

# Experimental Studies on the Effect of Vibration and Noise on Skin Sympathetic Activity

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-04 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/8111">http://hdl.handle.net/2297/8111</a>

## 振動・騒音刺激に対する皮膚交感神経活動の 応答に関する実験的研究

金沢大学医学部公衆衛生学講座 (主任: 岡田 晃教授)

内 藤 摩 理

(平成1年3月2日受付)

職業性レイノー現象の病因における血管運動神経反射の関与を明確にするため、振動工具の使用に伴う、把持、騒音、局所振動に対する皮膚交感神経活動の応答を調べた。健康な男子学生5人を被験者とし、左手掌部皮膚支配の正中神経から、交感神経節後遠心線維のインパルス活動を肘窩部において記録した。同時に、神経支配部におけるレーザードップラー法による皮膚血流および皮膚温の測定を行い、皮膚交感神経活動に含まれる血管運動神経活動をモニターした。室温(23±1°C)の条件下では、いずれの被験者においても正中神経の皮膚神経束から自発性の交感神経のバースト活動が観察され、バーストの後に一過性の左中指先端皮膚血流の低下が認められた。2kgの把持力では、右手の把持にて有意な皮膚交感神経活動の変化は示されなかった。続いて、右手で2kgの握力による把持を行いながら、57dB(A)の騒音、100dB(A)の騒音、右手に対する60Hz、50m/sec<sup>2</sup>の局所振動、右手に対する120Hz、50m/sec<sup>2</sup>の局所振動、100dB(A)の騒音と右手に対する60Hz、50m/sec<sup>2</sup>の振動の両方、の各刺激を20分以上の間隔をあけて5分間ずつランダムに暴露し、皮膚交感神経活動の応答について検討した。この結果、60Hzの振動負荷により、二峰性の有意な皮膚交感神経活動の増加が観察され、負荷中止後には神経活動の抑制傾向と同時に皮膚血流の有意な増加がみられた。また、120Hzの振動刺激に対する皮膚交感神経活動の反応は、60Hzと比して小さく、かつ個人差が大きかった。一方、騒音については、振動負荷装置の駆動音と同じ騒音レベルである57dB(A)の騒音刺激では皮膚交感神経活動に有意な変化は認められなかった。100dB(A)の騒音刺激で皮膚交感神経活動は増加したが、有意な変化は負荷開始直後に限られていた。更に振動と騒音の複合暴露により、皮膚交感神経活動が著明に亢進することが示された。本研究では、皮膚交感神経活動の直接記録により、振動工具使用によって血管運動神経反射が誘発されることを示唆する所見を得た。

---

**Key words** skin sympathetic activity in median nerve, local vibration, noise, finger blood flow, vasoconstriction

---

チェーンソー、刈払機などの手持振動工具の使用によって惹起される手指の蒼白発作は、職業性レイノー現象、振動起因性白指などと称され、振動障害の最も特徴的な所見となっている<sup>1)</sup>。レイノー現象の発現機序に関しては数多くの研究がなされているが、近年振動工具から発生する振動と騒音による皮膚交感神経系への影響に関する研究の発展が注目されている<sup>2-6)</sup>。

手指に関する皮膚交感神経活動のモニターとして

は、皮膚温、指尖容積脈波がよく用いられており、最近ではより正確なモニターとして皮膚血流量の測定も行われるようになってきている。これらの方法を用いた研究から、手腕系への振動暴露が手指の皮膚を支配する交感神経活動に影響をきたすことが示唆されている<sup>3-10)</sup>。しかしながら、皮膚温、皮膚血流量などは、神経活動に対する反応以外に、振動工具の把持などによる機械的影響、また体液性の調整など、更に環境温な

---

Abbreviations: ANOVA, analysis of variance; ISO, International Organization for Standardization; SSA, skin sympathetic activity

どの外的条件の直接的影響も受けているため、皮膚交感神経活動そのものの応答に関する推測ははなはだ困難である。神経活動を直接導出し、しかも目的とする神経活動を選択的に記録できれば、種々の刺激が加わった際の特徴的な活動様式の解明も可能になると思われる。1967年より開発された金属微小電極を用いた微小神経電図法は、Hagbarth らの報告<sup>11)</sup>に始まり、1972年より覚醒状態のヒトから直接皮膚交感神経活動を導出することが可能となった<sup>12)13)</sup>。しかし、手技上の困難も伴い、直接皮膚交感神経活動を記録して、振動や騒音との関係を検討した報告はこれまでみられていない。

一方、手腕系への振動刺激が体性-交感神経反射を介して両側性に手指血管に影響を及ぼすことが推測されている<sup>9-8)</sup>。本研究では微小神経電図法の手法を用い、手腕系への局所振動暴露に対する反対側の皮膚交感神経活動を直接記録することにより、振動刺激が実際反対側の遠心性神経活動に変化をもたらすかどうかを確認し、すでに実験的に明らかにされている血管内膜肥厚<sup>14)</sup>のほかに体性-交感神経反射への影響が振動による職業性レイノ-現象の背景にあるか<sup>15)</sup>どうかを検討することを目的とした。更に、皮膚交感神経活動に及ぼす騒音の影響、ならびに振動と騒音の複合影響についても合わせて考察を行った。手腕系への振動ならびに騒音に対する皮膚交感神経活動をヒトにおいて

初めて導出し、興味深い知見を得たのでここに報告する。

## 対象および方法

### I. 対象

20-24歳(平均22.5歳)の健康男子5名を被験者とした。いずれも振動工具使用経験はなく、右利きであった。

被験者に対しては事前に実験の目的および実験手技の概略について十分に説明し、承諾を得た。実験終了後の問診では、実験中に何らかの苦痛を感じた者はなかった。

### II. 方法

被験者は、実験開始30分前に室温 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度40%に保った室内に入れ、実験測定用のベッド上で仰臥位とした。尚、実験室の暗騒音は約40dB(A)であった。

#### 1. 皮膚交感神経活動の記録と定量解析

左肘窩部において、先端直径 $1 \mu\text{m}$ 、軸径 $0.1 \text{mm}$ 、インピーダンス $2-4 \text{M}\Omega$ のタングステン微小電極(フェデリックヘア社、米国)を正中神経に無麻酔、経皮的に刺入し、間野の報告した方法<sup>16)17)</sup>で手掌部第2指および第3指の皮膚を支配する交感神経遠心線維のインパルス活動を導出・同定した。導出したインパルス活動は、差動型前置増幅器 DAM-50 型(WPI

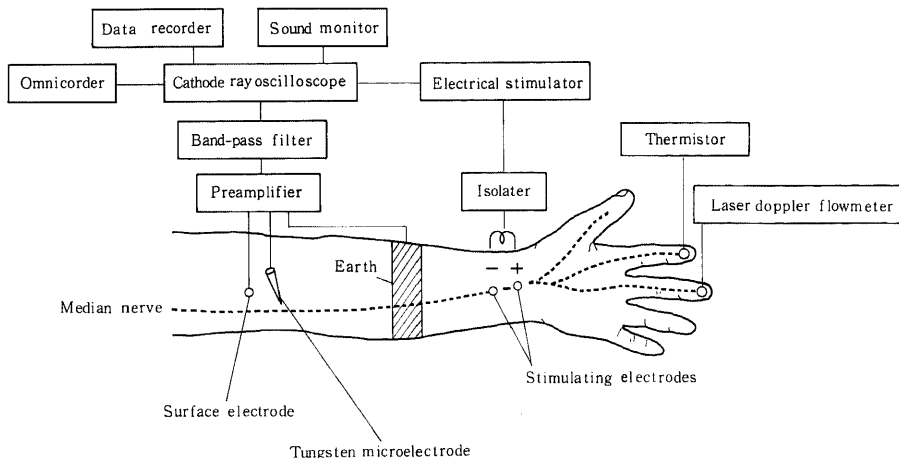


Fig. 1. Experimental set-up for recording skin sympathetic activity (SSA). A tungsten microelectrode is inserted into the skin nerve fascicle of the left median nerve at the cubital fossa of the subject and the SSA innervating the index and middle fingers is identified. The signals of the SSA are fed to a high-impedance preamplifier, passed through a band-pass filter and monitored on an oscilloscope, on a sound monitor and on an omniscorder. The signals are also stored on a data recorder together with skin blood flow recordings from the left middle finger and skin temperature recordings from both index fingers.

社, 米国) を通し, 更に 600 Hz-3 kHz のバンドパスフィルター E-3201A X2 (24 dB/oct) (NF 回路設計ブロック, 東京) で SN 比を向上させた. ブラウン管オシロスコープ COS 5020-ST 型 (KIKUSUI, 東京) で

波型を観察し, オムニコーダ 8M14 型 (日本電気三栄, 東京) に記録するとともにサウンドモニターにより音としても聴取した (図 1).

第 2 指および第 3 指の皮膚を支配する神経束の同定

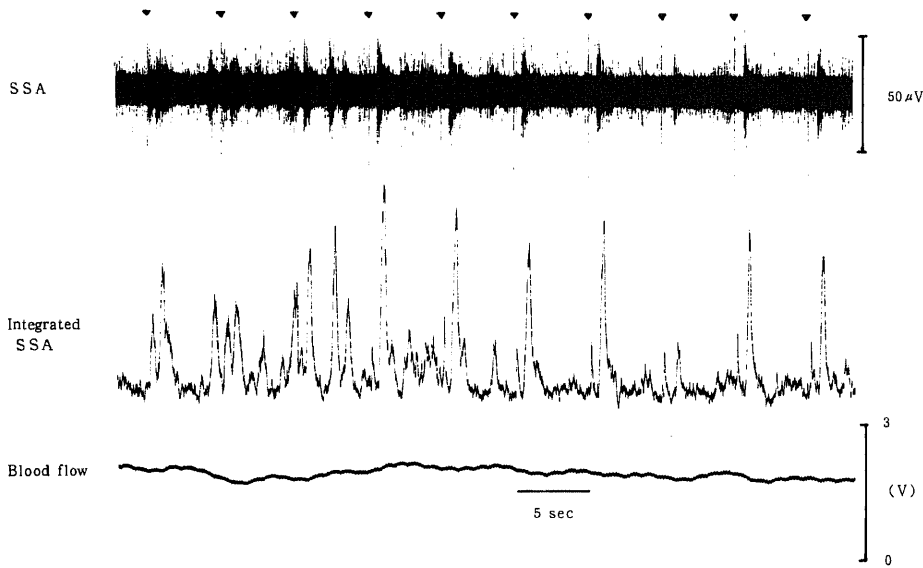


Fig. 2. Typical recordings of skin sympathetic activity (SSA), full-wave-rectified and integrated skin sympathetic activity (Integrated SSA) and finger blood flow. Bursts of skin sympathetic activity are induced by electrical stimuli to wrist (shown by ▼) and followed by decreases in blood flow.

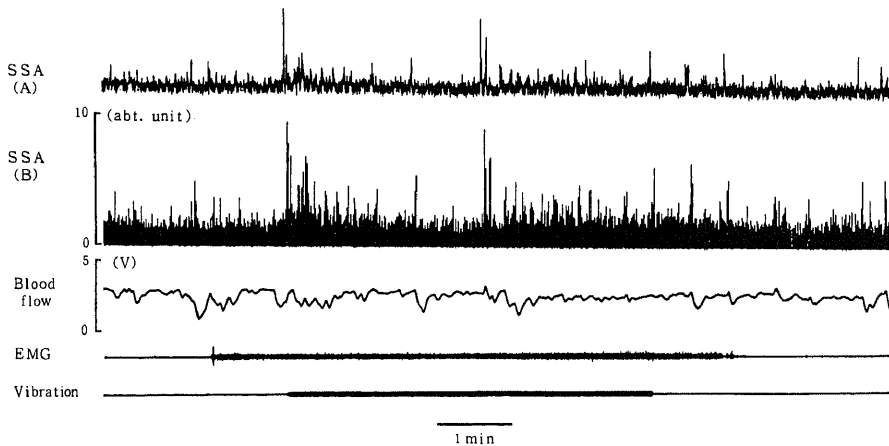


Fig. 3. An example of original recordings of full-wave-rectified and integrated skin sympathetic activity (SSA(A)), instantaneous rate of SSA impulses (SSA(B)), blood flow and EMG in a 20-year-old male subject. SSA was represented by the number of impulses per second as shown in SSA(B), which was counted from the tracing of SSA(A). Surface EMG was recorded from the right forearm to monitor gripping conditions. Vibration was applied to the right hand. abt. unit; arbitrary unit.

は、該当する皮膚への知覚刺激に応答する神経活動の変化によって行った。このようにして微小電極が目的とする神経束に刺入されていることを確認した上で、(1)多線維性のバースト活動で、(2)脈拍同期性はなく、(3)暗算・会話などの精神活動の負荷により増加し、(4)末梢神経幹の電気刺激により一定潜時で活動電位が誘発される、の4つの特徴により皮膚交感神経活動を同定した<sup>12)19)20)</sup>(図2)。

得られた皮膚交感神経活動は、データレコーダ RTP-550A 型 (KYOWA, 東京) に収録し、時定数 0.1秒にて全波整流積分した。収録したデータは実験終了後再生し、積分波形の高さの和を1秒ごとにペンレコーダに描記し(図3)、1秒間の皮膚交感神経の発射量として数値化した。データ再生時の増幅度は各実験ごとに一定とした。

尚、皮膚交感神経活動は、血管運動神経のほか発汗神経の活動をも含んでいる。このため、実験室の温度は血管運動神経活動が優勢となり、皮膚交感神経活動と指尖容積脈波との間に指数関数に近い正の相関が成立するとされる室温 ( $23 \pm 1^\circ\text{C}$ )<sup>17)18)</sup> に保つと同時に、血管運動神経活動のモニターとして、皮膚血流量および皮膚温を測定した。

### 2. 皮膚血流量、皮膚温、表面筋電図の記録

左中指先端における皮膚血流量を、皮膚交感神経活動との関係について既に報告のあるレーザードップラー血流計<sup>19)20)</sup> Periflux (Perimed, Sweden) により測定記録し、両示指先端における皮膚温は30秒おきにサーミスター MGA III-219 (芝浦電子, 東京) を用いて記録した。また、右前腕筋(長指母指屈筋)の表面筋電図を記録した。実験終了後、血流量は10秒ごとの値を求め、血流量、皮膚温共に1分間における平均値を算出した。

### 3. 手腕系振動暴露

振動暴露装置は、動電型加振機 VS-20-03 型 (IMV, 大阪)、増幅器 VA-ST-03 型 (IMV, 大阪)、ファンクションオシレーター AG 202A 型 (TRIO, 東京)、振動計 VM-1960 型 (IMV, 大阪) より構成される。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度ピックアップ EMIC 541-A (新日本測器社, 東京) を取りつけて加振中の振動レベルを監視した。被験者にはいずれも右手を握らせ、X 方向 (International Organization for Standardization (ISO) の基準<sup>21)</sup> に局所振動を与えた。暴露する振動については加速度を一定として、皮膚血流に対する効果が大きいと報告されている2種類の振動数を選ん

だ。また、予備実験における吟味の結果、把持中および手持振動中の握力は、握力を一定に保ちやすく疲労感の小さい 2 kg とした。

### 4. 騒音暴露

手腕系への振動暴露中に加振機の騒音によって発生する騒音レベルと同じ 57 dB(A) の騒音刺激と、100 dB(A) の騒音刺激とを、いずれも録音テープより再生した。騒音レベルの測定には、普通騒音計 NA-3 (リオン, 東京) を用いた。

### 5. 実験手順

血流、皮膚温の両センサー、ならびに筋電図の電極を装着後、タングステン微小電極を左正中神経に刺入し、目的とする第2指・第3指先端の皮膚を支配する交感神経活動を同定した。続いて、振動暴露中をも含めた把持中は常にほぼ 2 kg の握力を保つことができるように練習を行った。その際、右手の把持開始および把持中止時に両上肢に過大な力が入ることのないよう、確認した。

振動および騒音の各刺激を1-2回ずつ与え、刺激ならびに実験手順に慣れさせた。その後、約20分間安静とし、皮膚交感神経活動、指血流量、および指皮膚温がほぼ安定したことを確認した上で、本実験に入った。

実験はいずれも仰臥位で両腕共楽に伸展した状態で行った。まず、把持による影響をみるため、被験者にハンドルをほぼ 2 kg の握力で5分間握らせ、前後5分間ずつの安静時間を含めて観察を行った。続いて、(1)57 dB(A) の騒音、(2)100 dB(A) の騒音、(3)60 Hz、50 m/sec<sup>2</sup> の振動、(4)120 Hz、50 m/sec<sup>2</sup> の振動、(5)60 Hz、50 m/sec<sup>2</sup> の振動と 100 dB(A) の騒音の両方、の各刺激を、ランダムに約20分間の間隔をあけて各5分間ずつ与えた。いずれの刺激に対しても負荷前に安静時の記録をとり、皮膚交感神経活動が安定したことを確認してから1分間右手の把持を行い、そのまま 2 kg の握力にて把持を続けながら振動や騒音を負荷し、暴露終了後も1分間は把持したままの状態を保ち、その後は安静とした。

### 6. 統計処理

測定値はいずれも平均±標準誤差で示した。統計学的検定には、一元配置分散分析を用い、多重比較には Tukey の方法を用いた。危険率 5% 以下 (両側検定) で有意差ありと判定した。

## 成 績

把持開始前1分間の最も安定した状態での記録を安静時の値とし、その後の皮膚温、皮膚血流量、皮膚交

感神経活動の各変化は、いずれも1分ごとに安静時に対する変化率として表した。

### I. 両側皮膚温の変化 (表1)

#### 1. 安静時の皮膚温

5人の被験者の6種の暴露実験における暴露前の安静時の指皮膚温は、右手で  $32.9 \pm 0.22^\circ\text{C}$  ( $n=30$ ), 左手で  $32.1 \pm 0.31^\circ\text{C}$  ( $n=30$ ) であり、皮膚温の平均値は右手に比し左手でやや低かったが、両者間に有意差はみられなかった。また、6種の暴露刺激の種類による差もみられなかった。

#### 2. 把持による変化

把持側である右手の皮膚温は、把持開始後1分目に安静時の  $100.3 \pm 0.13\%$  と軽度上昇したが、有意ではなかった。右手の皮膚温はその後徐々に下降し5分目には安静時の  $98.5 \pm 0.94\%$  となったが、有意な低下とはいえなかった。把持中止後はほぼ安静時の値 ( $100.0 \pm 0.77\%$ ) に回復した。

一方、非把持側である左手の皮膚温は、把持開始後1分目に安静時の  $99.7 \pm 0.17\%$  と若干低下したが有意とはいえ、その後は徐々に上昇し、把持中止後2分目に安静時の  $102.5 \pm 0.78\%$  となったが有意な高値とはいえなかった。

把持による影響を各暴露条件で検討してみると、把持後1分間における変化では、いずれも安静時に比べ把持側である右手の皮膚温がやや増加し、非把持側である左手ではわずかに低下するという共通の傾向が得られ、また把持後1分間における増減の変化率も各暴露刺激間で有意差は認められなかった。従って、騒音、振動の負荷条件下においては皮膚温の観察は、把持開始後1分目の値を対照値としてその後の変化を比較検討することにした。

#### 3. 57dB(A)の騒音による変化

騒音刺激開始後、右手の皮膚温は軽度に低下し3分目よりほぼ一定の値となったが、把持中止により急速

Table 1. Changes in skin temperature before, during and after various loads. Normalized value (%)

Time after handgrip	Handgrip only		Noise at 57 dB(A)		Noise at 100 dB(A)	
	RT	LT	RT	LT	RT	LT
1 min	100.3±0.13	99.7±0.17	100.2±0.14	99.5±0.11	100.7±0.23	99.7±0.13
2 min	99.2±0.35	100.0±0.22	99.5±0.20	99.6±0.23	100.2±0.28	99.5±0.20
3 min	98.9±0.62	100.6±0.39	99.3±0.19	99.7±0.35	99.4±0.31	99.2±0.30
4 min	99.0±0.94	101.3±0.56	99.0±0.22	100.1±0.37	98.9±0.32	98.8±0.28
5 min	98.5±0.94	101.8±0.76	99.0±0.22	100.7±0.42	98.5±0.32	98.9±0.27
6 min	100.0±0.77	101.9±0.81	98.8±0.31	101.0±0.54	98.3±0.40*	99.2±0.31
7 min	101.8±0.71	102.5±0.78	99.8±0.41	101.1±0.56	98.1±0.36*	99.0±0.41
8 min			99.8±0.43	101.3±0.67	99.0±0.48	99.8±0.60
9 min			100.5±0.34	101.6±0.76	101.7±1.20	100.4±0.72

Time after handgrip	Vibration at 60 Hz		Vibration at 120 Hz		Vibration at 60 Hz and noise at 100 dB(A)	
	RT	LT	RT	LT	RT	LT
1 min	100.6±0.20	99.5±0.13	100.3±0.25	99.9±0.12	100.4±0.18	99.7±0.16
2 min	99.5±0.18	98.9±0.23	99.6±0.34	99.3±0.14	99.9±0.17	99.3±0.20
3 min	98.6±0.32	98.4±0.35	99.0±0.50	98.7±0.18	99.2±0.21	98.8±0.25
4 min	97.9±0.47*	98.1±0.44	98.4±0.54	98.6±0.26	98.6±0.24	98.2±0.29*
5 min	97.9±0.70	98.1±0.48	98.5±0.46	98.8±0.45	98.0±0.24*	97.7±0.35**
6 min	97.4±0.71*	97.9±0.60	98.9±0.56	98.9±0.68	97.8±0.34*	97.4±0.40**
7 min	97.5±0.72*	97.8±0.52	99.2±0.73	99.4±0.50	98.1±0.29*	97.2±0.37**
8 min	99.4±0.62	98.0±0.69	100.2±0.57	99.6±0.37	98.3±0.26	97.3±0.40**
9 min	102.1±0.80	98.8±0.61	101.7±0.56	99.1±0.47	99.5±0.51	97.2±0.47**

The skin temperatures were measured from the volar side of the distal portion of the right (RT) and left (LT) index fingers every 30 seconds and averaged for 1 minute. Local vibrations were applied at constant accelerations of 50 m/sec<sup>2</sup>. The values for each individual were normalized by the value at rest, which is the average value during the minute directly before start of handgrip. The values shown represent the mean±SE(%) obtained from 5 men. No significant change was observed during and after handgrip only (i.e., without exposure to vibration or noise) compared with the value at rest. Similar changes in right and left hands were observed for exposure to noise at 100dB(A), to local vibration and to combined exposure to vibration and noise. The effect of vibration and/or noise were compared with the value during the first minute after start of handgrip. \*, p<0.05; \*\*, p<0.01. Statistical analysis was performed by using one way ANOVA followed by Tukey's multiple comparison. Refer to Fig. 4-9 for details of individual experimental procedure.

に安静時のレベルに回復した。左手の皮膚温は騒音刺激中および刺激中止後にわたり、緩慢な上昇を続けた。しかし、57dB(A)による皮膚温の変化はいずれも暴露前に比し有意ではなかった。

#### 4. 100dB(A)の騒音による変化

100dB(A)の騒音刺激により皮膚温は両側共下がり始め、把持側(右手)では暴露中下がり続け、負荷5分目には安静時の $98.3 \pm 0.40\%$ 、負荷中止後も $98.1 \pm 0.36\%$ と負荷前に比し有意に低下した。把持中止後より皮膚温は回復し、把持中止後2分目には安静時の $101.7 \pm 1.20\%$ とむしろ高めの値となったが、暴露前との間に有意な差はみられなかった。

左手の皮膚温は暴露3分目に最低となり、その後徐々に回復し、把持中止後2分目には安静時より少し高めとなったが、左手の皮膚温の変化は暴露前に比し有意な変化ではなかった。

#### 5. 60 Hz, 50 m/sec<sup>2</sup>の振動による変化

右手の皮膚温は振動負荷中低下を続け、暴露3分目には安静時の $97.9 \pm 0.47\%$ 、暴露5分目には安静時の

$97.4 \pm 0.71\%$ 、暴露中止直後も安静時の $97.5 \pm 0.72\%$ といずれも暴露前と比べ有意な低値を示した。把持中止後は右手の皮膚温は上昇に転じ、2分目に安静時の $102.1 \pm 0.80\%$ となったが、暴露前と比べ有意な上昇ではなかった。

一方、左手の皮膚温は暴露後3分目まで低下し、一旦同じ値を保つものの4分目より再び低下し、暴露中止後1分目に安静時の $97.8 \pm 0.52\%$ と最も低い値となったが、これらの変化はいずれも有意ではなかった。

#### 6. 120 Hz, 50 m/sec<sup>2</sup>の振動による変化

両側の皮膚温共、負荷初期にはやや低下し3-4分目より上昇したが、負荷前との間に有意な差は認められなかった。負荷中止後右手で安静時の $101.7 \pm 0.56\%$ とやや高めの値まで上昇したのに対し、左手では安静時の $99.1 \pm 0.47\%$ とむしろ低めの値のままであったが、いずれも暴露前との間に有意な差はなかった。

7. 振動(60 Hz, 50 m/sec<sup>2</sup>)と騒音(100dB(A))の複合暴露による変化

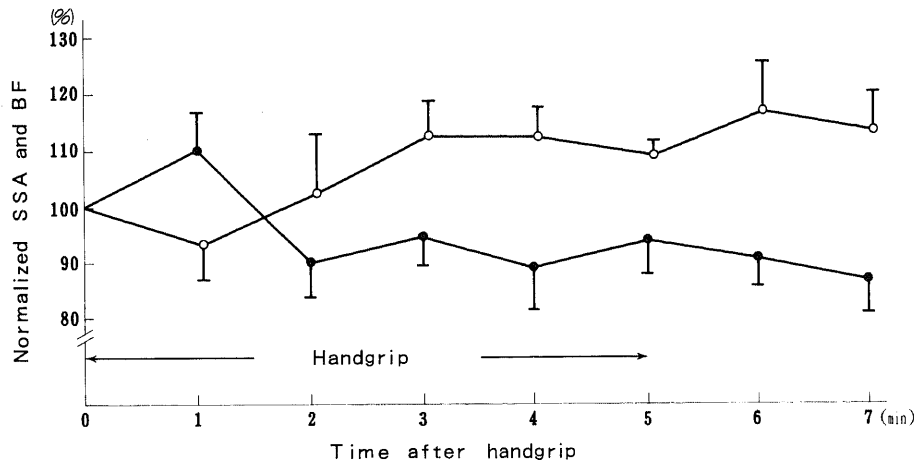


Fig. 4. Changes in skin sympathetic activity (SSA) and blood flow (BF) during and after handgrip with a constant strength of 2 kg. ●, SSA; ○, blood flow. Handgrip was performed on the right hand. Individual values of both sympathetic impulses per second (as shown in Fig. 3) and blood flow calculated every 10 seconds were averaged for 1 minute. The values for each individual were normalized by the value at rest, which is the average value during the minute directly before handgrip. The values shown represent the mean + SE(%) or mean - SE(%) obtained from 5 men. All values were plotted minutely, e. g., the value at rest was plotted for 0 min, the average between the first and second minute after start of handgrip was plotted for 2 min. Statistical analysis was performed using one way ANOVA compared with the value at rest. No significant change was observed in skin sympathetic activity or blood flow. Refer to Fig. 1 for recording site.

暴露開始4分目より暴露中止後1分目に至るまで、両皮膚温共有意な低下を続けた。右手は5分目に最低となり、安静時の $97.8 \pm 0.34\%$ となり、その後少しずつ回復した。一方、非把持側である左手では、暴露中

止後も皮膚温の回復がみられず、把持中止後2分目の時点で安静時の $97.2 \pm 0.47\%$ 、と暴露前と比べ有意な低下を示したままであった。

## II. 皮膚交感神経活動および指皮膚血流量の変化

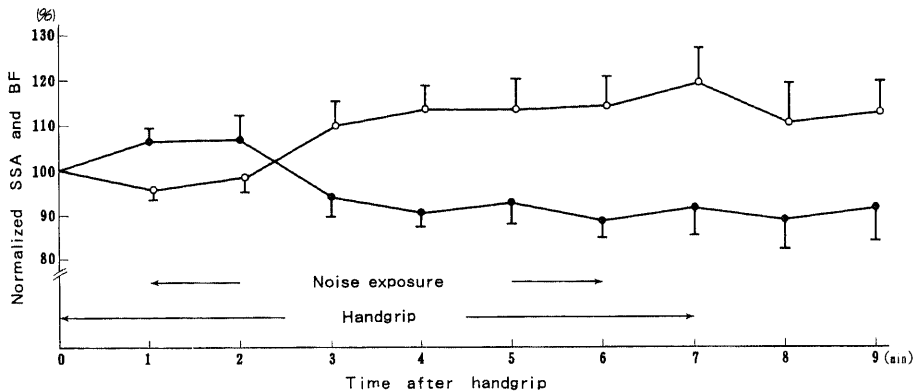


Fig. 5. Effect of noise (57 dB(A)) on skin sympathetic activity (SSA) and blood flow (BF). Noise was exposed during handgrip of the right hand with a constant strength of 2 kg. The values shown represent the mean+SE(%) or mean-SE(%) obtained from 5 men. No significant change was observed in sympathetic activity or blood flow using one way ANOVA compared with the value during handgrip prior to noise exposure. See legend in Fig. 4 for explanation of symbols and method of calculation.

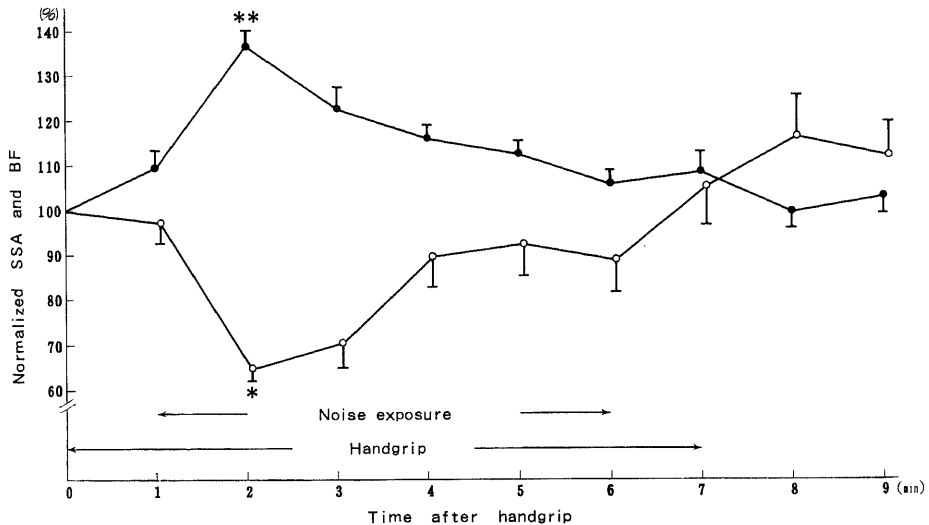


Fig. 6. Effect of noise (100 dB(A)) on skin sympathetic activity (SSA) and blood flow (BF). Noise was exposed during handgrip of the right hand with a constant strength of 2 kg. Each value represents the mean+SE(%) or mean-SE(%) obtained from 5 men. \*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ . P value refers to difference from the value during handgrip prior to noise exposure using one way ANOVA followed by Tukey's multiple comparison. See legend in Fig. 4 for explanation of symbols and method of calculation.



## 1. 安静時の皮膚血流量

5人の被験者に対して行った6種の暴露実験における暴露前の安静時の左中指血流量は、 $20.7 \pm 0.83V$  ( $n=30$ )であり、6種の暴露刺激の種類による差はなかった。

## 2. 把持による変化 (図4)

皮膚交感神経活動は、把持開始後1分目に安静時の $110.6 \pm 6.31\%$ と軽度増加し、2分目以降は安静時の約90%のレベルで推移し、把持中止後もほぼ同じレベルを保った。一方、指血流量は把持開始後1分目に安静時の $93.8 \pm 6.39\%$ と若干低下したものの、2分目には安静時の $102.9 \pm 10.61\%$ と回復し、3分目以降は安静時よりむしろ増加していた。しかし、把持そのものによる皮膚交感神経活動および皮膚血流量の変化には、いずれも安静時に比し有意差は認められなかった。

## 3. 57dB(A)の騒音による変化 (図5)

騒音刺激開始後1分目では、皮膚交感神経活動、血

流共に暴露前とほぼ同じレベルであったが、2分目以降は、神経活動は安静時よりむしろ減少し、血流は逆に増加傾向を示し、以後もほぼ同じレベルで推移した。しかし、57dB(A)の騒音刺激による皮膚交感神経活動および指血流の変化は、刺激前と比べいずれも有意とはいえなかった。

## 4. 100dB(A)の騒音による変化 (図6)

100dB(A)の騒音刺激により、1分目に皮膚交感神経の活動性は安静時の $136.8 \pm 3.50\%$ と有意に増加し、血流は安静時の $64.5 \pm 2.45\%$ と有意に ( $p < 0.05$ ) 減少した。刺激2分目より神経活動、血流共に徐々に回復し、把持中止後神経活動はほぼ安静時の値に戻り、血流は安静時よりやや増加したが、刺激2分目以降の値にはいずれも刺激前との間に有意差は認められなかった。

5. 60 Hz, 50 m/sec<sup>2</sup>の振動による変化 (図7)

60 Hzの局所振動暴露により、皮膚交感神経活動に二峰性の増加が認められた。すなわち、負荷開始後1

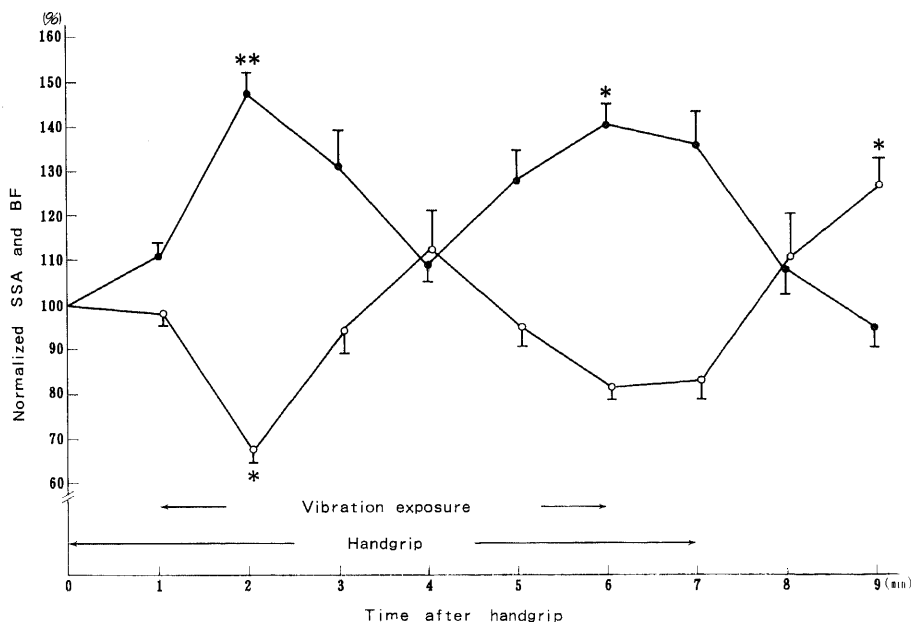


Fig. 7. Effect of local vibration (60 Hz, 50 m/sec<sup>2</sup>) on skin sympathetic activity (SSA) and blood flow (BF). Vibration was applied to the right hand during handgrip with a constant strength of 2 kg. The values represent the mean + SE(%) or mean - SE(%) obtained from 5 men. \*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ . P value refers to difference from the value during handgrip prior to vibration exposure using one way ANOVA followed by Tukey's multiple comparison. See legend in Fig. 4 for explanation of symbols and method of calculation.

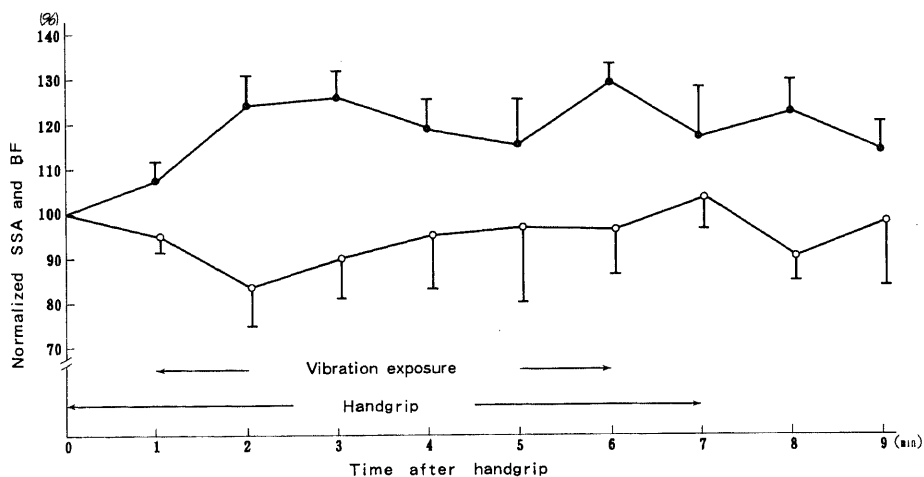


Fig. 8. Effect of local vibration (120 Hz, 50 m/sec<sup>2</sup>) on skin sympathetic activity (SSA) and blood flow (BF). Vibration was applied to the right hand during handgrip with a constant strength of 2 kg. Each value represents the mean+SE(%) or mean-SE(%) obtained from 5 men. No significant change was observed in sympathetic activity or blood flow by one way ANOVA compared with the value during handgrip prior to vibration exposure. See legend in Fig. 4 for explanation of symbols and method of calculation.

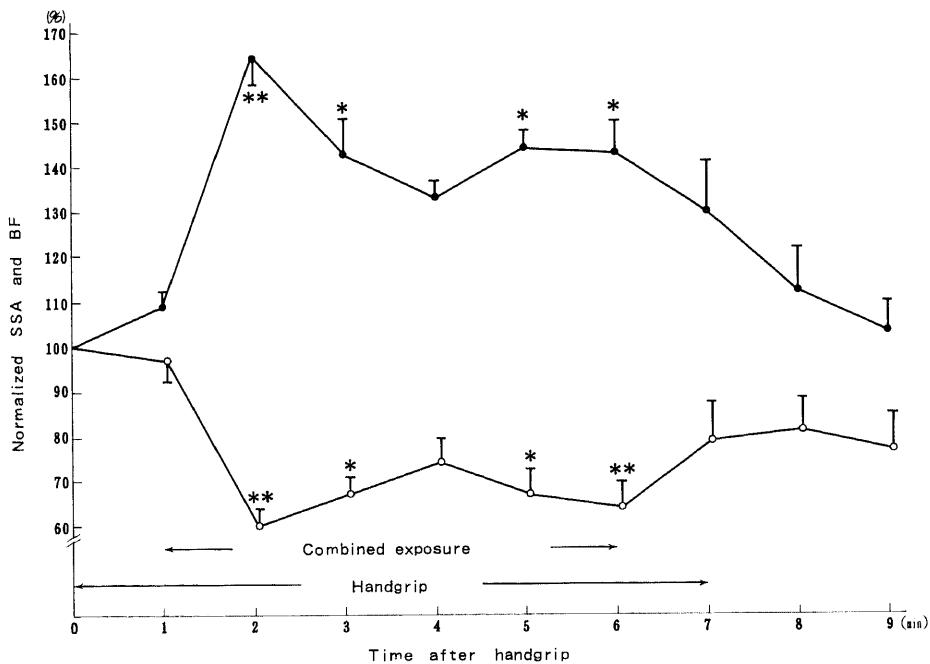


Fig. 9. Combined effect of local vibration (60 Hz, 50 m/sec<sup>2</sup>) and noise (100 dB(A)) on skin sympathetic activity (SSA) and blood flow (BF). Vibration was applied to the right hand during handgrip with a constant strength of 2 kg. Each value represents the mean+SE(%) or mean-SE(%) obtained from 5 men. \*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ . P value refers to difference from the value during handgrip prior to combined exposure using one way ANOVA followed by Tukey's multiple comparison. See legend in Fig. 4 for explanation of symbols and method of calculation.

分目には安静時の $147.9 \pm 4.89\%$ と暴露前と比べて有意な増加を示し、以後2分目よりやや回復したが、4分目より再度増加し、5分目に $140.7 \pm 4.87\%$ と再び暴露前と比し有意に増加した。振動暴露中止後1分目もやや高めのレベルを保ったが、暴露前と比べ有意な高値ではなく、把持中止後は皮膚交感神経活動は徐々に回復して把持中止後2分目には安静時の $94.7 \pm 4.38\%$ とむしろ低めとなったが、振動負荷前と比し有意な低値ではなかった。

一方、指血流も振動負荷によつて二峰性のパターンを示した。負荷開始後1分目には安静時の $67.8 \pm 3.11\%$ と負荷前と比べ有意に低下し、その後回復し、3分目には安静時の $112.3 \pm 9.16\%$ と安静時と比しむしろ高めとなった。その後再び指血流は減少し、5分目には安静時の $81.8 \pm 2.99\%$ となったが、負荷開始後2分目以降の振動負荷中の指血流の変化は負荷前と比べ統計的には有意差を認めなかった。血流は把持中止後急速に回復し、把持中止後2分目には安静時の $126.9 \pm 6.18\%$ と暴露前と比べ有意に増加していた。

#### 6. 120 Hz, 50 m/sec<sup>2</sup>の振動による変化 (図8)

振動負荷中、皮膚交感神経活動は安静時の115-130%と高めのレベルを保ち、負荷終了後3分目でも安静時の値までには回復しなかった。血流は振動負荷開始後1分目に安静時の $83.2 \pm 8.05\%$ とやや低値となり、以後は若干回復したが、負荷中および負荷中止後も安静時より低めのレベルで推移した。しかしながら、皮膚交感神経活動、指血流共に振動負荷による変化に個人差が大きく、負荷前と比べて統計的には有意な変化とはならなかった。

#### 7. 振動 (60 Hz, 50 m/sec<sup>2</sup>)と騒音 (100 dB(A))の複合暴露による影響 (図9)

振動と騒音の同時暴露により、皮膚交感神経活動、指血流は共に著しい変化を示した。神経活動は暴露1分目に安静時の $164.3 \pm 5.48\%$ と負荷前に比し有意に増加し ( $p < 0.01$ )、更に暴露2分目、4分目、5分目にも再び負荷前と比し有意な増加が認められた ( $p < 0.05$ )。また、指血流も暴露1分目に安静時の $59.7 \pm 2.48\%$ となり、以後も2分目、4分目、5分目に安静時と比べて有意な低値を示した。

暴露中止後は皮膚交感神経活動、指血流共に回復傾向を示したものの、特に指血流は安静時の値まで回復することではなく、把持中止後2分目においても、安静時の $76.8 \pm 8.49\%$ とやや低値であった。

8. 60 Hz, 50 m/sec<sup>2</sup>の局所振動暴露と120 Hz, 50 m/sec<sup>2</sup>の局所振動暴露による皮膚交感神経活動の応答の比較 (図10)

暴露前、中、後について振動機より発生する騒音レベルである57 dB(A)のみを負荷した場合を対照群として、1分ごとの時間経過に従って、振動数の違いによる皮膚交感神経活動の応答を比較してみた。まず、局所振動暴露1分目においては60 Hzで安静時の

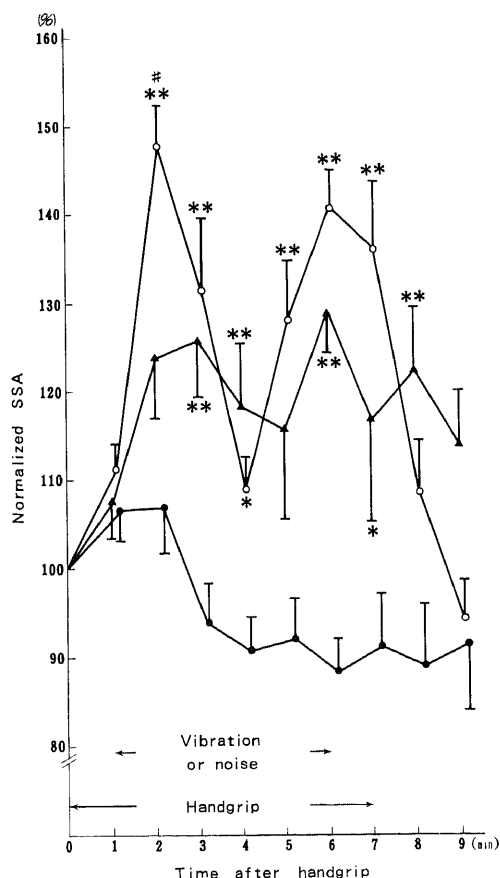


Fig. 10. Effect of frequency of vibration on skin sympathetic activity (SSA). ●, noise at 57 dB(A); ○, local vibration at 60 Hz, 50 m/sec<sup>2</sup>; ▲, local vibration at 120 Hz, 50 m/sec<sup>2</sup>. All exposures were applied during handgrip of the right hand with a constant strength of 2 kg. Each value represents the mean+SE (%) or mean-SE(%) obtained from 5 men. Statistical analysis was performed using one way ANOVA followed by Tukey's multiple comparison. Significantly different from the corresponding value of noise exposure at 57 dB(A): \*,  $p < 0.05$ ; \*\*,  $p < 0.01$ . Significantly different from the corresponding value of vibration exposure at 120 Hz: #,  $p < 0.05$ . For details of data calculation refer to legend in Fig. 4.

147.9±4.89%, 120 Hz で124.0±6.90%と対照群に比べいづれも高めの値を示したが, 60 Hz の場合にのみ有意差を認めた. 更にこの1分目における60 Hz の振動暴露による皮膚交感神経活動の増加は, 120 Hz の振動暴露による場合に比較しても有意であった. 暴

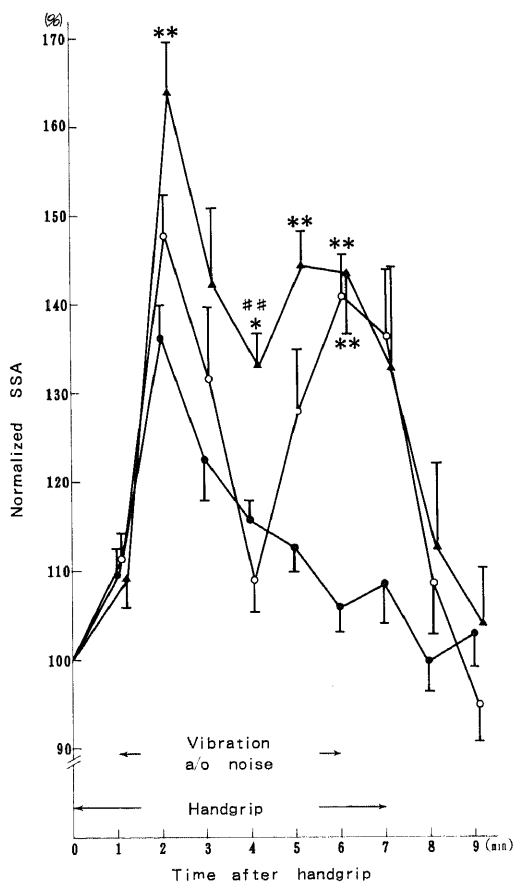


Fig. 11. Combined effect of local vibration and noise on skin sympathetic activity (SSA). ○, local vibration (60 Hz, 50 m/sec<sup>2</sup>); ●, noise (100 dB(A)); ▲, local vibration (60 Hz, 50 m/sec<sup>2</sup>) + noise (100 dB(A)). All exposures were applied during handgrip of the right hand with a constant strength of 2 kg. Each value represents the mean+SE(%) or mean-SE(%) obtained from 5 men. Statistical analysis was performed using one way ANOVA followed by Tukey's multiple comparison. Significantly different from the corresponding value of sole noise exposure: \*, p<0.05; \*\*, p<0.01. Significantly different from the corresponding value of sole vibration exposure: ##, p<0.01. For explanation of data calculation refer to legend in Fig. 4. a/o; and/or.

露3分目においてはむしろ120 Hz 暴露群の方が若干高いレベルを示したが, 60 Hz 暴露群との間には有意差を認めなかった. 暴露5分目においては両群共に対照群に比し有意な高値となり, 60 Hz で140.7±4.87%, 120 Hz で129.4±4.54%と高い皮膚交感神経活動のレベルを示した. 振動暴露中止後には60 Hz 暴露群では1分間対照群に比べ有意な高値を続け, 把持中止後には急速に活動が低下し, 把持中止後2分目には94.7±4.38%となった. 一方, 120 Hz 暴露群では, 暴露中止後も対照群に比べやや高めのレベルで推移し, 把持中止後1分目においても122.7±7.31%と対照群との間に有意な高値を示していた.

両振動数による皮膚交感神経活動の応答共, 振動暴露中は二峰性の増加を示し, 対照群と比べ有意な増加を示した. しかし, 暴露中および暴露中止後にわたって, 皮膚交感神経の活動レベルの変動は120 Hz 暴露時に比して60 Hz 暴露では著明であり, 対照群との比較を通して両振動数の皮膚交感神経活動の反応パターンにはかなりの差異があることが示唆された.

9. 振動および騒音暴露時の皮膚交感神経活動の応答パターンの比較ならびに振動と騒音の皮膚交感神経活動に対する複合影響 (図11)

60 Hz, 50 m/sec<sup>2</sup>の局所振動, 100 dB(A)の騒音のそれぞれの単独暴露と両者の複合暴露の場合とを比較した. 複合暴露開始1分目の皮膚交感神経活動は騒音100 dB(A)の単独暴露の場合より有意に増加しており (p<0.01), 暴露3分目の神経活動は振動, 騒音のいずれの単独暴露の場合よりも有意に高値であった. 更に, 暴露4分目, 5分目においても騒音のみの暴露の場合より有意に高値を示していた (p<0.01). なおこの5分目においては, 複合暴露のみでなく, 60 Hz の振動単独暴露群でも騒音単独暴露群より有意に高値であった (p<0.01). 暴露中止後の皮膚交感神経活動のレベルには複合暴露と単独暴露の間で有意差を認めなかった.

## 考 察

手持振動工具使用者に発症する手指の蒼白発作は, イタリアの Loriga によって1911年に初めて報告された<sup>24)</sup>. 以後, この症状がレイノー病<sup>25)</sup>にみられる手指の血管攣縮現象によく似ており, また振動工具使用との因果関係が強く認められたため, 職業性レイノー現象<sup>24)(25)</sup>あるいは振動起因性白指<sup>26)</sup>などと呼ばれるようになり, 職業病として社会的にも注目されてきた. 振動工具の使用は手腕という局所に作用するので, 手腕系振動 (以下局所振動または振動と略記) と称され, これ

に基づき振動障害とくにレイノー現象の発症機転はこの分野の研究における当面の最大の関心事でもある。

Lewis<sup>28)</sup>は、血管収縮神経末端が障害され、このため寒冷に対する手指血管の感受性が亢進することがレイノー現象の本質的な原因であるとした。Marshall<sup>29)</sup>は、レイノー現象の際の手のしびれ感は皮膚の変色部より中枢側にあることから、やはり神経の障害がレイノー現象の原因であると推測した。一方、Magos<sup>30)</sup>は、レイノー現象を示す患者では、局所寒冷負荷に対して手指の血管が過剰収縮を示すだけでなく、手の寒冷血管拡張反応が減弱ないし欠如していることを報告した。この報告の中で彼らは、血管収縮物質は絶えず末梢血管において不活化されている、というGuyton<sup>31)</sup>の実験結果に言及し、寒冷血管拡張反応の欠如は血管の障害により血管収縮物質の不活化ができなくなるためであろう、と推定している。

一方、振動障害に伴うレイノー現象の発現には、振動暴露を受ける局所血管に生じた何らかの器質的変化が関与している可能性が示唆されている。Asche<sup>32)</sup>は、振動起因性白指を示す手指の生検を行い、7人中4人に著明な動脈内膜の線維性肥厚を、3人に中膜の肥厚を認めている。古野<sup>14)</sup>は、ラットに対する実験的振動暴露で、暴露局所の動脈における内膜肥厚およびフィブリン血栓の形成を報告している。このように、振動暴露による血管壁の肥厚に伴って血管内腔が狭小化すると考えれば、寒冷負荷により指血流が著明に減少し、ついに内腔が閉塞し、レイノー現象を誘発する、という機序も考えられる。

このように、長期の振動暴露による局所血管壁、ないしは局所血管を支配する神経の器質的変化がレイノー現象発症の背景として存在する可能性が指摘されているが、一方、レイノー現象は基本的には反射機転で、血管運動神経反射を中心とした脊髄反射に基づきことが考えられ<sup>9)</sup>、仮説として想定されたりしているが<sup>9)</sup>、なお明白ではない。Nasu<sup>7)</sup>は一側手への振動負荷によって反対側手指における皮膚温の低下を認めたが、これは振動刺激が tonic vibration reflex を介した結果であると推定している。Pärkkilä<sup>33)</sup>は森林伐木作業に対して振動負荷実験を行い、振動暴露側のみならず反対側の手指においても皮膚血流量の減少を観察し、さらに反対側における血管攣縮発作が 60 Hz と 100 Hz の振動数を中心とした振動負荷で誘発されたことを報告している。また、Kondo<sup>34)</sup>は、振動暴露による手指の皮膚温の低下に関して、両側で有意な正の相関が認められることを示している。

今回著者は、振動障害に伴うレイノー現象の発現機

序を解明する研究の一環として、局所振動暴露が実際反対側の血管運動神経活動に影響を及ぼすかどうかを、近年特に注目される微小神経電図法を採用し、振動起因性白指の発症指として頻度の多い第2、第3指<sup>35)</sup>を支配する皮膚交感神経活動をヒトの正中神経から直接導出し、指皮膚血流量、両側皮膚温と合わせてモニターすることにより追究した。その際、手腕系振動負荷時の把持そのものの影響や振動負荷装置の駆動音の影響についてまず検討した。次に、実際に振動工具を使用する際に作業者が暴露され得る強大な騒音、ならびに手腕への局所振動のそれぞれに対する皮膚交感神経活動の応答に関して、暴露強度を変化させて考察した。さらに騒音と振動の複合影響についての知見をまとめた。

なお、皮膚交感神経活動のうちの血管運動神経成分をモニターする目的で用いた皮膚血流量の変化は、皮膚交感神経活動とほぼ同期した動きを示した。このことから皮膚交感神経の中の発汗神経成分は今回の実験条件下ではむしろ小さいこと、あるいは血管運動神経成分とは同方向への動きをすることが示唆され、本実験で記録した皮膚交感神経活動は、ほぼ血管運動神経活動を反映していると解釈することが可能であると思われる。しかし、厳密には、微小神経電図法を用いて血管運動神経の単一神経線維の活動を選択的に導出すること<sup>36)</sup>が必要となってくる。

一方、実験を行った室温では指皮膚温と指血流量は高い相関を示すとされる<sup>30)</sup>ため、皮膚温を用いて左右の末梢循環系における変化を比較した。その結果、把持開始以降は、把持側である右手の皮膚温の方が左手よりもやや低い傾向にあったが、把持に伴う機械的な影響を考慮すると、とくに 100 dB(A) の騒音、および局所振動暴露に対する左右の皮膚温の変化は、血流量の変化に対応して、左右共類似した変動とみなすことができると考えられた。

把持による静的運動負荷のみでも末梢循環に影響が及び、しかも把持力の増大と共に手指および手掌部の皮膚温の低下が大きくなることはすでに指摘されている<sup>34)35)</sup>。このため、把持を伴う局所振動負荷に際しては、把持による影響を考慮する必要がある。本研究では、この点を踏まえ、振動負荷時における把持と同じ把持力での対照実験を行うと共に、振動負荷前1分前より把持を開始し、振動刺激開始後の変化に対する対照値として把持中の値を用いた。また、把持力は、一定に保ちやすく、疲労感の小さいことを条件に、予備実験で十分に吟味した結果 2 kg と定めた。2 kg の把持力では、皮膚交感神経活動、皮膚血流、皮膚温のい

ずれにも5分間の把持によって有意な変化は認められなかった。もっとも、Deliusら<sup>39</sup>は、比較的強い握力で把持を行ったところ、把持開始後約1分目に6人中3人に軽度の皮膚交感神経活動の増加を認め、他の3人では変化がなかったとしているが、経時的観察ならびに統計学的検討はなされていない。このことから、把持開始後1分目における皮膚交感神経活動の変化は、強い握力では若干の変化が認められる可能性があるもの、今回の実験条件ではほとんどないと判断される。把持開始後1分目における両側の手指皮膚温の変化については、いずれの実験条件下においても反対側手指では軽度低下するものの、把持側ではむしろ若干上昇し、再現性の高いものであった。掌握運動に伴う血流の変化については、いくつかの報告がある。Humphreysら<sup>37</sup>は、把持による前腕血流量の変化について検討し、最大握力の70%以下の握力による把持では、把持側上肢における血流の増加が、活動筋のみならず非活動筋においても観察されたとしている。筋肉運動開始後の初期段階における血流増加の機序は、依然明らかではないが、Hilton<sup>38</sup>は動物実験から、筋肉運動に伴う局所の血流増加には脊髄およびそれより上位の反射機転は関与しないと推論している。以上のことを総合すると、把持側における皮膚温の軽度上昇は、前腕手掌部の筋肉運動に伴う手指血流の増加に起因すると考えることができる。他方、把持開始後1分目に反対側の手指皮膚温がわずかに低下傾向を示したのは、手指を支配する交感神経活動が若干増加したためであり、指血流の軽度の減少もこの変化を支持している。把持に対して皮膚交感神経活動が有意とはいえないまでも反応した機序は明らかではないが、神経活動の増加が把持直後に集中していたことと、これまでのヒトにおける皮膚交感神経活動に関する研究<sup>29,30</sup>から推察すると、把持という動作を開始する際の精神活動により、両側性に誘発された可能性が大きい。いずれにしても、把持開始後1分目における皮膚交感神経活動、皮膚血流、皮膚温の各モニターの安静時に対する変化率の再現性が高いので、以後の暴露実験における暴露前の対照値として、把持開始後1分目の値を用いることは妥当であると判断した。

次に、把持開始後2分目以降においては、皮膚交感神経活動は増加せず、むしろ低目のレベルでほぼ安定した状態を保っていることから、把持開始後1分目にみられたわずかな増加は一過性のものであり、血管運動神経活動に対する把持の影響は、本実験の条件ではないか、あっても1分目に限られる、と考えることができる。把持側である右手の皮膚温は把持中にわずかに

低下したが、これは諸家の報告<sup>39,40</sup>と一致しており、持続性筋収縮に伴う筋内圧の上昇による局所血管の機械的な圧排による<sup>37</sup>といえよう。他方、非把持側である左手の皮膚温は皮膚血流の回復に連れ上昇傾向を示し、把持開始後の両側皮膚温の変化に相違がみられる。このことから、把持に対する末梢循環系の応答は把持開始直後を除き、血管運動神経反射を介さない局所的な要因によると考えられる。

振動工具が使用される産業現場では、作業者は手腕系への局所振動のみならず、工具から発生する80-120dB(A)の強大な騒音や寒冷などの環境因子にも暴露されていることが多い<sup>40</sup>。振動障害のうち、特に末梢循環障害や末梢神経障害に関しては、このような環境因子が振動による効果を修飾している可能性が示唆されている。Jansen<sup>41</sup>は、振動工具使用者で、70dB(A)以上の騒音のある環境で働いている人では、騒音レベルがより低い環境で働いている人に比べて、レイノー現象の発症率が高いことを報告している。しかしながら、振動障害に対するこうした環境因子の関与の程度については疫学的調査のみからでは評価が困難であり、実験的条件下で関与する因子の種類や程度について系統的に分析を行うことが肝要である。本研究では、振動工具を使用する産業現場での重要な共存因子としての騒音の効果に着目した。

著者は、まず、本実験で使用した振動負荷装置の駆動に際して発生する騒音レベルである57dB(A)の騒音刺激に対する反応を観察した。この結果、騒音負荷開始後1分目には、皮膚交感神経活動、皮膚血流共負荷前と同程度のレベルに保たれ、把持のみを続けた場合の変化と比較して、57dB(A)の騒音刺激でもわずかなではあるが血管運動神経反射が誘発される可能性が示唆された。しかし、この変化は統計的に有意ではなく、さらに騒音負荷開始後2分目以降は把持のみを行っている場合と同様に、皮膚交感神経活動は負荷前よりむしろ低めのレベル、皮膚血流はやや高いレベルで推移し、しかも騒音負荷を中止しても特記すべき変化はみられなかった。両側の皮膚温の推移にも把持のみの場合に比し、何ら差異は認められなかった。これらのことから、57dB(A)の騒音による血管運動神経活動に対する影響はほとんどないといえる。つまり、本研究の局所振動負荷による皮膚交感神経活動の応答には実験中の振動負荷装置の駆動に伴う騒音の関与は小さく、主に振動刺激そのものに対する応答を反映したものと考えることができる。

一方、大きな騒音は末梢循環に影響を与えることが知られている。Matobaら<sup>42</sup>は、90dB(A)の騒音を10

秒間負荷し、指尖容積脈波の波高が負荷後5・6秒で最小となり、騒音負荷終了後30秒以内に負荷前値の波高に戻ることを観察している。Nakamuraら<sup>40)</sup>は、一定の握力で把持を行いながら100dB(A)の騒音を負荷したところ、把持側手指の組織血流量は負荷後1分目に減少傾向を示し、以後は回復したことを報告している。また、Pyykköら<sup>3)</sup>は、107dB(A)の騒音を負荷した後に指尖容積脈波の波高が両側性に低下することを認めている。著者は、100dB(A)の騒音の負荷によって、負荷後1分目において有意な皮膚血流の減少を観察し、この血流の変化が皮膚交感神経の活動性の亢進によるものであることを直接証明することができた。Okadaら<sup>40)</sup>は、ラットに対する100dB(A)の騒音暴露により、ノルアドレナリンの濃度が中脳において有意に減少し、また視床下部において減少傾向があったことを報告している。こうした所見から、大きな騒音はノルアドレナリンニューロンの活動を促し、聴覚伝導路としての位置関係にある中脳や視床下部を介して血管運動神経反射を誘発し、末梢血管反応を引き起こすが、このとき脳内ノルアドレナリンの合成が追いつかない可能性も示唆される。さらに、騒音負荷開始後2分目以降には、皮膚交感神経活動および皮膚血流は徐々に回復に向かっていることから、血管運動神経活動は騒音刺激に対して順応性を有することが示唆され、後述する振動刺激に対する皮膚交感神経活動の応答パターンと異なっていることは興味深い。騒音の単独暴露でレイノー現象が引き起こされたという例はなく<sup>40)</sup>、むしろ、振動と騒音との複合影響に注目し、主たる作用因子としての振動に騒音がいかなる関与をするかを検討する必要がある。

振動の条件を規定するには振動数と振幅が用いられるが、このうち振幅はISO基準および日本の振動規制法では加速度で測定することが勧められている<sup>40)</sup>。また、振動工具から発生する振動加速度の大きさは0.316-100m/sec<sup>2</sup>であるとされている<sup>47)</sup>。末梢循環系に対する振動刺激の効果には、特に振動工具の振動数域が大きな影響をもつとされ、末梢循環系に影響を及ぼしやすい振動数を追究していくことも重要な課題である。Andreeva-Galanina<sup>48)</sup>は、一連の研究を総合して、血管攣縮反応を引き起こす臨界振動数は25Hz以上であり、100-250Hzで最も起こりやすかったとしている。同じ頃Agateら<sup>29)</sup>は、40-125Hzの振動でレイノー現象が起こることを指摘している。しかし、これらは振動工具の振動数構成と対比した類推に基づくため実験的に吟味する必要がある。一方、野原<sup>49)</sup>は、実験的に加速度一定の条件で30-960Hzの範囲で振動数

応答を検討し、60Hzおよび480Hzでラットとヒトのいずれにも局所血流の有意な減少を認めたとしている。本研究では、加速度を50m/sec<sup>2</sup>と一定にし、この条件で有意な指尖血流量の減少が認められている60Hz<sup>49)</sup>と、交感神経血管運動神経反射を誘発しやすいと推定されている120Hz<sup>3)</sup>、の異なる2種類の振動数を選び、それぞれに対する皮膚交感神経活動の応答について比較検討を行った。

まず、60Hzの振動刺激に対する応答をみると、把持のみを行っている状態と比べ、60Hzの手腕系振動暴露により、暴露開始後皮膚交感神経活動は有意に増加した。すでにMiyamotoら<sup>50)</sup>は、ネコの足底に対する振動刺激により交感神経の反射活動が記録されたことを報告しているが、このことから本研究では振動刺激に対する体性-交感神経反射の存在を、ヒトにおいては初めて実証したことになるといえる。しかも騒音に対する応答に比べ、皮膚交感神経活動の有意な増加は負荷直後だけでなく、負荷開始後5分目にも認められ、騒音刺激に対する応答パターンとは明らかな相違がみられた。このことは、手掌部皮膚の受容器からの求心線維を介して伝わる振動刺激と、騒音刺激との、反射経路の違いに起因していることが示唆される。感覚刺激のうち、振動覚に対する皮膚受容器の感度の低下の程度は特に小さいといわれ、受容器は振動刺激負荷中比較的長期間にわたって放電を続けることができる<sup>51)-53)</sup>。このため体性-交感神経反射が持続的に誘発されたものと考えられる。受容器のなかでも手掌部皮膚に広範囲に分布するパチニ小体は、50-400Hzの振動数の振動刺激に高い感受性を示し<sup>54)</sup>、解剖学的にも交感神経線維との連絡が確認されている<sup>55)</sup>。今回用いた加速度では、60Hzの振動刺激がパチニ小体を介して交感神経反射を起こしたと推定されるが、その他の受容器として5-60Hzのより低い振動数の振動に反応するとされるマイスネル小体<sup>56)</sup>の関与も否定はできない。

60Hzの振動刺激中止後、皮膚血流が暴露前に比して有意に増加していることは、注目に値する。Schmidtら<sup>50)</sup>は、知覚神経の電気刺激による体性-交感神経反射を記録した実験結果から、刺激中止後、体性-交感神経反射が著しく抑制されたことを明らかにしている。本研究においても、統計学的に有意な変化とはならなかったものの、60Hz振動負荷中止後2分目、3分目において皮膚交感神経活動は暴露後最も低いレベルとなっており、皮膚交感神経活動が振動負荷中止後むしろ抑制されたため、皮膚血流量の増加として表れたのではないかと推察される。60Hzの振動の

負荷中および負荷中止後における両側皮膚温の変動がほぼ同期している所見からも、60 Hz の振動刺激に対する皮膚血流の変化は、血管運動神経反射を介した両側性の応答であることを裏づけることができる。皮膚温の回復が振動暴露側である右手では左手よりも速やかであるのは、振動負荷中止後における暴露側の末梢循環系の応答には交感神経反射の抑制に加え、血管の機械的圧迫の解除、筋収縮後の回復熱などを含めた組織の代謝<sup>57)</sup>といった種々の要因が関与した結果と考えられる。

120 Hz の振動刺激に対する皮膚交感神経活動ならびに皮膚血流の反応パターンは、60 Hz の振動の場合とかなり異なっており、振動数応答として興味深い。57 dB(A) の騒音に対する反応と比較すると 120 Hz の振動に対する皮膚交感神経活動は有意に増加しているが、120 Hz の振動刺激では 60 Hz の振動刺激の場合に比し反応の程度が小さく、刺激中止後の皮膚交感神経活動の低下や血流の増加は観察されず、相対的に個体差が大きい、という特徴がある。しかも、皮膚温の変化から、120 Hz の振動刺激に対する応答は、60 Hz の場合と同様、血管運動神経反射を介した両側性の動きであることを推察することができる。個体差に関しては、野原<sup>58)</sup>がラットの尾部に対してやはり 50 m/sec<sup>2</sup> の加速度で 30-960 Hz の振動数の振動負荷を行って局所血流の変化を調べたところ、120 Hz に対する反応に最も大きな個体差を認めたことと一致している。Kondo ら<sup>59)</sup>は把持を伴わない状態で一側の手に 125 Hz、98 m/sec<sup>2</sup> の振動刺激を負荷し、両手指に有意な皮膚温の低下を認めている。また、Färkkilä ら<sup>60)</sup>は、60 Hz と 100 Hz の振動数で反対側の血管攣縮が最も強く誘発されたとしているが、60 Hz の振動負荷に際して用いた加速度は 50 m/sec<sup>2</sup> であったのに対し、100 Hz の振動では 100 m/sec<sup>2</sup> と大きい<sup>61)</sup>。このような結果を考慮すると、120 Hz の振動に対する血管運動神経反射は、本研究で用いた加速度 50 m/sec<sup>2</sup> という振動強度では十分には誘発されにくく、そのため個人差も大きくなった可能性も考えられる。

著者は、60 Hz の振動と同時に、100 dB(A) の騒音も負荷して皮膚交感神経活動の変化を観察し、60 Hz の振動の単独暴露の場合よりも皮膚交感神経の活動性が亢進することを明らかにした。皮膚血流も、皮膚交感神経活動の変化に対応して、顕著な反応を示している。両側の皮膚温をみると、60 Hz の振動の単独暴露の場合と比し、低下した皮膚温の回復が遅延しているのが特徴的であり、血管運動神経反射を介した両側性の強い血管反応が負荷中止後も続いていることを示唆

している。局所振動と騒音の複合暴露による末梢循環系への影響に関しては、いくつかの報告がみられる。Dupuis<sup>55)</sup>は、局所振動負荷のみでは反対側の指尖容積脈波の波高は変化しなかったが、95 dB(A) の騒音を振動と同時に負荷することにより負荷開始後 1 分目に指尖容積脈波の波高が有意に小さくなったことを報告し、複合暴露の場合の末梢循環系に対する影響には騒音の効果が大きい、という見解を示している。一方、Hyvärinen ら<sup>4)</sup>は、指尖容積脈波の波高が 125 Hz の振動刺激のみでも低下し、騒音を途中で加えることにより波高が更に小さくなったと報告した。Nakamura ら<sup>49)</sup>は振動と騒音の複合影響を指尖血流量によって観察しているが、皮膚血流量の測定のみならず皮膚交感神経活動を直接導出して、振動と騒音の複合影響を調べた例は著者が最初である。

中枢神経を介した騒音刺激に対する交感神経反射活動と、脊髄を介した振動刺激に対する遠心性神経活動は、脊髄および交感神経節において統合されると考えられる。手指の皮膚を支配する交感神経発射を司る星状神経節において、興奮の時間的ないし空間的な加重、閉塞などが行われ、効果器が複数の神経衝撃に対する影響を同時に受けることが可能となる<sup>62)</sup>。このような機序により、振動と騒音の複合影響の解釈が可能となると思われる。

レイノー現象は寒冷暴露により誘発されることが多い<sup>12)</sup>ことから、寒冷に対する皮膚交感神経活動の反応も興味のあるところである。最近になり、Fagius ら<sup>63)</sup>は手指への冷刺激に対する反対側の皮膚交感神経活動の応答にはレイノー現象のある人と健康人との差がなかったことを報告しているが、レイノー現象のみられる患者では局所寒冷刺激に対して過剰な血管収縮がみられることも、しはしば指摘<sup>27)29)60)</sup>されてきているところである。Ekenvall ら<sup>64)</sup>は、手指血管における  $\alpha$ -アドレナリン受容体のうち長期の振動刺激によって  $\alpha$ -1 受容体が障害され、寒冷に対する反応に関与しているとされる  $\alpha$ -2 受容体の機能が優勢になるために寒冷に対する血管の過剰収縮が起こる、と推論している。このことから、振動の長期暴露により既に器質的障害、たとえば  $\alpha$ -1 アドレナリン受容体が障害<sup>65)</sup>されたり、血管内膜肥厚<sup>6)</sup>を生じた手指の血管では、たとえ寒冷に対して交感神経の応答には支障がなくても、血管自身が過剰な反応を示すことも推察される。

本研究における著者の成績からは、振動暴露を受け始める初期の段階では、振動暴露による皮膚交感神経活動の亢進に伴って手指の虚血状態がおこるが、それは暴露中止後の反射的血流増加により代償され得るこ



とが示唆された。振動起因性白指の発現機序として、このように初期には振動負荷中止後の反射的血流増加によって手指の虚血状態が代償されるものの、皮膚交感神経活動の亢進を基盤とし、長期の繰り返しの振動暴露による血漿ノルアドレナリン濃度の上昇に、振動負荷局所の血管平滑筋のノルアドレナリンに対する被刺激性の増加<sup>6)</sup>等が加味され、さらには血管壁の肥厚やアドレナリン受容体の障害<sup>6)</sup>が引き起こされ、寒冷暴露に対する過度の血管収縮および血管拡張障害もたらされるようになるという一連の諸変化を想定することができる。

### 結 論

微小神経電図法を用いヒトの手指を支配する皮膚交感神経活動を直接導出し、騒音や振動との関係を検討し以下の所見を得た。

1. 振動負荷装置の駆動音と同じ騒音レベルである57dB(A)の騒音刺激では、皮膚交感神経活動は有意には変化しなかった。

2. 100dB(A)の騒音暴露によって、皮膚交感神経活動は暴露開始後1分目に有意に増加し、以後は徐々に回復し、5分目には暴露前のレベルに戻った。

3. 60Hz, 50 m/sec<sup>2</sup>の手腕系振動負荷では、非負荷側の皮膚交感神経活動は、負荷開始後1分目と5分目に有意に増加し、負荷中止後はむしろ抑制される傾向がみられた。

4. 120Hz, 50 m/sec<sup>2</sup>の手腕系振動負荷による反対側(非負荷側)の皮膚交感神経活動の変化は小さく、個体差が大きかったため、負荷前に比し皮膚交感神経活動の有意な増加は認められなかった。

5. 60Hz, 50 m/sec<sup>2</sup>の手腕系振動と同時に100dB(A)の騒音を暴露したところ、皮膚交感神経活動は振動や騒音の単独暴露の場合よりも有意に増加し、暴露中止後も回復が遅延した。

以上から、振動工具使用に伴う振動や騒音の暴露により交感神経反射が誘発されることが判明し、レイノー現象発症の背景に血管運動神経反射の亢進が関与している可能性を支持する所見を得た。また、局所振動刺激と騒音刺激とは皮膚交感神経活動の応答パターンが異なり、振動刺激に対する応答性も、振動数の影響を受けることが示された。さらに、局所振動と騒音との複合影響が単独の場合よりも著しいことが指摘された。

### 謝 辞

稿を終えるに臨み、始終御懇篤なる御指導と御校閲を賜り

ました恩師岡田晃教授に深く感謝いたします。さらに、御指導、御助言をいただいた有泉誠助教授、井奈波良一助手、および教室の諸先生方に厚く御礼申し上げます。また、本研究遂行に際し御教示、御援助いただいた、名古屋大学環境医学研究所間野忠明教授、豊田工業大学斎藤満助教授に深く感謝申し上げます。

### 文 献

- 1) Okada, A., Yamashita, T., Nagano, C., Ikeda, T., Yachi, A. & Shibata, S.: Studies on the diagnosis and pathogenesis of Raynaud's phenomenon of occupational origin. *Br. J. Ind. Med.*, **28**, 353-357 (1971).
- 2) Taylor, W.: The vibration syndrome: Introduction. In W. Taylor (ed.), *The Vibration Syndrome*, 1st ed. pl-12, Academic Press, London, 1974.
- 3) Pyykkö, I. & Hyvärinen, J.: The physiological basis of the traumatic vasospastic disease: a sympathetic vasoconstrictor reflex triggered by high frequency vibration? *J. Work Environ. & Health*, **10**, 36-47 (1973).
- 4) Hyvärinen, J., Pyykkö, I. & Sundburg, S.: Vibration frequencies and amplitudes in the etiology of traumatic vasospastic disease. *Lancet*, **1**, 791-794 (1973).
- 5) 岡田 晃, 那須吉郎, 井上尚英: 振動障害の基礎・臨床, 第1版, 62頁, 日本労働総合研究所, 東京, 1988.
- 6) Kondo, T., Sakakibara, H., Miyao, M., Akamatsu, Y., Yamada, S., Nakagawa, T. & Koike, Y.: Effect of exposure to hand-transmitted vibration on digital skin temperature change. *Ind. Health*, **25**, 41-53 (1987).
- 7) Nasu, Y.: Changes of the skin temperature caused by local vibratory stimulation in normals and patients with vibration syndrome. *Yonago Acta Med.*, **21**, 83-99 (1977).
- 8) Färkkilä, M. & Pyykkö, I.: Blood flow in the contralateral hand during vibration and handgrip contractions of lumberjacks. *Scand. J. Work Environ. & Health*, **5**, 368-374 (1979).
- 9) Sakurai, T.: Vibration effects on hand-arm-system. Part 2. Observation of skin temperature. *Ind. Health*, **15**, 59-66 (1977).
- 10) Welsh, C. L.: The effect of vibration on digital blood flow. *Br. J. Surg.*, **67**, 708-710 (1980).

- 11) Hagbarth, K.-E. & Vallbo, A. B.: Mechano-receptor activity recorded percutaneously with semi-microelectrodes in human peripheral nerves. *Acta Physiol. Scand.*, **69**, 121-122 (1967).
- 12) Hagbarth, K.-E., Hallin, R. G., Hongel, A., Torebjörk, H. E. & Wallin, B. G.: General characteristics of sympathetic activity in human skin nerves. *Acta Physiol. Scand.*, **84**, 164-176 (1972).
- 13) Vallbo, A. B., Hagbarth, K.-E., Torebjörk, H. E. & Wallin, B. G.: Somatosensory, proprioceptive, and sympathetic activity in peripheral nerves. *Physiol. Rev.*, **59**, 919-957 (1979).
- 14) 古野利夫: 振動刺激による末梢動脈の内膜肥厚発生に関する研究. 十全医会誌, **95**, 313-325 (1986).
- 15) 間野忠明: Microneurography (I). 臨床脳波, **25**, 493-500 (1983).
- 16) 間野忠明: Microneurography (III). 臨床脳波, **25**, 629-638 (1983).
- 17) Bini, G., Hagbarth, K.-E., Hynninen, P. & Wallin, B. G.: Thermoregulatory and rhythm-generating mechanisms governing the sudomotor and vasoconstrictor outflow in human cutaneous nerves. *J. Physiol.*, **306**, 537-552 (1980).
- 18) Wallin, G.: Intraneural recording and autonomic function in man. In S. R. Bannister (ed.), *Autonomic Failure, A Textbook of Clinical Disorders of the Autonomic Nervous System*, 1st ed. p36-51, Oxford University Press, Oxford, 1983.
- 19) 岩瀬 敏, 間野忠明, 斎藤 満, 白水重尚, 菅屋潤壺: ヒトの皮膚交感神経活動と発汗量および皮膚血流量との関係について. 名大環研年報, **39**, 70-77 (1988).
- 20) 新田 淳, 世古淳也: レーザ・ドップラー流速計. 病体生理, **3**, 634-639 (1984).
- 21) 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).
- 22) Loriga, G.: Il lavoro con i martelli pneumatici. *Boll. Ispett. Lavoro*, **2**, 35-60 (1911).
- 23) Raynaud, M.: De l'asphyxie locale et de la gangrène symétrique des extrémités. (Thesis) Rignoux, Paris, 1862. [Cited by Birnstingl, M.: The Raynaud Syndrome. *Postgrad. Med. J.*, **47**, 297-310 (1971).]
- 24) Hunt, J. H.: Raynaud's phenomenon in workmen using vibrating instruments. *Proc. Roy. Soc. Med.*, **30**, 171-178 (1936).
- 25) Agate, J. N.: An outbreak of cases of Raynaud's phenomenon of occupational origin. *Br. J. Ind. Med.*, **6**, 144-163 (1949).
- 26) Lewis, T.: Experiments relating to the peripheral mechanism involved in spasmodic arrest of the circulation in the fingers, a variety of Raynaud's disease. *Heart*, **15**, 7-101 (1929).
- 27) Marshall, J., Poole, E. B. & Reynard, W. A.: Raynaud's phenomenon due to vibrating tools. *Lancet*, **1**, 1151-1156 (1954).
- 28) Magos, L. & Okos, G.: Cold dilatation and Raynaud's phenomenon. *Arch. Environ. Health*, **7**, 402-410 (1963).
- 29) Guyton, A. C.: Peripheral circulation. *Ann. Rev. Physiol.*, **21**, 239 (1959).
- 30) Asche, W. F. & Williams, N.: Occupational Raynaud's II. *Arch. Environ. Health*, **9**, 425-433 (1964).
- 31) 辻 隆道, 鈴木勝己, 三浦豊彦: 手持ち工具の振動の生体への影響. 工具振動と振動障害対策 (三浦豊彦編), 第1版, 167-222頁, 労働科学研究所, 東京, 1982.
- 32) Hallin, R. G. & Torebjörk, H. E.: Single unit sympathetic activity in human skin nerves during rest and various manoeuvres. *Acta Physiol. Scand.*, **92**, 303-317 (1974).
- 33) 大原孝吉: 皮膚温. 温熱生理学 (中山昭雄編), 第1版, 10-17頁, 理工学社, 東京, 1981.
- 34) 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 (1983).
- 35) Dupuis, H.: Combined effects of hand-arm-vibration, air temperature, noise and static load on skin temperature. In A. Okada & O. Manninen (eds.), *Recent Advances in Researches on the Combined Effects of Environmental Factors*, 1st ed. p295-307, Hashimoto Kakubundo Co., Ishikawa, 1987.
- 36) Delius, W., Hagbarth, K.-E., Hongel, E. & Wallin, B. G.: Manoeuvres affecting sympathetic outflow in human skin nerves. *Acta Physiol. Scand.*, **84**, 177-186 (1972).
- 37) Humphreys, P. W. & Lind, A. R.: The blood flow through active and inactive muscles of

- the forearm during sustained handgrip contractions. *J. Physiol.*, **166**, 120-135 (1963).
- 38) **Hilton, S. M.**: A peripheral arterial conducting mechanism underlying dilatation of the femoral artery and concerned in functional vasodilatation in skeletal muscle. *J. Physiol.*, **149**, 93-111 (1959).
- 39) **中村秀喜**: 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. *日衛誌*, **42**, 648-657 (1987).
- 40) **Matsumoto, T.**: Prevalence of disturbances induced by exposure to hand-arm vibration. Development and present status in Japan. In G. Gemne & W. Taylor (eds.), *Hand-Arm Vibration and the Central Autonomic Nervous System*, 1st ed. p47-54, Multi-science Publishing Co., London, 1983.
- 41) **Jansen, G.**: Zur Entstehung vegetativer Funktionstörungen durch Lärmeeinwirkung. *Arch. Gewerbepath. Gewerbehyg.*, **17**, 238-261 (1959).
- 42) **Matoba, T., Kusumoto, H., Omura, H., Kotorii, T., Kuwahara, H. & Takamatsu, M.**: Digital plethysmographic responses to auditory stimuli and its patients with vibration disease. *Tohoku J. Exp. Med.*, **115**, 385-392 (1975).
- 43) **Nakamura, H., Nohara, S., Nakamura, H. & Okada, A.**: Combined effects of local vibration and noise on peripheral circulatory function. In A. Okada & O. Manninen (eds.), *Recent Advances in Researches on the Combined Effects of Environmental Factors*, 1st ed. p762-781, Hashimoto Kakubundo Co., Ishikawa, 1987.
- 44) **Okada, A., Ariizumi, M. & Inaba, R.**: Combined effect of whole body vibration and noise on brain norepinephrine. In O. Manninen (ed.), *Combined Effects of Environmental Factors*, 1st ed. p233-244, Keskuspaino Central Printing House, Finland, 1984.
- 45) **Gemne, G.**: Soviet documentation of neuropsychiatric symptoms in the hand-arm vibration syndrome. Aspects on diagnosis, pathogenesis, and epidemiology. In G. Gemne & W. Taylor (eds.), *Hand-Arm Vibration and the Central Autonomic Nervous System*, 1st ed. p129-134, Multi-science Publishing Co., London, 1983.
- 46) **岡田 晃**: 振動障害の概念. *振動障害. 研究動向と診療の実際*, 第1版, 1-23頁, 篠原出版, 東京, 1982.
- 47) **的場恒孝**: 振動ストレスと自律神経. *自律神経*, **24**, 484-487 (1987).
- 48) **ア・ア・レタベータ&エ・ア・ドロギチナ監修 (伊藤史子訳)**: 産業における振動, 第1版, 161頁, 労働科学研究所, 東京, 1975.
- 49) **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).
- 50) **Miyamoto, J. & Alanís, J.**: Reflex sympathetic responses produced by activation of vibrational receptors. *Jap. J. Physiol.*, **20**, 725-740 (1970).
- 51) **Mountcastle, V. B., Talbot, W. H., Darian-Smith, I. & Kornhuber, H. H.**: Neural basis of the sense of flutter vibration. *Science*, **155**, 597-600 (1967).
- 52) **Merzenich, M. M. & Harrington, T.**: The sense of flutter-vibration evoked by stimulation of the hairy skin of primates: comparison of human sensory capacity with the responses of mechanoreceptive afferents innervating the hairy skin of monkeys. *Exp. Brain Res.*, **9**, 236-260 (1969).
- 53) **Talbot, W. H., Darian-Smith, I., Kornhuber, H. H. & Mountcastle, V. B.**: The sense of flutter-vibration: comparison of the human capacity with response patterns of mechanoreceptive afferents in the monkey hand. *J. Neurophysiol.*, **31**, 301-334 (1968).
- 54) **Lundström, R.**: Responses of mechanoreceptive afferent units in the glabrous skin of the human hand to vibration. *Scand. J. Work Environ. Health*, **12**, 413-416 (1986).
- 55) **Santini, M., Ibata, Y. & Pappas, G.**: The fine structure of the sympathetic axons within the Pacinian corpuscle. *Brain Res.*, **33**, 279-287 (1971).
- 56) **Schmidt, R. F. & Schönfuss, K.**: An analysis of the reflex activity in the cervical sympathetic trunk induced by myelinated somatic afferents. *Arch. Ges. Physiol.*, **314**, 197-198 (1970).
- 57) **永坂鉄夫, 渡辺 悟**: 人体生理学, 第1版, 225-227頁, 廣川書店, 東京, 1985.
- 58) **Sato, A. & Schmidt, R. F.**: Somatosympathetic reflexes: afferent fibers, central pathways, discharge characteristics. *Physiol. Reviews*, **53**,

916-947 (1973).

59) Fagius, J. & Blumberg, H.: Sympathetic outflow in the hand in patients with Raynaud's phenomenon. *Cardiovasc. Res.*, **19**, 249-253 (1985).

60) Ekenvall, L. & Lindblad, L. E.: Is vibration white finger a primary sympathetic nerve injury?

*Br. J. Ind. Med.*, **43**, 702-706 (1986).

61) Azuma, T., Ohhashi, T. & Sakaguchi, M.: Vibration-induced hyperresponsiveness of arterial smooth muscle to noradrenaline with special reference to Raynaud's phenomenon in vibration disease. *Cardiovasc. Res.*, **12**, 758-764 (1978).

**Experimental Studies on the Effect of Vibration and Noise on Skin Sympathetic Activity** Mari Naito, Department of Public Health, School of Medicine, Kanazawa University, Kanazawa 920—J. *Juzen Med. Soc.*, **98**, 448—466 (1989)

**Key words** skin sympathetic activity in median nerve, local vibration, noise, combined exposure, finger blood flow

#### Abstract

The purpose of the present study is to clarify the role of a sympathetic vasomotor reflex in the pathogenesis of occupational Raynaud's phenomenon. Multiunit sympathetic activity was recorded from median nerve fascicles supplying glabrous skin of the left hand at elbow level in 5 healthy subjects. Vasomotor events accompanying the neural activity were monitored by simultaneous recordings of skin blood flow using the laser doppler method and skin temperature in the neural innervation zones. At room temperature ( $23 \pm 1^\circ\text{C}$ ), spontaneous bursts of sympathetic activity were regularly observed in skin nerve fascicles of the median nerve, followed by transient signs of vasoconstriction in the left middle finger. No significant change in sympathetic activity was observed during handgrip of the right hand under a constant grasping power of 2 kg. Subjects maintained the same grasping power of the right hand during exposures to local vibration and/or noise in random order, each lasting 5 minutes with intervals of 20 minutes. A two-peaked significant increase in sympathetic outflow was observed during local vibration exposure to the right hand with a frequency of 60 Hz and an acceleration of  $50 \text{ m/sec}^2$ , followed by a post-exposure period revealing a relative suppression of sympathetic activity and a significant increase in blood flow. The response to a different frequency of vibration, 120 Hz, with the same acceleration, was much smaller, accompanied by larger interindividual variation. Exposure to noise at 57 dB(A), which was the noise level associated with driving of the vibration generator, produced no significant change in sympathetic activity. Noise at 100 dB(A) showed only an initial effect on skin sympathetic activity, whereas when combined with local vibration at 60 Hz, a pronounced increase in the neural activity was noticed, indicating a combined effect of vibration and noise. These results from a direct recording of skin sympathetic activity suggest a sympathetic vasomotor reflex mechanism triggered by use of vibrating tools.