assessment of peripheral vascular response to cold provocation in workers exposed to hand-arm vibration using laser Doppler perfusion imager. *Ind Health*, 2005. 43 (3): p. 548-55.
- 24) 藤居 仁ら, レーザースペックルフローグラフィの原理, あたらしい眼科, 1998, 15 (2): p. 175-180
- 25) Futatsuka, M., T. Sakurai, and M. Ariizumi, Preliminary evaluation of dose- effect relationships for vibration induced white finger in Japan. *Int Arch Occup Environ Health*, 1984. 54 (3): p. 201-21.
- 26) Griffin, M.J., M. Bovenzi, and C.M. Nelson, Dose-response patterns for vibration- induced white finger. *Occup Environ Med*, 2003. 60 (1): p. 16-26.
- 27) Futatsuka, M. and T. Ueno, Vibration exposure and vibration-induced white finger due to chain saw operation. *J Occup Med*, 1985. 27 (4): p. 257-64.
- 28) Futatsuka, M., T. Ueno, and T. Sakurai, Follow up study of vibration induced white finger in chain saw operators. *Br J Ind Med*, 1985. 42 (4): p. 267-71.
- 29) Koskimies, K., et al., Vibration syndrome among Finnish forest workers between 1972 and 1990. *Int Arch Occup Environ Health*, 1992. 64 (4): p. 251-6.
- 30) Aiba, Y., et al., A study on the effects of countermeasures for vibrating tool workers using an impact wrench. *Ind Health*, 1999. 37 (4): p. 426-31.
- 31) Futatsuka, M., et al, A Follow up Study on the Consequences of VWF Patients in Workers Using Chain Saws in Japanese National Forests. *Ind Health*, 2000. 42 (4): p. 192-95.
- 32) International Organization for Standardization., ISO 5349-1 : Mechanical vibration – Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration - Part 1: General requirements. 2001.

Evaluation of peripheral circulation in the fingers of individuals who handle vibration tools using laser speckle flowgraphy

by

Hidetaka YOSHITAKE*¹, Satoshi MICHII*¹, Taiki SHIRASAKA*¹, Ryosuke SUGANO*¹

Hajime ANDO*¹, Hiroki NOZAWA*¹, Masayuki HASEGAWA*¹, Kazunori IKEGAMI*¹

Keiko OHNARI*², Hiroaki ADACHI*² and Akira OGAMI*¹

“White fingers” is a well-known symptom of Hand-Arm-Vibration-Syndrome (HAVS) in Japan. Although the number of HAVS cases is declining due to limited working time and the invention of HAV tools, it is estimated that there is still over a million workers who use hand-arm vibrating tools in the manufacturing industry. Among these workers, only 63,000 have undergone specific health checkup for vibration. Because of its convenience and simplicity, laser speckle flowgraphy (LSFG) may be an efficient device for detecting early-stage HAVS in peripheral blood flow. This study aimed to evaluate the relationship between peripheral blood flow changes and cumulative vibration exposure and to elucidate the efficiency of the cold water immersion test, using LSFG, in screening vibration damage. In this study, we could not determine a relationship between peripheral blood flow and cumulative vibration exposure. However, the objectivity and reproducibility of the LSFG could be used to the occupational health check-up of vibration diseases. Further investigation is required for the actual use of this examination using the LSFG.

Key Words: vibration exposure, vibration occupational health screening, LSFG, screening, peripheral circulatory disorders.

*1 Department of Work Systems and Health, Institute of Industrial Ecological Sciences, University of Occupational and Environmental Health, Japan

*2 Department of Neurology, University of Occupational and Environmental Health School of Medicine, Japan