

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合事業）
分担研究報告書

振動工具作業者における労働災害防止対策等に関わる研究

研究分担者 池上和範

産業医科大学 産業生態科学研究所 作業関連疾患予防学 講師

道井聡史

産業医科大学 産業生態科学研究所 作業関連疾患予防学

研究要旨

振動工具取扱い者における振動障害の早期スクリーニングに対する、非侵襲的かつ客観的な測定が簡便といった特徴をもつレーザー血流画像化装置による血流検査の有効性について、検討を行った。

1. 方法

1.1. 対象および調査方法

福岡県内の事業所及び労働衛生機関に調査協力を依頼し、研究への参加同意が得られた成人男性 65 名を対象とした。対象者を、「取扱い群」（振動工具取扱い作業経験がある成人男性 35 名：平均年齢 34.9 ± 11.4 歳）と、「対照群」（過去の業務で振動工具を一度も取り扱ったことがない成人男性 30 名：平均年齢 42.3 ± 11.6 歳）の 2 群に分けた。

1.2. 調査日時

第 1 回調査は 2016 年 8 月から 11 月まで実施した。

1.3. 質問紙及び面接調査

あらかじめ質問紙を自宅に郵送，調査前に記入し調査日当日に持参するように指示した。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。

1.3.1. 対象者の基本属性に関する質問紙（図 1，図 2）

振動障害の診断ガイドライン 2013 の参考資料¹⁾として用いられている二次健診用の自覚症状・業務問診票を用いて自覚症状を尋ねるとともに，氏名，年齢，現病歴，既往歴，飲酒および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。自覚症状の記載において，「レイノー現象」「冷え」「しびれ」「痛み」のいずれかの症状に「あ

る」と記載した被験者を「自覚症状の

訴えあり」と定義した。

1.3 現在までの振動工具の取り扱いに関する質問紙（図3a～3d）

「チェーンソー以外の振動工具の取り扱い業務に係る 振動障害予防対策指針対象工具」²⁾を参考に該当する主な振動工具を抽出した。それらの振動工具の使用歴について「ほぼ毎日,週に3～4回,週に1～2回,月に1～2回,数か月に1回,全くなし」の6段階で頻度を尋ね,さらに使用した場合の1日の連続作業時間及び合計作業時間について各年齢で記載できるよう質問紙を作成し調査した。

1.4. 末梢血流評価

1.4.1. 測定方法

産業医科大学内の人工気候室を用いて室温を 22 ± 1 に設定し,部屋で10分以上安静にさせた後,15 に調整した水の中に手関節まで浸漬させ5分間の冷水刺激を与えた(15 5分法)³⁾。末梢血流への影響を可能な限り避けるため,検査12時間前以降は禁酒,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前に指示した³⁾。冷水浸漬により気分不良や耐え難い疼痛を認めるなど被験者自身が検査の継続が不可能だと判断した際には即時中止できることを説明した。

我が国では冷水浸漬検査は10 10分法が広く使用されているが,国際的な標準規格(ISO: International Organization for Standardization)において冷水浸漬検査(水温・時間)は, 12 ± 0.5 5分, 12 ± 0.5 2分, 15 ± 0.5 5分, 10 ± 0.5 10分の4種類の条件から選択することが推奨されている³⁾。水温が低下するほど被験者の苦痛が大きく,検査への忍容性が低くなるため本研究では最も水温が高い条件にて実施した。測定する手指に関しては,「振動障害の検査指針検討会報告書(平成18年3月 厚生労働省)」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。

各対象者の基準値を算出するために安静後に室温で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分間と冷水浸漬を終了し室温に戻した状態の10分間の計15分間に亘り,1分ごとに4秒間の撮像時間で計15回測定した。測定のプロトコルを図4に示す。手指皮膚血流の測定にはLSFG(ソフトケア社製LSFG-PI-E)を用い,示指,中指,環指全体を含む手掌全体を撮像した。

撮像部位は示指から環指に及ぶ手

掌側全体を含む部位とし、レーザー光はスキャナーヘッド部を測定部位から約 30cm の距離で平行になるように固定したうえで、レーザー光があらかじめ設定した手掌部のスキャン領域から外れないようにするために、中指の近位指節間関節にマーキングを付け測定機械から出されるレーザーポインターにより対象物（手指の皮膚表面）と測定機械の距離は一定に保たれるよう調整した（図 5 および図 6）。なお、測定画像はリアルタイムで確認できるため、水面の波紋や手指が動いた場合などにより画像のブレが生じて測定結果への影響が出たと判断した場合には直ちに再測定を行った。

1.4.2. レーザースペックルフローグラフィ（LSFG）について

LSFG とはレーザー血流画像化装置の一つで、微小循環動態を 2 次元的な画像として可視化できる血流測定装置である。臨床ではすでに眼科領域で網膜血流や中心窩下脈絡膜血流量、網膜血流の評価に用いられている。従来の一点型のレーザー血流計では、指の限局されたごく一部の血管における循環動態しか観察できなかったが、この装置は、非侵襲的で頻回測定ができ、また広範囲の血流分布を捉えられるという特徴がある。本研究ではこの点に着目し、どの指にどのような範囲

で障害が及んでいるかを判別することを試みた。

1.5. 解析方法

1.5.1. 生涯振動ばく露量の算定方法

本研究において、各工具における振動ばく露量を自記式質問紙の記載内容より以下のように定義した。

振動ばく露量 $[m/s^2 \cdot h]$ = 周波数補正振動加速度実効値の 3 軸合成値 $[m/s^2]$ × 1 日の合計作業時間 $[h]$ × 使用頻度・・・（式 1）

各年齢で使用した全ての工具類に対して、個人ごとに式 1 を用いて振動ばく露量を算出した。さらに、その累積量（総和）を生涯振動ばく露量と定義し、解析に使用した。

生涯振動ばく露量 $[m/s^2 \cdot h]$ = （各年齢における使用した全ての工具類の振動ばく露量）・・・（式 2）

2009 年に厚生労働省より出された「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（基発 0710 第 2 号）」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 $(A(8))$ $[m/s^2] = a \times T/8$ が定義されているが、本研究では質問紙より回答される

「1日あたりの使用時間」は、年間の平均的な使用時間である点と、各年齢での正確な使用日数が算出困難なため、日振動ばく露量の概念は使用せずに(式2)により質問紙による観察期間中の累積ばく露量を、「生涯振動ばく露量」として相対値的に利用した。式1における周波数補正振動加速度実効値の3軸合成値は、上記の2009年に厚生労働省指針(基発0710第2号)に準拠しており、各工具メーカーがホームページ上で公開している値から中央値をとり、各工具の換算表を作成した(表1)。

質問紙で用いた頻度に関する表現を、「ほぼ毎日」が1.00となるように週5日、あるいは労働基準法で定めるところの1年単位の変形労働時間制の労働日数の限度である280日を用いて、表2のごとく相対値化をおこなった。

1.5.2. 末梢血流の評価方法

血流測定後は専用の解析ソフト(LSFG Analyzer ver.3)を用いて、各指のから遠位の皮膚面(末節部領域とする)および各指全体の皮膚面(全体部領域とする)を選択し(図7)、選択範囲内の各測定点の値を平均した血流パラメータを算出した。

LSFGで得られた血流パラメータはMean Blur Rate(MBR)として単

位の相対値として表示され、個人間比較は難しいとされている^{12,13}ため、安静後に3回連続で測定した結果の平均値を基準値とし、基準値からの減少割合を下記のように減少率(%)として求め、個人間の評価として使用した。

基準値 = 10分安静直後に3回連続で測定したMBR値の平均値・・・

(式3)

減少率(%) = {(各測定時におけるMBR値 ÷ 基準値) - 1} × 100・・・

(式4)

1.5.3. 統計学的解析

MBRの減少率を従属変数、取扱い群・対照群を独立変数とし、計15分間の各測定点において反復測定分散分析を用いて評価した。また、血流変化と振動工具の取扱いの関係を調べるために、冷水漬浸負荷中に最も低い値を示したMBRを「最低値」とし、以下の4項目を算出した。各々で差の検定をStudent's t-testを用いて行った。

最低血流値(%) = {(最低値 ÷ 基準値) - 1} × 100・・・(式5)

5分回復率(%) = (室温5分のMBR値 ÷ 最低値) × 100・・・(式6)

10分回復率(%) = (室温10分のMBR値 ÷ 最低値) × 100・・・(式7)

10 分値(%) = {(室温 10 分の MBR 値 ÷ 基準値) - 1} × 100
(式 8)

また、最低血流値(%), 5 分回復率(%), 10 分回復率(%), 10 分値(%)を従属変数とし、生涯振動ばく露量、年齢、喫煙状況、自覚症状の有無を独立変数とした重回帰分析を行った。解析ソフトには IBM SPSS statistics ver23.0 を用いた。

1.6. 倫理的配慮

本研究は第 2 章における神経伝達速度の調査も含め産業医科大学倫理委員会の承認を得ており (H28-036 号), 個人情報の取扱いおよび保管には万全の配慮を行った。参加の意志を表明した被験者に本研究の説明文書を送付し、事前に趣旨を説明した上で同意書を得た。

2. 結果

2.1. 対象者の属性

年齢、現在の喫煙状況、自覚症状の有無といった本研究の基本属性を表 3 ~ 表 5 に示す。年齢に対しては Student's t-test、喫煙状況と自覚症状の有無に関してカイ二乗検定を行った結果、年齢と喫煙割合に有意差を認め、対照群に比べ取扱い群は年齢が低く、喫煙割合が高かった。自覚症状の有無は有意差を認めないものの、取扱い群の自覚症状が多い傾向であった。

2.2. 取扱い群の振動工具取扱い作業歴および生涯振動ばく露量

取扱い群の振動工具作業歴について、作業者ごとの使用経験のある工具数(表 6)および振動工具ごとの取扱い者数(表 7)に示す。被験者 35 名中、1 種類のための振動工具を取り扱った者は 8 名 (22.9%) であり、5 種類以下の振動工具を使用した者は 30 名 (85.7%) であった。振動工具取扱者が複数の工具を取り扱っている者が多数であった。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とインパクトレンチであった。

また、生涯振動ばく露量の分布を図 8 に示す。今回の被験者は生涯振動ばく露量として 20000[m/s²・h]以下の者が大半であった。

2.3. 血流速度の減少率の比較

2.3.1. 取扱い群と対照群の血流速度の減少率の比較

各測定領域における冷水浸漬検査中及び検査後の血流速度の減少率の推移を図 9 ~ 14 に示す。

群間での血流速度の減少率の推移を確認するために反復測定分散分析を行った。Mauchly の球面性検定の結果でいずれも有意差を認めたため、Greenhouse-Geisser 法によって補正し有意確率を求めたところ、いずれの測定領域でも取扱い群と対照群の減少率の推移に有意差を認めた（表 8）。

取扱い群と対照群の減少率を比較するために Student's t-test を行った（表 9 ~ 表 14）。末節部領域では水中 1~5 分、全体部領域では、示指と中指の水中 1 分、水中 3 分、室温 6 分、室温 9 分、環指では水中 1 分、水中 3 分、室温 6 分で減少率に有意差を認めた。

取扱い群において、室温 6 分値に減少率が一過性に低下している所見を認めた。

2.3.2. 現在取扱い使用者と過去取扱い使用者との血流速度の減少率の比較

振動工具の使用歴があるが現在使用していない過去使用者は、今回の調査では 3 名のみと非常に少なく、統計

学的な比較を行うことが難しいため、現在使用者の平均変化量およびその標準偏差と、過去使用者の個別データを比較検討した。示指末節部領域における血流速度の減少率を比較した結果を表 15 に示す。過去使用者は、全て現在使用者の平均値 $\pm 2SD$ 内にあり、本研究において両群間の血流変化の相違は見られなかった。

2.4. 血流変化の評価項目の比較

最低血流値、5 分回復率、10 分回復率、10 分値の各々に対して Student's t-test による比較結果を示す（表 16）。最低血流値及び 5 分回復率、10 分回復率は全ての測定領域で取扱い群と対照群の間で有意差を認め、対照群の方が高値を示した。

2.5. 生涯振動ばく露量と血流変化の評価項目の比較

生涯振動ばく露量、年齢、現在の喫煙状況、自覚症状の有無を独立変数とし血流変化の評価項目を従属変数とした重回帰分析を行った。ステップワイズ法では独立変数が採択されない場合を認めたため、強制投入法での分析結果を表 17 ~ 19 に示す。

生涯振動ばく露量が全ての測定領域で 5 分回復率に負の t 値を示しており、生涯振動ばく露量が減少するほど 5 分回復率が上昇するという負の相関

があった。それぞれの測定領域で生涯振動ばく露量の標準偏回帰係数()を比較したが、いずれも-0.3 前後の値を示しており回復率の違いは認められなかった。

年齢は環指末節部領域において負の t 値を認め、加齢に伴い 10 分値の血流速度が低下する傾向があった。自覚症状の有無は示指末節部領域および環指全体領域・環指末節部領域において 10 分回復率に負の t 値を認めた。

現在の喫煙状況はいずれの測定領域でも有意差を認めなかった。

3. 考察

3.1. 取扱い群の振動工具取扱い作業歴および生涯振動ばく露量

取扱い群の 70%以上が複数の振動工具を使用しており、その中でも 5 種類以上の振動工具を使用した経験がある作業者が 40.7%を示した。また、本研究ではグラインダーやインパクトレンチといった片手で保持する工具の使用経験がある人数が 90%以上を占めた。先行研究では、大型工具使用者を対象としている研究が多く短期間のうちに振動障害の発症が認められる傾向であった^{14,15}が、本調査では大型工具使用者よりも小型工具使用者の割合が多いため、症状出現に至るまでの期間が長期間に及ぶ可能性も考えられる。

生涯振動ばく露量については、数値にして 20000 [$\text{m/s}^2 \cdot \text{h}$] 未満以下の者が大半を占め、高頻度短期間ばく露型というより低頻度長期間ばく露型の傾向が覗えた。このことは今後、研究を進めていく過程で調査分析方法を再考する必要がある。

3.2. 取扱い群と対照群の末梢血流評価の比較

末梢血流速度は冷水浸漬により著しく低下し、室温に戻すと急速に回復し、ほぼ 5 分でプラトーに達していたという結果が得られた。このような傾向は、従来の冷水浸漬法である 5 10 分法や 10 10 分法による冷水浸漬検査を用いて得られる手指皮膚温と同様であり、今回採用した 15 5 分法の妥当性を示したと思われる。なお、取扱い群において、室温 6 分値に減少率が一過性に低下している所見を認めた。明らかな機序は不明であるが、手指が冷却状態から室温に戻る過程で一時的に血管の攣縮を起こし血流速度の減少率が悪化する可能性が示唆される。

レイノー現象でも皮膚温の低下とともに血液量減少による皮膚の蒼白化を認めること¹⁷から、従来の検査と合わせて本法を血流評価として利用できる可能性が考えられる。また、LSFG では冷水浸漬中でもリアルタ

イムでの血流測定が実施できるため、しびれや痛みなどの自覚症状の出現を認めた際にはその経過に至るまでの詳細な血流変化も評価できると考えられる。

本研究では、取扱い群と対照群との減少率の比較ではいずれの指の末節部領域でも冷水浸漬中に有意差を認め、取扱い群の方が対照群より冷水による血流変化が小さいという結果が見られた。冷水浸漬中の減少率が上昇した要因には、取扱い群は振動ばく露により血管収縮の反応性が低下しているため血液量は減少しにくい。LSFGにより算出されるMBRはあくまで相対値であり個人間の比較ができないため、取扱い群は安静時から手指の血流量の低下を認めており冷水浸漬によるさらなる低下は起こりにくい。取扱い群と対照群の年齢構成や喫煙状況といった基本属性の違いがある、など三つの要因が考えられる。

取扱い群中における現在の振動工具使用歴により過去使用者と現在使用者を比較したところ、血流変化の相違は見られなかった。今後も調査を継続していく中で、調査時点で振動工具の使用をしていない過去使用者が増えていくことが予想されるので適宜解析を加えていくこととする。

3.3. 生涯振動ばく露量と末梢血流評

価の比較

重回帰分析の結果から全ての測定領域で生涯振動ばく露量が5分回復率と有意差をもって負の相関を示したことから、累積した振動工具の取扱い量により手指の血流の回復率が減少する可能性が示唆された。示指末節部以外の測定領域でも10分回復率が生涯振動ばく露量と負の相関を示していることから、累積した振動ばく露量が血流回復の減少に繋がると考えられた。

10分回復率は生涯振動ばく露量の増加と自覚症状の存在により低下しており、自覚症状の存在は示指末節部領域および環指全体部領域・環指末節部領域における10分回復率に負の相関を認めた。環指末節部領域では、その他の独立変数は採択されていないため、年齢による影響のみを評価できると考えられた。

喫煙は末梢の循環動態に影響することは知られている。調査第1回目の結果では現在の喫煙の有無はいずれの末梢血流評価でも多変量解析上有意差を認めなかった。被験者は検査前3時間以降の喫煙を禁止しており、喫煙による影響があるとすれば、急性影響というよりも喫煙習慣による慢性影響の要因が大きいと予想された。しかしながら、喫煙の本研究結果への介入効果は小さいと思われた。

以上より LSFG を用いた検査と質問紙による評価方法は、予防的観点からその有用性が高いことが示唆された。

3.4. 今後の展望

今後の調査において振動ばく露量をより正確に調査するには、客観的な生涯振動ばく露量情報を収集することが不可欠と思われる。また、LSFG で出力される血流量は相対値であり、絶対値ではないため個人間血流量を比較することが困難であるため、LSFG 以外の測定機器で安静時の血流を評価し、それらの結果と LSFG の結果を組み合わせることで個人間比較が可能になるのではないかと考えられる。今後の調査では血圧・血糖値・脂質などの生化学的検査も含めた健康診断結果の取得に努める予定とする。

本研究は、今後も同一対象者を一定期間に渡って調査する予定である。上述の点を解踏まえ、不足している検査情報を引き続き収集し、振動工具によ

る急性影響や健康診断結果の把握など調査項目を追加することで新たな知見の発見に繋げていきたい。

参考文献

1. 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
2. 労働基準局. 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. 平成 21 年 7 月 10 日 基発 0710 第 2 号. 2009
3. ISO. Mechanical vibration and shock –Cold provocation tests for the assessment of peripheral vascular function –Part 1: Measurement and evaluation of finger skin temperature. ISO 14835-1:201. 2016