体表循環モニターシステムの開発と応用

第2報 診断的応用

Development of a System for Monitoring the Body Surface Circulation and Its Application Part 2 Diagnostic application

金沢大学医学部公衆衛生学教室

中 村 秀 喜

Hideki Nakamura

Department of Public Health, School of Medicine, Kanazawa University, Kanazawa

Using the system which I developed for the monitoring of body surface circulation, the peripheral circulatory function of workers who used vibrating tools was studied at rest, and then the peripheral circulatory movements during handgrip and local vibration exposure were examined. Workers using vibrating tools were divided into three groups; group A without any symptoms, group B with numbness and/or pain but without Raynaud's phenomenon, and group C with Raynaud's phenomenon.

The results obtained were as follow;

1) In fifty-six workers using vibrating tools, the skin temperature showed no significant differences among the three groups but the finger blood flow of group C was significantly less than that of group A ($p < 0.01$).

2) In a short-term handgrip test using a hand dynamometer with a constant strength, the skin temperature showed no significant change. The finger blood flow of group A and group B significantly decreased as compared with the value at rest but that of group C showed no significant change.

3) In a five-minute handgrip test using a hand dynamometer with a constant strength, the finger blood flow of six workers with no symptoms significantly decreased from one minute after the start of the test as compared with the value at rest and maintained its significantly low level. Thereafter, the skin temperature significantly fell from two minutes after the start of the handgrip test and continued to fall during handgrip. After the end of handgrip, the finger blood flow returned to the level at rest and the skin temperature significantly rose as compared with the value at rest.

4) In the exposure to local vibration (60 Hz, 50 m/sec²) of eighteen workers using vibrating tools, the finger blood flow of group A significantly increased after the start of exposure but group C did not show any increase. The finger blood flow of group B showed a slight increase but it was not significant.

It was concluded that the newly developed system for monitoring the body surface circulation was useful not only for diagnosis of peripheral circulatory disorders but also in the elucidation of its pathogenesis.

Key words: Local vibration, Handgrip, Finger blood flow, Skin blood flow, Skin temperature

局所振動, 把持, 指血流量, 皮膚血流量, 皮膚温

緒 言

末梢循環動態の指標として従来より皮膚温や指尖容積

脈波などが用いられてきた^{1,2)}が, 近年, 組織酸素分圧の測定による末梢循環障害の診断^{3,4)}や, サーモグラフィ⁵⁾, 深部体温計^{6,7)}を用いた組織血流量の推定も試みら

れている。また、障害部位の組織血流量についてはアイソトプクリアランス法⁸⁾や水素クリアランス法⁹⁾を用いた安静時の血流量の観察が行われている。これまで皮膚温や組織酸素分圧などについては連続的モニターすることが可能であったが、組織血流量については困難であった。そこで、著者が開発した指などの局所皮膚血流量の絶対値を連続的にモニターすることが可能な体表循環モニターシステム¹⁰⁾を、振動障害における末梢循環障害の診断や病態の解明に応用し、その有用性に関して検討を行った。

振動障害はチェンソー、刈払機、削岩機、タイタンパーなどの手持振動工具の使用に起因する障害であり、末梢循環障害、末梢神経障害および運動機能障害を主症状とするが、なかでもレイノー現象に代表される末梢循環障害は基本的な症状と考えられ、その病態の解明やレイノー現象の非発作時の診断に関心が持たれている^{1,11)}。また振動工具の把持そのものの末梢循環への影響や局所振動暴露中の末梢循環動態に関して組織血流量の面から検討した報告は見られない。そこで著者は、体表循環モニターシステムを用いて振動工具使用者を対象に安静時の指皮膚温と指の局所皮膚血流量（以下指血流量）を観察した。つぎに握力計把持中および局所振動暴露中の指血流量を指皮膚温とともに連続的に観察し、検討を行った。以下その成績について報告する。

対象および方法

1. 振動工具使用者における指血流量および指皮膚温の測定

1) 対 象

40歳から69歳までの振動工具（主にチェン・ソー）使用者で、全員男性である。被験者56名を、年齢階級・工

具使用期間をマッチさせて、無症状の40～69歳（平均55.6歳）の28名（A群）、蒼白発作はないがしびれや痛みのある41～65歳（平均54.6歳）の14名（B群）、蒼白発作のある45～65歳（平均55.7歳）の14名（C群）になるように選定した（Table 1）。また、工具使用期間はA、B、C各群においてそれぞれ11年～30年（平均19.6年）、11年～30年（平均19.9年）、11年～30年（平均20.3年）に及んでいる。

2) 測定方法

昭和50年10月20日付労働基準局長による基発第609号¹¹⁾で、「振動工具の取扱業務に関わる特殊健康診断の実施手技について」が通達されている。その通達に従って室温23℃±1℃の部屋で30分以上安静にさせ、また測定前1時間は禁煙させた。

a. 指血流量

指血流量は、Peltier stack を利用した熱拡散法に基づき、吸入式水素ガスクリアランス法¹²⁾で絶対値較正を行った体表循環モニターシステムを用いて測定した。被験者は座位にて両手を膝の上に置き、安静を保った。熱拡散センサーは皮膚との接触面にケラチンクリームを塗布し、III指中節背面の皮膚に両面接着リングを用いて装着した。指血流量はペンレコーダー（BMS, AHR-180）を用いて連続的に記録した。

b. 指皮膚温

皮膚温はデジタル温度計（宝工業, D111）を用いて測定し、III指中節側面にサーミスタセンサーの感温部を十分密着させ、紙テープで固定し連続的にモニターした。

3) 実験方法

血流および皮膚温の2つのセンサーを装着後、指血流量および指皮膚温の安静時のレベルを観察し両者が安定したことを確認した後、短時間の把持の影響を調べるために座位のまま握力計を10 kgの力で握らせ指血流量および指皮膚温を観察した。指血流量が安定した時点で指皮膚温を記録し把持を中止した。握力計を握る際に、手の高さは膝と同じとなるように行った。なお、測定は原則として右手で行ったが、左手のみに症状を有する場合は左手で行った。

2. 振動工具使用者における握力計把持中の指血流量および指皮膚温の測定

1) 対 象

47歳から53歳までの振動工具（主にチェン・ソー）使用者6名で、全員男性であり、工具使用期間は3年から15年に及んでいる。またこれらの被験者は全員無症状である。

Table 1 Skin temperature and finger blood flow test classification of 56 workers using vibrating tools. The numeral in each column represents No. of cases.

Group age	A	B	C	Group ‡ years	A	B	C
≤ 50	8	2	2	< 20	13	6	3
≤ 60	12	8	8	< 25	10	6	5
< 70	8	4	4	25 ≤	5	2	6

A, group with no symptoms; B, group with numbness and/or pain without Raynaud's phenomenon; C, group with Raynaud's phenomenon, ‡ years; period of using vibrating tools.

2) 測定方法

指血流量, 指皮膚温の測定方法等は1-2) と同じである。

3) 実験方法

1-3) と同様に血流および皮膚温の2つのセンサーを装着後, 指血流量および皮膚温の安静時のレベルを観察し両者が安定したことを確認した後, 座位のままで握力計を10 kg の力で5分間握らせ, 指血流量および皮膚温を観察した。さらに把持中止後の2分間についても指血流量および皮膚温を観察した (Fig. 1)。

Fig. 1 Protocol of the study (see text for explanation).

3. 振動工具使用者における手腕系局所振動暴露中の指血流量および指皮膚温の測定

1) 対象

41歳から66歳までの振動工具 (主にチェン・ソー) 使用者18名で, 全員男性である。被験者を, 年齢階級・工具使用年数をマッチさせて, 無症状の41~62歳 (平均56.3歳) の6名 (A群), 蒼白発作はないがしびれや痛みのある44~64歳 (平均57.8歳) の6名 (B群), 蒼白発作のある50~66歳 (平均58.8歳) の6名 (C群) になるように

Table 2 Skin temperature and finger blood flow test classification of 18 workers using vibrating tools during the local vibration exposure. The numeral in each column represents No. of cases.

Group age	A	B	C	Group ‡ years	A	B	C
≤ 50	1	1	1	< 20	4	3	5
≤ 60	2	3	2	< 25	1	2	1
< 70	3	2	3	25 ≤	1	1	0

A, B, C & ‡ years: refer to Table 1.

選定した (Table 2)。また, 工具使用期間はA, B, C各群においてそれぞれ3年~30年 (平均13.2年), 4年~30年 (平均13.8年), 7年~22年 (平均15.5年) に及んでいる。

2) 振動暴露方法

振動暴露装置は動電型加振機 (EMIC 541-A, 加振力 7.5 kg, 使用振動周波数範囲5-5000 Hz), 増幅器 (TA-CHIKAWA TA-100), オッシレーター (TRIO AG202A), 振動計 (EMIC 505-D) より構成されている。加振機の振動板上に直径40 mmの円柱ハンドルを有するアクリル製の手部加振装置を試作して固定し, これに振動レベル測定用の加速型ピックアップ (EMIC 541-A) を取り付け, 振動計 (EMIC 505-D) により加振中のハンドルの振動レベルを監視した。

被験者には座位で右腕 (あるいは左腕) を右下前方 (あるいは左下前方) にのぼしてハンドルを軽く握らせ, 振動を暴露した。ハンドルにはストレインゲージを貼付し, ひずみ増幅器 (San-ei 6M57A) で増幅後の出力を被験者の前に置いたビジグラフ (San-ei 5L30) に表示し, 暴露中の握り方がほぼ一定になるように配慮した。また, 被験者にはハンドルを握る前に握力計を用いて5 kgの握力を確認させ, 各被験者の把持力がほぼ一定となるように配慮した。

3) 測定方法

指血流量, 指皮膚温の測定方法等は1-2) と同じである。

4) 実験方法

Fig. 1 に示したように被験者にはハンドルを一定の把持力で握らせ, 指血流量がほぼ一定となった時点で, 右手 (あるいは左手) X方向 (International Standard Organization (ISO) の基準¹³⁾) に5分間の負荷を行った。負荷終了後5分間は把持したままの状態を保ち, その後膝の上に置き安静とした。なお, 局所振動は原則として右手に負荷したが, 左手のみに症状を有する場合は左手に負荷した。

4. 統計処理

統計学的検定にはノンパラメトリック法を用いた。

成 績

1. 振動工具使用者における指血流量および指皮膚温
振動工具使用者について, 指血流量, 指皮膚温を測定したが, 無症状群 (A群: n=28), 蒼白発作はないがしびれや痛みのある群 (B群: n=14) および蒼白発作のある群 (C群: n=14) の3群に対象を区分して安静時および握力計把持中の結果を Fig. 2, Fig. 3 および Fig. 4 に

Fig. 2 Finger blood flow at rest and during short-term handgrip of 56 workers using vibrating tools. A, B & C refer to Table 1.

Fig. 3 Changes of the finger blood flow in a single subject during and after a short-term handgrip with a strength of 10 kg.

示した。

1) 指血流量

結果は Fig. 2 に示したが、安静時の指血流量の平均値±標準誤差は、A群 49.5 ± 1.91 ml/100 g/min, B群 45.0 ± 4.31 ml/100 g/min, C群 38.5 ± 2.16 ml/100 g/minであり、各群間を比較すると、C群（蒼白発作のある群）の指血流量の平均値は、A群のそれと比較すると

危険率1%以下で有意に低値であった。A群とB群、およびB群とC群の間に有意差は認めなかった、B群においては安静時の指血流量レベルの分布をみると19~68 ml/100 g/minとばらつきが大きく、14例中45 ml/100 g/min以上でA群の平均値に近いレベルを示すものが8例、40 ml/100 g/min以上で45 ml/100 g/min未満のものが1例、40 ml/100 g/min未満でC群の平均値に近いレベルを示すものが5例であった。

握力計を10 kgの力で把持した際、Fig. 3に例示したように指血流量は若干の変動の後、約1分から1分30秒の把持で一定のレベルに達した。A群においては指血流量の減少を示すものが多くみられ、C群では変化の少ないものが多くみられた。約1分間握力計を把持した時の指血流量は Fig. 2 に示したが、指血流量の平均値±標準誤差は、A群 37.4 ± 2.64 ml/100 g/min, B群 34.1 ± 3.31 ml/100 g/min, C群 40.1 ± 3.22 ml/100 g/minであり、A群およびB群において安静時に比し、危険率0.1%以下で有意な低下を示した。C群においては安静時に比し有意な変化は認めなかった。

2) 指皮膚温

それぞれの群の安静時の指皮膚温の平均値±標準誤差は Fig. 4 に示したが、A群 $30.5 \pm 0.68^{\circ}\text{C}$, B群 $30.3 \pm$

Fig. 4 Skin temperature at rest and during short-term handgrip of 56 workers using vibrating tools. A, B & C refer to Table 1.

1.01°C, C群 $31.1 \pm 0.89^\circ\text{C}$ であり、各群間に有意な差は認められなかった。

また、約 1 分間握力計を把持した時のそれぞれの群の指皮膚温の平均値±標準誤差はA群 $31.0 \pm 0.72^\circ\text{C}$, B群 $30.7 \pm 1.10^\circ\text{C}$, C群 $31.5 \pm 0.90^\circ\text{C}$ であり、いずれの群においても安静時に比し、有意な変化は認められなかった。

2. 振動工具使用者における握力計把持中の指血流量および指皮膚温の変化

握力計把持中の指血流量の変化の一例を Fig. 5 に示した。指血流量は把持開始直後より減少し、約 1 分30秒後に安静時より低いレベルで安定し、把持中はその低いレベルに保たれた。把持中止後、指血流量は急速に回復し、中止後 1 分目では安静時より若干高いレベルとなったが、2 分目ではほぼ安静時のレベルに回復した。一方、指皮膚温は指血流量に遅れて変化する傾向を示した。Fig. 6 に示したように、6 人の被験者の指血流量の平均値±標準誤差は、安静時 $48.9 \pm 5.96 \text{ ml}/100 \text{ g}/\text{min}$ であり、把持開始後 1 分目で $32.3 \pm 3.59 \text{ ml}/100 \text{ g}/\text{min}$ となり、安静時に比し有意な減少（危険率 5%以下）を示し、その後把持中は有意に減少していた。把持中止後の指血流量は、1 分目 $59.0 \pm 4.00 \text{ ml}/100 \text{ g}/\text{min}$, 2 分目 $57.2 \pm 4.90 \text{ ml}/100 \text{ g}/\text{min}$ であり、安静時より若干高いレベルを示したが、安静時との間には有意な差は認められなかった。一方、6 人の被験者の指皮膚温の平均値±標準誤差は、安静時 $33.5 \pm 0.72^\circ\text{C}$ であり、把持開始後 1 分目より低下し、2 分目で $32.9 \pm 0.69^\circ\text{C}$ と安静時に比し有意な低下（危険率 5%以下）を示し、以後もその低下は続き、平均値も 5 分目まで低下が続いた。把持中止後 1 分目

Fig. 5 Changes of finger blood flow and the skin temperature in a single subject during and after the handgrip with a strength of 10 kg for five minutes.

Fig. 6 Changes of finger blood flow and skin temperature during and after the handgrip with a strength of 10 kg for five minutes. *: $p < 0.05$ compared with the value at rest.

$33.3 \pm 0.59^\circ\text{C}$, 2 分目 $34.2 \pm 0.53^\circ\text{C}$ であり、1 分目で安静時のレベルに回復し、2 分目では安静時に比し危険率 5%以下で有意な上昇を示した。

3. 振動工具使用者における手腕系局所振動暴露中の指血流量および指皮膚温の変化

1) 指血流量の変化

ハンドル把持後一定となった指血流量（負荷前値）の平均値±標準誤差は、A群 $37.7 \pm 4.82 \text{ ml}/100 \text{ g}/\text{min}$, B群 $33.7 \pm 3.59 \text{ ml}/100 \text{ g}/\text{min}$, C群 $31.5 \pm 2.86 \text{ ml}/100 \text{ g}/\text{min}$ であり、各群間には若干レベルの違いがみられたが有意差は認めなかった。局所振動負荷中の 5 分間および負荷中止後 5 分間の指血流量の変化は Finger Blood

Fig. 7 Finger blood flow response during and after local vibration exposure. The vibration given was 60 Hz and 50 m/sec². Finger blood flow response (%) = $\frac{\text{the value at each measuring time} - \text{the initial value}}{\text{the initial value}} \times 100$.

A, B & C refer to Table 1. *: $p < 0.05$ compared with the initial value.

Flow Response (負荷前値に対する変化率) (平均値±標準誤差) で示した (Fig. 7)。A群では負荷開始直後よりすべての被験者において指血流量は増加し、1分目よりすでに前値に対して有意な増加 (危険率5%以下) を示し、負荷終了後5分目までその有意な増加が続いた。C群では暴露中も暴露後も有意な変化は認められなかった。B群においては指血流量の増加を示すものと変化を示さないものがあり、全体では有意な増加ではなかった。

2) 指皮膚温

負荷前の指皮膚温の平均値±標準誤差は、A群 $31.7 \pm 0.63^{\circ}\text{C}$ 、B群 $30.5 \pm 0.70^{\circ}\text{C}$ 、C群 $31.2 \pm 1.20^{\circ}\text{C}$ であり、

Fig. 8 Changes of skin temperature during and after local vibration exposure. The vibration given: refer to Fig. 7. A, B & C refer to Table 1. +: $p < 0.10$ compared with the initial value.

各群間に有意な差は認められず、平均値もほぼ同レベルであった。結果は負荷前値に対する変化量 (Δ Skin Temperature ($^{\circ}\text{C}$)) で示した (Fig. 8)。A群およびB群において、指皮膚温は局所振動の負荷開始後3分目まで低下を示すものが多く、A群の1分目、3分目およびB群の2分目において低下傾向を示した。また、負荷終了後2～5分目にかけては負荷前値に対してA群では6例中5例、B群では6例中4例が上昇を示したが、その増加は有意ではなかった。C群では負荷開始3分目まではA群およびB群に比し変化は小さく、4分目以後も上昇を示すものと低下を示すものがあり、有意な変化ではなかった。

考 察

1. 振動工具使用者の末梢循環機能および短時間の把持の影響について

振動障害の診断、とくにレイノー現象に代表される末梢循環障害の診断において、手指の皮膚温測定や爪圧迫テストなどが行われているが¹⁾、室温などの環境条件や検者による手技の相違といった要因に左右されやすく、客観的で信頼性のある検査とはいえない。よって、これらの検査項目と同様に簡便であり、より客観的な検査項目が、スクリーニングの意味からも必要と考えられる。すでに野原は、電気分解式水素クリアランス法を用いた安静時の指血流量の測定がレイノー現象を有する群とそうでない群の鑑別に有用であり、末梢循環機能の客観的な指標となりうることを指摘している¹⁴⁾。しかしながら、針電極を刺入せねばならず、スクリーニング段階への適用には改良の余地があった。そこで本研究ではまず著者の開発したシステムを用い、振動工具使用者の安静時の指血流量を観察し、さらに短時間の把持の影響について検討し、スクリーニング段階での体表循環モニターシステムの有用性を検討した。その結果、体表循環モニターシステムにより測定された指血流量は、レイノー現象を有する群とそうでない群の鑑別に有用であった。また、痛み・しびれはあるがレイノー現象のない群においては、安静時のレベルの低いものがあり、末梢循環障害を合併するものの存在も示唆された。

短時間の把持の影響については、安静時のレベルの高いA群やB群では把持により安静時に比し有意に低下した。この指血流量の低下は把持によりひきおこされた循環障害と考えられる。一方、安静時のレベルの低いC群において把持による有意な変化は認められなかったが、これは Stewart ら¹⁵⁾が振動工具使用者において指摘し

ている皮下組織の硬化とそれに伴う組織のコンプライアンスの低下によって局所の血管への把持の影響が少なく血管そのものの反応も低下しているためと考えられる。なお指皮膚温については、低下が見られなかったのは把持の時間が短いことや皮膚温が血流に遅れて変化するためと思われる。手持工具や握力計の把持は、皮膚の直接の圧迫だけでなく、筋の収縮などにより手指全体の組織圧の上昇を引き起こすことが推測され、組織圧の上昇により静脈の閉塞や transmural pressure の低下に伴う血流の低下が引き起こされると考えられる¹⁶⁾。動物実験において、筋収縮時の筋血流の減少や外からの四肢の圧迫による皮膚および筋の血流減少が組織圧の上昇によることが明らかとなっている^{17,18)}。この外からの圧迫による組織圧の上昇時に、transmural pressure が低下し血管が閉塞する臨界閉鎖圧については、Ogata ら¹⁸⁾ は、筋組織において50 mmHg、皮膚組織において30 mmHg であるとし、組織圧の上昇により皮膚の方が循環障害を起こしやすいと報告している。

2. 把持および局所振動刺激の末梢循環に及ぼす影響について

振動障害の基本症状である末梢循環障害の発症にはいくつかの要因の関与が考えられているが、なかでも手腕系への振動そのものの影響が、その強度、周波数、振動暴露時間といった要因も含めて最も大きいと考えられる。これに加えて寒冷、騒音および工具の把持を含めた静的運動負荷についても発症要因として考慮する必要がある。末梢循環へのこれらの要因の影響については、局所振動^{19,20)}、騒音^{21,22)} それぞれの生理的影響やこれらの複合影響^{23,24)} についてはすでに報告されているが、それらの要因の暴露中の指血流量など末梢循環動態については未だ詳細に検討した報告はない。また、工具の把持の影響についても手指の皮膚温を指標とした報告があるにすぎない²⁵⁾。本研究では十分な知見が得られていないこれらの点についてさらに検討を加えた。

把持の末梢循環に及ぼす影響については肝付²⁵⁾は試作した把持力計を用いて、把持力が大きくなるほど手掌部皮膚温の低下が大きいことを指摘しており、本研究では自覚症状のない振動工具使用者を対象に10 kg の力で5分間握力計を握らせた時の指血流量および指皮膚温を観察した。指血流量は把持開始直後より低下しはじめ約1分30秒後に安静時より低いレベルで安定し、その後一定であった。これに対し指皮膚温は指血流量に比しその変化は緩徐でありその低下は把持中続いた。この指皮膚温の低下は肝付の成績と一致している。把持終了後、指

血流量は速やかに安静時のレベルに回復したが、指皮膚温の回復はやや遅れる傾向にあった。このように指皮膚温は指血流量の変化に遅れて変化しているが、皮膚温はその部位の局所の皮膚だけでなく周囲の筋組織、骨組織も含めた範囲の熱容量に依存する²⁶⁾という点から説明される。また、把持終了2分後の指皮膚温の安静時に対する有意な上昇は、筋収縮後の回復熱²⁷⁾などを含めた組織の代謝によるものと考えられる。以上より、振動を伴わない単なる握力計の把持によっても手指の循環障害が引き起こされることが予想される。また岡田¹¹⁾は末梢循環障害を有し、振動工具の使用を中止し、枝はらい、手のこ、まさかりなどを使用している伐木作業においてその中止から7年を経たのちにレイノー現象や手の冷感などの症状を訴える症例がみられたことを報告しているが、これもこのような循環障害の影響と考えられる。

さて、血管平滑筋に対する振動刺激の生理的影響については、摘出した臓器平滑筋の条片に微小振動刺激を加え、その影響が観察されている²⁸⁻³¹⁾。Ljung ら²⁸⁾は摘出したラット門脈に振動数200 Hz、振幅500 μm の振動刺激を加えると、自発性収縮の頻度に変化はないが振幅が抑制されることを報告している。また東や大橋ら²⁹⁻³¹⁾は、摘出したイヌの門脈や尿管に振動刺激を加えると、すでに存在する自発性収縮の頻度が高まり、振幅が抑制されることを報告している。いずれにしても門脈や尿管の摘出条片に振動刺激を加えると、自発性収縮の振幅の抑制が起こるわけである。この *in vitro* での基礎実験から東ら^{32,33)}はイヌの後肢に振動刺激を加え、末梢循環への影響を観察し、振動刺激はその暴露中において末梢血管を拡張させ、血流を増大させ、体温を局所的に上昇させることを指摘している。また、Liedtke ら³⁴⁾やHudlicka³⁵⁾らも動物を用いた実験から同様の結果を得ている。したがってヒトにおいても生理的反応として局所振動暴露中においては末梢の血流は増加すると考えられる。したがって、局所振動暴露中の指血流量の変化から無症状のA群においては正常な血管拡張反応がみられ、レイノー現象を有するC群ではこの振動刺激に対するこの拡張反応が減弱しており、痛み・しびれはあるがレイノー現象のないB群ではこのような血管拡張反応の異常を合併するものとそうでないものがあると考えられる。一方局所振動暴露中の手指皮膚温の変化については古くより検討されている³⁶⁻³⁹⁾が、ハンドル把持や騒音などの影響が考慮されておらず、皮膚温の上昇、低下について

は結果はさまざまである。本研究においてA群およびB群において局所振動暴露開始より3分目まで皮膚温は低下傾向を示しているが、これは暴露開始までのハンドル把持による循環障害に起因するものと考えられる。よって、局所振動暴露中の指皮膚温についてはハンドル把持の影響を併せて考慮する必要がある。

今回得られた成績から、振動刺激が末梢血管に直接作用し、その暴露中において末梢の組織血流量を増加させることが明らかになった。一方、Magosら⁴⁰⁾は、振動刺激の末梢血管への直接的な損傷作用に振動暴露による毛細血管透過性亢進に伴う局所の浮腫、低酸素状態が加わり血管損傷が引き起こされると考えており、著者の成績はこの仮説を実験的に支持すると考えられる。また、静脈の収縮や静脈の狭窄による静脈圧上昇状態において毛細血管壁の水分濾過量が増加することはすでに知られており⁴¹⁾、今回明らかになった把持による影響から、組織の浮腫や低酸素状態は把持のみによって引き起こされると考えられる。以上より、振動工具使用者が、実際にハンドルを把持し直接振動刺激をうける作業を長期にわたって続けることにより、手指の血管壁および血管の神経終末の損傷が生ずるものと考えられる。また、すでに高度の末梢循環障害を有する振動工具使用者においては、単に振動工具の使用を中止するだけでなく、手のこやまさかりなどの手持工具の使用も制限する必要があると考えられる。

3. 体表循環モニターシステムの有用性について

著者が開発した体表循環モニターシステム¹⁰⁾を用いて簡便にかつ非侵襲的に指血流量の安静時レベルや短時間の握力計把持中の変化を観察することにより、従来用いられてきた指皮膚温や爪圧迫テストより客観的に末梢循環障害の有無を推測することが可能であり、十分に聴取された自覚症状と併せて判定すればより診断が確かなものになると思われる。さらに局所振動暴露による血管拡張反応の減弱の有無を指血流の変化を通して観察することにより、寒冷血管拡張の有無を通して血管の障害を判定しようとする冷水浸漬に比べて簡便にかつ侵襲が少なく判定することが可能であると考えられる。

結 語

著者が開発した体表循環モニターシステムを用いて振動工具使用者における安静時の末梢循環機能を検討したのち、握力計把持中および局所振動暴露中の末梢循環動態について検討した。対象とした振動工具使用者は無症状群(A群)、蒼白発作はないがしびれや痛みのある群(B

群)、蒼白発作のある群(C群)の3群に分けて検討した。結果は次の通りである。

1) 振動工具使用者56名において安静時の指皮膚温について各群間に有意な差は認められなかったが、指血流量についてはC群がA群より有意に減少($p < 0.01$)していた。

2) 一定の握力での握力計の約1分間の把持により、指皮膚温については各群とも安静時に比し有意な変化は認められなかったが、指血流量についてはA群およびB群において有意な低下($p < 0.001$, $p < 0.001$)が認められ、C群では有意な変化は認められなかった。

3) A群6名において一定の握力での5分間の握力計把持により指血流量は把持開始後1分目ですでに安静時に比し有意に低下($p < 0.05$)し、把持中ほぼ一定であった。指皮膚温は2分目より安静時に比し有意な低下($p < 0.05$)を示し、把持中その低下は続いた。把持終了後、指血流量は安静時のレベルに回復し、指皮膚温は安静時に比し有意に上昇($p < 0.05$)した。

4) 振動工具使用者18名を対象にした局所振動(60 Hz, 50 m/sec²)の負荷中においてA群では負荷開始直後より負荷前値より有意な増加($p < 0.05$)を示したが、C群では増加は認められなかった。B群ではわずかに増加を示したが有意な変化ではなかった。

以上より著者が開発した本システムが振動障害における末梢循環障害の診断だけでなく、その病態の解明にも有用であると認められた。

謝 辞

稿を終えるに臨み、御指導、御校閲いただきました恩師岡田 晃教授に深甚なる謝意を表します。また、終始御指導いただきました野原聖一講師に深謝致します。

本論文の一部は11th Asian Conference on Occupational Health (1985年11月, Manila) および第56回日本衛生学会総会 (1986年3月, 津市) において発表した。

文 献

- 1) 岡田 晃：いわゆる「白ろう病」，日本医師会医学講座 (昭和42年度)，金原出版，東京 (1968)。
- 2) 岩田弘敏，小谷諒夫：指尖容積脈波と皮膚温と測定室温との関係，日衛誌，28，488-491 (1973)。
- 3) 応儀成二：経皮的酸素分圧測定による下肢血行障害の定量的評価，脈管学，20，815-822 (1980)。
- 4) Franzeck, U.K., Bolliger, A., Huch, R. and Huch,

- A: Transcutaneous oxygen tension and capillary morphological characteristics and density in patients with chronic venous incompetence, *Circulation*, **70**, 806-811 (1984).
- 5) 岩谷眞宏: 熱流解析による皮膚血流量の算定, 医用電子と生体工学, **20**, 149-155 (1982).
 - 6) 田村俊世: 体肢組織内温度の血流依存性・I 部位による差異に関する理論的および実験的解析, 脈管学, **19**, 343-348 (1979).
 - 7) 田村俊世: 体肢組織内温度の血流依存性・II 深部体温計による上肢組織内温度変化記録の解析, 脈管学, **19**, 783-788 (1979).
 - 8) Coffman, J.D. and Cohen, A.S.: Total and capillary fingertip blood flow in Raynaud's phenomenon, *N. Engl. J. Med.*, **285**, 259-263 (1971).
 - 9) Glogavac, S.V., Bitz, D.M. and Whiteside, L.A.: Hydrogen washout technique in monitoring vascular status after replantation surgery, *J. Hand Surg.*, **7**, 601-605 (1982).
 - 10) 中村秀喜: 体表循環モニターシステムの開発と応用 第1報 基礎的研究, 日衛誌, **41**, 896-913 (1987).
 - 11) 岡田 晃, 鈴木勝巳: 振動障害—研究動向と診療の実態—, 篠原出版, 東京 (1982).
 - 12) 野原聖一, 中村秀喜, 岡田 晃: 吸入式酸素ガスクリアランス法による皮膚血流量の測定, 呼と循, **34**, 771-776 (1986).
 - 13) ISO/TC 108: Guide for the measurement and the assessment of human exposure to vibration transmitted to the hand. Draft International Standard ISO DIS 5349, ISO/TC 108, Gent (1982).
 - 14) 野原聖一: 局所振動暴露による末梢循環系・末梢神経系の振動数応答, 十全医会誌, **92**, 953-966 (1983).
 - 15) Stewart, A.M. and Goda, D.F.: Vibration Syndrome, *Brit. J. Industr. Med.*, **27**, 19-27 (1970).
 - 16) 高木健太郎, 永坂鉄夫: 生理学体系III (循環の生理学), p. 994-1005, 医学書院 (1970).
 - 17) 阿部栄二: 筋収縮時の筋内圧と筋血流に関する実験的研究, 日整会誌, **55**, 339-410 (1981).
 - 18) Ogata, K. and Whiteside, L.A.: Effects of external compression on blood flow to muscle and skin, *Clin. Orthop.*, **168**, 105-107 (1982).
 - 19) 伊藤史子: 局所振動暴露による脳循環系への影響. 脳および指循環と振動周波数との関連, 産業医学, **20**, 3-8 (1978).
 - 20) 長岡良治, 松本忠雄, 渡辺義行: 指血流に及ぼす局所振動暴露の影響, 産業医学, **23**, 151-157 (1981).
 - 21) 大久保千代次, 宮嶋蔵敏, 長田泰公: 指先脈波振幅に対する間欠的騒音の影響, 公衛院研報, **25**, 1-8 (1976).
 - 22) Osada, Y., Ohkubo, C. and Miyazaki, K.: Vasoconstricting effect and perceived noisiness of inter-mittent noise, *Bull. Inst. Publ. Health*, **26**, 171-177 (1977).
 - 23) Hyvärinen, J. and Pyykkö, I.: On the etiological mechanism in the traumatic vasospastic disease, *Audiologia*, **7**, 241-246 (1976).
 - 24) Dupuis, H.: Future research. Federal Republic of Germany, In: Gemne, G. and Taylor, W. (eds) "Hand-arm vibration and the central autonomic nerve system", *J. Low. Frequency Noise and Vibration, Special Issue*, **1**, 186-188 (1983).
 - 25) 肝付邦憲: 振動負荷の取手把持力に及ぼす影響に関する実験的研究, 労働科学, **58**, 183-196 (1982).
 - 26) Hensel, H. and Bender, F.: Fortlaufende bestimmung der hautdruchblutung am menschen mit einen elektrischen warmeleitmessner, *Pflüger. Archiv.*, **263**, 603-614 (1956).
 - 27) 永坂鉄夫, 渡辺 悟: 人体生理学, p. 225-227, 廣川書店, 東京 (1985).
 - 28) Ljung, B. and Sivertsson, R.: The inhibitory effect of vibrations on tension development in vascular smooth muscle, *Acta physiol. Scand.*, **85**, 428-430 (1972).
 - 29) Azuma, T., Ohhashi, T. and Sakaguchi, M.: Microvibration: Capable of inducing spontaneous contractions in smooth muscles, *Proc. Exp. Soc. Biol. Med.*, **151**, 484-486 (1976).
 - 30) Ohhashi, T., Azuma, T. and Sakaguchi, M.: Effects of microvibration on activity of ureteral and portal smooth muscles, *Am. J. Physiol.*, **236**, C192-201 (1979).
 - 31) 大橋俊夫: 尿管および血管平滑筋に対する微小振動刺激効果とその発現機序, 臨床生理, **8**, 132-148 (1978).
 - 32) 東 健彦, 大橋俊夫, 坂口正雄, 宮沢崇子, 河合康明: 振動病における局所的な末梢循環障害の発生機

- 序, 心臓, **10**, 579-584 (1978).
- 33) Azuma, T., Ohhashi, T. and Sakaguchi, M.: An approach to the pathogenesis of "white finger" induced by vibratory stimulation: Acute but sustained changes in vascular responsiveness of canine hindlimb to noradrenaline, *Cardiovasc. Res.*, **14**, 725-730 (1980).
- 34) Liedtke, A.J. and Schmid, P.G.: Effect of vibration on total vascular resistance in the forelimb of the dog, *J. Appl. Physiol.*, **26**, 95-100 (1969).
- 35) Hudlicka, O. and Wright, A.: The effect of vibration on blood flow in skeletal muscle in the rabbit, *Clin. Sci.*, 471-476 (1978).
- 36) 西尾雅七, 喜田村正次, 佐野晴洋, 宮本熙東: 伸線作業者に発生させる血管神経症, *日衛誌*, **7**, 23-24 (1952).
- 37) 奥谷博俊, 矢守 昭: 振動工具使用者の手指皮膚温について, *名古屋市大医学会誌*, **11**, 88-96 (1960).
- 38) 木村菊二, 阿久津綾子, 三浦豊彦: 振動による手背皮膚温の変動, *労働科学*, **38**, 268-277 (1962).
- 39) 舟橋明男: 振動作業の手指皮膚温に及ぼす影響—特に経験年数の影響, *三重医学*, **24**, 225-257 (1980).
- 40) Mogos, L. and Okos, G.: Cold dilation and Raynaud's phenomenon, *Arch. Environ. Health*, **7**, 402-410 (1963).
- 41) 大橋俊夫: リンパ液流の測定, *総合臨床*, **35**, 443-448 (1986).
- (受付 1986年10月24日 受理 1987年2月16日)