原 著

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

伊 藤 史 子*

EFFECTS OF LOCAL VIBRATION EXPOSURE ON THE
CEREBRAL BLOOD FLOW

On the Relation of Brain and Finger Blood Flow to Vibration Frequencies

Fumiko ITO†

The healthy young men aged from 18 to 26 years were examined whether some vibrational stimuli may affect the vasoreaction in the brain and in a finger.

The vasoreaction was observed on each subject after the exposure to vibration of frequencies 32, 64, 140 and 250 Hz with acceleration level at 98 m/sec² and compression force at the vibrating grip of 5 kg, while in the control state the vibration was exactly the same except the vibrational stimuli.

Vasodilation and vasoconstriction were observed when low frequency and high frequency vibrational stimuli were given respectively. Vasoreactive pattern of the brain was almost the same as that of the finger.

I. 緒 言

振動病はわが国でも最も深刻な問題となっている職業病の一つである。この疾病の臨床像は、レイノー現象に代表されるような末梢循環系の異常や知覚障害を主徴とする末梢神経系の異常、さらに自律神経失調や無力症あるいは前庭症状などを示す中枢神経系の機能的異常が複雑に絡み合い、今日では「振動病」として系統的全身の疾患と見なされている¹⁻³⁾。

とくに、これらの多様な症状のうちでも末梢循環系の異常は本疾患の基本的な症状の一つと解されている。

末梢循環系の異常は、はじめ工具の振動を直接受ける上肢に最も強く現われるが、進行した段階には足にもレイノー現象などの症状が見られることから、血管障害は全身化すると考えられている。このような時期には脳や

心臓にも血管の発作性攣縮によると考えられる症状を起こすものがあり⁴⁾、近時、振動が諸臓器の循環動態に与える影響が注目されている。

しかし、これまで、振動暴露でこれらの重要臓器の血液循環はどのような影響を受けるかを実験的に調べた研究はない。この問題を明らかにすることは、振動病の病因を解明するために示唆を与え、また、労働衛生学的にも重要である。

そこで、本研究ではヒトの手に加速度が一定で種々の周波数条件の振動を暴露し、脳の血液循環の変化をインピーダンス脈波計を用いて観察した。また同時に、指の血流を同じ方法で測定し、振動刺激に対する体末梢血管(指血管)と脳血管の反応について比較検討した。

II. 実 験 方 法

1. 被験者および実験条件

被験者は実験に習熟した18~26歳(平均21歳)の健康な男子学生10名である。

実験は被験者の頭部を支持安定した椅座位で行なった(Fig. 1)。腕は躯幹からわずかに離してほぼ垂直に下方に伸ばし、手は振動子のグリップを軽く握らせ、真上から5kgの力を加え押した状態を保たせて振動を暴露

* 北海道大学医学部公衆衛生学教室
(現在) 金沢大学医学部公衆衛生学教室
昭和52年7月13日受付

† Department of Public Health, Hokkaido University
School of Medicine
Present address: Department of Public Health,
Kanazawa University School of Medicine
Received for publication, July 13, 1977

Fig. 1. Posture for vibration exposure.

した。

振動子のグリップはアルミ合金製の丸棒で作り、これを明石製作所製の動電式 ASE-42 TS 型加振機の振動板上に固定した。振動子のグリップには、振動レベル測定のための加速度型ピックアップを取り付け、実験中、振動加速度レベルと加速度波形を監視できるようにした。また、グリップにはストレンゲージを貼りつけ、グリップへの押力を被験者の目の前に置いた力指示計に示し、常に 5 kg の力を維持するようにさせた。

暴露した振動は、周波数 32 Hz (低周波), 64 Hz (中周波), 140 Hz および 250 Hz (高周波) の四種類のほぼ正確な正弦波で、加速度は垂直方向で 98 m/sec^2 (ピーク値) である。暴露時間は各条件とも連続 20 分である。

2. 対照実験

振動暴露時には振動に付随する騒音にも暴露され、グリップへの押力維持、姿勢を一定時間保持するための緊張など諸要因によって血管反応は影響を受けると思われるので、これらの影響を見る目的で対照実験を行なった。この場合、被験者には振動暴露実験と同一人を用い、同一姿勢同一肢位で加振装置から遊離した同型同質のグリップを握らせ、かつ 5 kg の力で押させ、力指示計で押力を監視させ、同時に加振装置は振動暴露時と同じ条件で作働させておき、振動暴露時と同様の騒音を暴露した。

なお、加振装置が作働中に発生する騒音の騒音レベルは 32 Hz の振動条件のとき、60 dB(A) [75 dB(C)], 64 Hz のとき 67 dB(A) [83 dB(C)], 140 Hz のとき

79 dB(A) [83 dB(C)] および 250 Hz のとき 80 dB(A) [88 dB(C)] で、無振動状態のバックグラウンドの騒音レベルは 60 dB(A) [68 dB(C)] であった。また実験室の気温は $21 \sim 23^\circ\text{C}$ に保持し、実験条件の提示順序は、暴露実験および対照実験とも個人ごとに無作為に決め、同一人には 1 日 2 条件以内とした。

3. 血流の測定

脳および指の血流測定には、作成した定電流四電極方式インピーダンス脈波計を用いた⁵⁾。脳血流の測定は前頭部で行ない、電極には平板銀電極を用い、電流電極(大きさ $3 \times 4 \text{ cm}$)を両側側頭部に置き、これらの間に高周波定電流を流し、血量の変化に伴うインピーダンスの変化を前頭部に約 10 cm の間隔で左右対称に置いた検出電極(大きさ $2 \times 3 \text{ cm}$)により電位差の変化として扱えた。電極はずれないように上からゴムバンドで圧迫して固定した。

指血流の測定は、振動暴露側の左手第 III 指を用い、各測定時点において心臓の高さの台の上に上肢を載せた状態で行なった。電極には接着テープ付き幅 6 mm のアルミニウム円周電極(米国 3 M 社製)を用い、四枚の電極を指に巻きつけ、約 3 cm の間隔に巻いた内側の二枚の検出電極間の血流を測定した。電極類にはいずれも食塩糊を塗布し、皮膚との接触を良くした。

電極からの脈波信号は、交流増幅器(三栄測器製 Biophysigraph 180 System)で増幅し、時定数 0.3 でペン書きレコーダーの記録紙上に連続的に記録し、振動暴露実験および対照実験とも、実験刺激前安静時と 20 分間の実験刺激終了後 1 分目および 10 分目付近において紙スピード 50 mm/sec で脳のインピーダンス脈波を測定し、ついでただちに指のインピーダンス脈波を測定した。両脈波の測定の時間的なズレは数秒以内である。また、同時に心電図第 II 誘導も記録した。なお、きれいな脈波を得るために電極と脈波計をつなぐリード線にはすべて同軸ケーブルを用いた。

4. 脈波の解析

Nyboer⁶⁾ はインピーダンス脈波法で得られた測定値から次式が電極間に含まれる組織における血管径の変化に基づく血量の変化を反映するとしている。

$$\frac{1}{Z_B} = -\frac{\Delta Z}{Z_0^2} \quad (\text{V})$$

ここで、 Z_B : 組織の血液抵抗

Z_0 : 組織の固有抵抗

ΔZ : 脈流による可変抵抗の平均値

本研究では、各測定時点における $1/Z_B$ を求め、これを

Fig. 2. Effects of vibration exposure on cerebral blood flow.

Asterisks show statistically significant changes between vibration exposure groups.

血流指標 (Blood Flow Index) とし、脈拍補正し、個人ごとに実験刺激前値と20分間の実験刺激後の各時点の差を求め、これを用いて解析を行なった。なお、Zは脈波計のメーターから読み取り、 ΔZ は測定時付近においてプランメーターにより求めた6~8個の脈波面積を用いて算出した。

III. 実験成績

各種周波数条件における振動暴露群および対照群の脳および指の血流の変化は Fig. 2 および Fig. 3 に示すとおりである。なお、以後、振動暴露実験および対照実験ともに実験条件を加振機の周波数条件をもって表現することとする。

振動周波数によって血流指標は影響を受けるかどうかを分散分析法で検討すると、振動暴露群においては、脳では1分目および10分目とも有意であった (ともに $p < 0.01$)。また指においても両時点でも有意であった (1分目 $p < 0.025$, 10分目 $p < 0.001$)。しかし、対照群においては、脳・指ともに有意ではなく、したがって、振動周波数は脳および指の血流に影響を与えていると言える。

各周波数間の血流指標の差では、脳においては、1分目では250 Hzと32 Hzの間および140 Hzと32 Hzの間 (ともに $p < 0.01$)、250 Hzと64 Hzの間 ($p < 0.05$)。10分目では250 Hzと32 Hzの間および140 Hzと32 Hzの間 (ともに $p < 0.01$)、140 Hzと64 Hzの間 ($p < 0.05$) で有意であった。すなわち、いずれの

Fig. 3. Effects of vibration exposure on finger blood flow.

Asterisks are the same as in Fig. 2.

時点でも高周波と低周波の間および高周波と中周波の間に有意差を認めた。また、指においては、1分目では250 Hzと32 Hzの間 ($p < 0.01$)、140 Hzと32 Hzの間 ($p < 0.025$)、10分目では250 Hzと32 Hzの間および140 Hzと32 Hzの間 (ともに $p < 0.001$)、250 Hzと64 Hzの間 ($p < 0.05$) および140 Hzと64 Hzの間 ($p < 0.01$) で有意であった。すなわち、指においても、高周波と低周波の間および高周波と中周波の間で血流指標の差は有意であった。

各周波数条件における血流指標の母平均の信頼区間を推定し、血流変化の方向性、すなわち、血流の減少かあるいは増加かをみると、有意水準5%では、振動暴露群においては、脳の1分目では32 Hzで信頼区間の幅は血流指標の0レベル以上にあり、有意な血流増加を認め、140 Hzおよび250 Hzにおいては信頼区間は0レベル以下にあり、有意な血流減少を認めた。また、10分目においても同様に32 Hzにおいて血流増加は有意であり、140 Hzで血流減少は有意であった。さらに、指においては、1分目では32 Hzにおいて有意な血流増加を認め、また10分目でも同様に32 Hzでの血流増加は有意であり、140 Hzにおいて有意な血流減少を認めた。一方、対照群では有意な血流減少が脳に見られた。

振動暴露による脳および指の血流変化の方向にどのような関係があるかをみると、高周波域では250 Hzの10分目において相関が認められ ($r = 0.82$, $p < 0.01$)、低周波域では32 Hzの1分目において相関が認められた ($r = 0.77$, $p < 0.05$) (Fig. 4)。

つぎに、振動刺激のみの血流に対する影響をみるた

Table 1. Effects of vibration frequencies on the brain and finger blood flow.

Time after vibration exposure		Brain		Finger	
		1 min	10 min	1 min	10 min
Vibration frequency (Hz)	32	—	↑↑	—	↑
	64	—	↑↑↑	—	—
	140	—	—	—	—
	250	—	↓	—	—

Increase of blood flow: ↑ ($p < 0.05$), ↑↑ ($p < 0.025$), ↑↑↑ ($p < 0.01$)Decrease of blood flow: ↓ ($p < 0.05$)

Fig. 4. Relation of blood flow indices between brain and finger.

め、個々人ごとに振動暴露時と対照実験時の血流指標の差を求め、差の平均値の t 検定により血流変化の方向性をみると (Table 1), 脳においては、10 分目の 32 Hz ($p < 0.025$) および 64 Hz ($p < 0.01$) で血流増加は有意であり、250 Hz で有意な血流減少を認めた。指においては 10 分目の 32 Hz で血流増加は有意であった ($p < 0.05$)。

IV. 考 察

振動工具の振動スペクトルと振動病の臨床像を対比した研究から、末梢血管の異常は暴露した振動の周波数によって病像が異なることが推察されている。すなわち、職業的な振動暴露で生じた振動障害では、患者が暴露されていた振動の振動スペクトルが高周波型である場合には、手に血管攣縮による症状が起こるのが特徴的であり、低周波型の振動では、アトニー状態が優位である病像を呈すると指摘されている⁴⁾。

また、高周波振動に長期間暴露され、疾病が進行した段階には血管障害は手だけでなく、全身に拡がるのが指摘されている⁴⁾。このような段階には発作性の頭痛、めまい、一過性の意識障害など脳血管の攣縮に基づくと思われる症状が見られるほか、中枢神経系のさまざまな機能異常による症状も強い。

振動病において中枢神経系症状の発現に脳循環の異常がどのような役割を演じているか明らかではないが、rheoencephalography による研究では^{4,7)}、患者のうち体末梢血管障害が強く、その範囲が広いものほど脳血流も減少していると述べている。

そこで、本研究では手への振動暴露で脳血管にも反応が起こりうるかどうかその可能性を検討するため、周波数の異なる振動を暴露し、脳の前頭部において血流を観察した。

その結果、脳においても実験的な振動刺激で血管反応が起こり、それは暴露振動の周波数によって異なっていた。この場合、測定した脳のインピーダンス脈波は前頭部の血流を反映するものであり、脳全体の血流変化を反映するものではないので、この成績をもって脳全体の变化を推測することはできないが、振動刺激という物理的環境刺激によっても脳血管は影響を受けることが明らかにされた。

すなわち、低周波振動暴露で血管は拡張し、高周波振動暴露で収縮した。また、振動暴露時には付随する騒音にも暴露され、騒音レベルによってはこれが単独でも脳および指の血管に収縮反応が起こることが知られているので^{8,9)}、対照実験を行ない騒音刺激などの影響を見たが、ほぼどの周波数条件でも血流の減少、すなわち血管の収縮が認められ、本実験においても振動に付随する騒音が血管反応に及ぼす影響は無視できないことが推察された。

しかし、振動暴露群と対照群の反応の差から、振動刺

激のみの影響を見ても、低周波で血管は拡張し、高周波で収縮する(10分目)のを認めた。さらに、同時に観察した指においても低周波振動刺激で血管は拡張した。また高周波領域では血管の収縮傾向がうかがわれた。

以上のように、刺激振動の周波数によって血管反応が異なること、すなわち、周波数依存性があることが明らかにされた。このような、振動周波数と末梢血管反応との関連をヒトで調べた研究はこれまでもいくつかあるが、いずれも末梢血管についてのものである。それによると、低周波振動暴露では、木村¹⁰⁾、那須¹¹⁾が皮膚温の低下を認め、血管は収縮すると述べている。一方、山中¹²⁾は指尖光電脈波による研究で50 Hz以下の振動は血管を拡張させると述べている。高周波振動の影響を見たものでは、Butkovskaya¹³⁾、那須¹¹⁾は血管の収縮が起こっているが、他の成績は必ずしも一定の法則に従っていない⁴⁾。

このように、周波数と血管反応の関係について必ずしも一定の結論が得られていないのは測定指標の違い、付随する騒音などの評価がなされていないことも問題になるであろう。また、マリンスカヤ⁴⁾は時間と強さの組合せによっては、同じ周波数でも血管反応は異なるとしている。このようなことを考慮すると、本実験の成績と他の研究成績との比較は単純には行ない難いであろう。

本研究での振動条件は現実の産業現場でみられる条件に近いものを採用し、この条件において、振動を负荷した手だけでなく、脳において血管反応が見られ、しかも周波数によって反応の性質が異なることを明らかにしたことは労働衛生学的にも意義があろう。また、脳と指で見られた周波数依存性のパターンは先に述べた振動病における血管障害の周波数依存性のパターン、すなわち、高周波型振動では血管攣縮による病変が起こり、低周波型振動で血管はアトニー状態を主徴とする病変が起こるといふ臨床的所見に符合したことは興味深い。

なお、振動刺激に対する血管反応の発現機序については、主に次の二つの機序が想定される。すなわち、Gagov ら¹⁴⁾は、ネコの肢に100 Hzの振動刺激を与えた場合、肢への神経支配を除いても血管反応が現われることから、振動の直達的作用により血管平滑筋の収縮が起こると推論した。一方、Liedtke ら¹⁵⁾は、イヌに低周波振動刺激を与えた場合、神経と血管を残して皮膚と関節を離断して振動伝播を遮断した肢でも血管反応が起こることから、振動刺激による血管反応は本質的に神経反射機序によるものと述べている。そこで、脳に起こった血管反応について考察してみると、まず、振動が手から各臓器に伝播して血管壁に直達的に影響を及ぼす可能性が

問題となろう。すなわち、振動刺激が人体を伝播するとき、伝播の程度は周波数によって異なり、高周波振動は低周波振動に比して伝播しにくいことが知られている¹⁶⁾。とくに本実験の条件の振動では、手に負荷する振動の加速度レベルを等しくしても、低周波と高周波では手から頭部への伝播には著しい差があり、高周波領域の振動の遠隔臓器への伝播は極めて少ないと考えられる。にもかかわらず、脳と指という異なる部位において高周波振動刺激によって血管の収縮反応が認められたことは、脳の血管反応は振動の血管への直達的作用の結果というより、むしろ、上位中枢を介した神経反射によると考えるのが妥当であろう。さらに、血管反応の周波数依存性の機序について考察してみると、振動刺激の刺激頻度の違いによって知覚神経に発生する求心性インパルスの頻度が異なり、したがって、求心性刺激を受けて起こる血管運動反射における血管運動神経のインパルスの頻度もまた外的刺激の刺激頻度によって何らかの規制が与えられるためと推察される。このことは、動物を用いた研究から、外界から与えられた機械的振動刺激はPacini小体で受容されるのであるが、この受容器は刺激振動の周波数の広い範囲においてその周波数に一致した頻度で知覚神経に求心性インパルスを送ることが確かめられているので¹⁷⁾、末梢知覚線維あるいは交感神経性血管収縮線維に一定の刺激頻度で電気刺激を与えた場合、昇圧反応や血管反応の性質と大きさは刺激の強さとともに刺激頻度に強く規定されることを明らかにした諸研究の成績は¹⁸⁻²²⁾、血管反応に周波数依存性が認められたことの神経学的な根拠を示すものと思われる。

V. 結 論

振動刺激による脳の血管反応をみる目的で、健康な男子学生10名を被験者とし、左手に振動子のグリップへの押力5 kgの状態、加速度98 m/sec²、周波数32 Hz(低周波)、64 Hz(中周波)、140および250 Hz(高周波)の4種類の正弦波垂直振動を20分間暴露し、また、対照実験として上と同一条件で振動因子のみを欠く条件を用い、実験刺激終了後1分目と10分目において脳および指の血流をインピーダンス脈波計を用いて測定し、両者の血管反応を観察し次の結論を得た。

(1) 振動暴露により脳にも血管反応が起こり、それは振動周波数によって異なっていた。すなわち、低周波振動暴露で血管は拡張し、高周波振動暴露で収縮した。

(2) 同時に観察した指においても低周波振動暴露で血管は拡張した。高周波振動暴露では血管が収縮する場合があった。

(3) 振動暴露による脳と指の血流変化は、高周波 (250 Hz の10分目) および低周波 (32 Hz の1分目) で正の相関が認められた。

(4) 対照実験により振動刺激のみをとり除いた諸要因の血流への影響をみたが、脳においても指においてもどの条件でも血流の差は認められなかった。

(5) 振動刺激による血管反応は、脳では低周波および中周波で拡張を示し、高周波では収縮する場合があった。また、指においても同様に低周波で血管拡張が認められる場合があった。

(6) 振動暴露によって起こった血管反応は、本実験の条件では暴露終了後10分では回復しなかった。

ご教示ご校閲を賜った金沢大学岡田晃教授に深謝の意を表し、本実験に際し、振動実験施設の 使用の機会をお与えくださった労働科学研究所副所長三浦豊彦博士ならびに種々協力くださった富永洋志氏、肝付邦憲氏、ほか研究所の方々に深謝いたします。

なお、本論文の要旨は昭和52年4月、第50回日本産業衛生学会において報告した。

文 献

- 1) Андлеева-Галанина, Е.Ц., Дрогичина, Э.А. и Артамонова, В.Г.: Вибрационная Волезна, 95, Медицина, Москва, 1961.
- 2) 高松 誠, 渡部真也: 振動障害, 久保田重孝編著: 職業病とその対策, 511—559, 興生社, 東京, 1968.
- 3) 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), 58—74, 金原出版, 東京, 1968.
- 4) レタベート, А.А., Дрогичина, Э.А.監修: 産業における振動, 131—257, メディツィーナ出版, モスクワ, 1971, 伊藤史子訳, 渡部真也監修, 労働科学研究所, 1975.
- 5) 伊藤史子: 局所振動暴露による脳循環系への影響——Impedanceplethysmography の脳循環測定への応用——, 金沢大学十全医学会雑誌, 87(1): 掲載予定.
- 6) Nyboer, J.: Electrical Impedance Plethysmography, 84—288, Charles C. Thomas, Springfield, 1970.
- 7) Остапенко, О. И., Пятакович, Ф. А.: Состояние церебральной гемодинамики болезненных вибрационной болезнью по данным реоэнцефалографии, Гиг. Тр., 16: 52—53, 1972.
- 8) 伊藤史子, 渡部真也: 騒音の末梢循環系への影響——指

循環および脳循環について——, 第50回日本産業衛生学会講演集, 412—413, 1976.

- 9) Алексеев, С.В., Мазуркевич, К.С. и Храбова, О.П.: Влияние интенсивного шума на микроциркуляцию в горном мозге экспериментальных животных. Гиг. Тр., 7: 24—26, 1972.
- 10) 木村菊二, 阿久津綾子, 三浦豊彦: 振動における手背皮膚温の変動, 労働科学, 38: 268—277, 1962.
- 11) 那須吉郎: 振動刺激による皮膚温の経時的変化, 第47回日本産業衛生学会講演集, 452—453, 1974.
- 12) 山中 力: 緊張性振動反射の臨床応用, 臨床脳波, 13: 464—469, 1971.
- 13) Butkovskaya, Z. M. and Bolderev, Yu. G.: Experimental Investigation of the effect of high frequency vibration on the peripheral blood circulation, Gig. Sanit., 32: 353—358, 1966, [English translation].
- 14) Gagov, S., Petrov, L. and Natschev, T.: Untersuchung über die lokale Gefäßwirkung mechanischer Vibrationen an der Katzenhinterextremität, Z. Gesamte Exp. Med., 157: 37—46, 1972.
- 15) Liedtke, A. J. and Schmidt, P. G.: Effect of vibration on total vascular resistance in the forelimb of the dog, J. Appl. Physiol., 26: 95—100, 1969.
- 16) ラズモフ, イ・カ: 人体に対する振動エネルギーの影響, レタベート, А.А., Дрогичина, Э.А.監修: 産業における振動, 58—69, メディツィーナ出版, モスクワ, 1971. 伊藤史子訳, 渡部真也監修, 労働科学研究所, 1975.
- 17) 勝木保次編: 生理学大系Ⅳ, 感覚の生理学, 615—626, 医学書院, 東京, 1967.
- 18) Gruber, C. M.: The response of the vasomotor mechanism to different rates of stimuli, Am. J. Physiol., 42: 214—227, 1917.
- 19) Celander, O. and Folkow, B.: A comparison of the sympathetic vasomotor fiber control of the vessels within the skin and the muscle, Acta Physiol. Scand., 29: 241—250, 1953.
- 20) Johansson, B.: Circulatory response to stimulation of somatic afferents: Chap. III, Blood pressure response to stimulation of somatic afferents, Acta Physiol. Scand., 50 (suppl. 198): 26—39, 1962.
- 21) Koizumi, K., Sato, A., Kaufman, A., McC Brooks, C.: Studies of sympathetic nervous discharge modified by central and peripheral excitation, Brain Res., 11: 212—224, 1968.
- 22) Barman, S. M., McC Caffrey, T. V., Wurster, R.D.: Cardiovascular and electrophysiological response to sympathetic pathway stimulation, Am. J. Physiol., 230: 1095—1100, 1976.

著者への通信先: 伊藤史子, 〒920 金沢市宝町 13-1 金沢大学医学部公衆衛生学教室 Reprint requests to Department of Public Health, Kanazawa University School of Medicine, 13-1, Takaramachi, Kanazawa, 920 Japan (F. Ito)