

Study on Viscoelasticity of Skin-Muscle System in Workers Using Vibratory Tools

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	http://hdl.handle.net/2297/8441

振動工具作業における皮膚筋系の粘弾性に関する研究

金沢大学医学部公衆衛生学講座 (主任: 岡田 晃教授)

友 田 照 男

(平成5年3月3日受付)

振動工具使用者における指の皮膚筋系硬度の増加を定量的および客観的に評価し、さらに皮膚筋系の粘弾性の変化と振動工具起因性白指症 (vibration-induced white finger, VWF) あるいは末梢神経障害症の関係を明らかにするため、109人のチェンソー作業者の第2-4指の末節指頭部における皮膚筋系の弾性指標および粘性指標を測定した。50人の事務系職従事者とチェンソー作業者の間での粘弾性指標の比較では、チェンソー作業者の第2-4指の弾性指標の減少がみいだされ、またチェンソー総使用時間と弾性指標の間には第4指で負の相関が認められた。VWFを有する作業者の第3, 4指の弾性指標は、VWFを有さない作業者のそれに比べ、低いことが認められた。粘弾性指標とともにチェンソー総使用時間や指血流量あるいは指皮膚温などの他の作業者の特性を説明変数とした多重ロジスティック分析によっても弾性指標の減少および指血流量の減少が独立してVWFの有症に寄与することが確認された。さらにその多重ロジスティック分析の結果は振動工具使用者の末梢循環障害が皮膚筋系の弾性指標を考慮して診断される必要があることも示唆した。一方、チェンソー作業者の皮膚筋系における粘性指標の低下が手指の痛みの症状に対して有意に寄与する因子であることが単変量および多変量解析の結果よりみいだされた。以上の結果から、振動工具使用期間に比例し、指の皮膚筋系における弾性要素が減少し、その減少および同時に認められる硬度の増加がVWFの一因として無視できないと考えられた。また振動起因性の末梢神経障害症は、振動暴露によってもたらされる筋萎縮を介して生じる皮膚筋系の粘性要素の低下に関与することも示唆された。

Key words elasticity, hardness, vibration, viscosity, white finger

振動工具使用者の手指の皮膚や筋が硬くなることはよく知られている¹⁾が、その硬さや弾力などを定量的、客観的な方法によって評価した研究はこれまでない²⁾。また硬さの増加あるいは弾力性の減少が振動工具使用者の症状で最も問題となる振動起因性白指 (vibration-induced white finger, VWF) の一因であることがかって Stewart らによって提唱されたこともある³⁾が、このことを支持する証拠は得られていない。したがって振動工具使用者の皮膚筋系硬度を定量的、客観的な測定装置によって評価し、さらに硬度とVWF発現について関連を検討することは極めて意義深いと思われる。そのような測定装置の開発に最近、本田が成功し、その適用範囲を含めた緻密な研究を展開している⁴⁾が、本田の方法によれば皮膚筋系の硬度を規定する2つの要素である弾性および粘性を求めることにより硬度が決定できるとされている。しかも弾性および粘性のいずれも皮膚筋系の重要な特性を表す要素であり、硬度を規定する以外の意義をも認められている³⁾⁻⁵⁾ことを考えれば、振動工具使用者のVWFをはじめとする症状および諸特性との関連で、粘弾性の指標を評価することは大変、興味深いと考えられる。

ところで、振動工具使用者が局所振動暴露によってもたらされる手指の症状は、VWFの症状に代表される末梢循環障害によるものと手指の痛み、しびれなどの末梢神経障害に基づくものである⁶⁾⁻⁸⁾。皮膚筋系の硬度とVWFとの関連が指摘されている¹⁾以外、振動工具使用者の末梢神経障害が皮膚表面の感覚器の障害による場合が多いことを示す最近の知見⁹⁾⁻¹²⁾からして

も、皮膚筋系の弾性および粘性と末梢神経障害の関連をも明らかにする必要がある。そこで本研究は、チェンソー作業者と振動暴露の経験のない事務系職従事者の粘弾性の指標をまず比較し、さらに作業者の症状の有無による皮膚筋系の粘弾性の違いを明らかにすることを試みた。また粘弾性と作業者の指血流量、指皮膚温などの末梢循環動態や振動覚閾値などの末梢神経障害の指標との関連を調べることにより、振動工具使用者における粘弾性の変化が末梢循環および末梢神経障害に果たす役割を検討した。

対象および方法

1. 対象

本研究の対象は、109人のチェンソー作業者と50人の振動暴露経験のない事務系職従事者である。そのチェンソー作業者は、北陸地方における振動工具使用者に対する検診を受診した534人のうち、チェンソー使用期間が合計10年以上、かつ総使用時間が5000時間を越える男性132人から、利き手の第2-4指に外傷を有した人15人および循環器、内分泌あるいは代謝性疾患の既往を有した8人を除外した者である。チェンソー作業者の対照に選ばれた事務系職従事者は、手指になら症状を有さない50歳から69歳の男性を選んだが、チェンソー作業および事務系職の年齢はそれぞれ 56.30 ± 1.04 , 56.70 ± 0.79 (平均±標準偏差) で両群間には有意な差は認められなかった。なお、チェンソー使用期間に関する調査では、振動検診時に施行され

る振動暴露に関する詳細な経歴調査により、チェーンソーの使用年数に加え、これと1日平均使用時間と1年間の平均使用日数の積から計算されるチェーンソー総使用時間を求めた。

II. 方法

チェーンソー作業には、両手指の症状を、特に白指、しびれ、痛み、冷えについて詳細に聞き取り調査した。その後、被検者は坐位の姿勢で、利き腕の前面を上にして机の上に置き、各筋を十分に弛緩させた後、皮膚筋の弾性および粘性の測定を開始した。測定対象部位は第2-4指の指頭部の3部位とした。また指血流量、指皮膚温、爪圧迫試験による爪血流の回復時間、振動覚閾値および指周囲長を利き手の第3指で測定した。身長および体重から求められる肥満度を Broca 指数 (体重×100)/{(身長-100)×0.9} を用いて算出した。すべての測定は室温23±1℃の条件で施行された。

1. 皮膚筋系の粘弾性の測定

皮膚筋系硬度測定装置は、本田³⁾の開発したトランスデューサーに、ひずみ圧力用アンプ AP-621G (NIHON KODEN, 東京), 微分演算ユニット EQ-601G (NIHON KODEN), X-Y レコーダー RJG-4124 (NIHON KODEN) を組み合わせたシステムから成り立ち、その測定方法および原理の概略については次の如くである。

皮膚筋系の力学的挙動に対し、バネとダッシュポットが直列に配置される Maxwell の流体モデルを適用し、変位 (X) と荷重 (F) と時間 (t) に関して次の方程式を得る。

$$\frac{dx}{dt} = (6R \cdot M^2 \cdot F)^{-1/3} \cdot \frac{dF}{dt} + \frac{F}{V}$$

ここで、M [N/mm²]=E/(1-P²) (E はヤング率、P はポアソン比) であり、これが弾性係数であり、V は粘性係数 [Ns/mm]、また R はトランスデューサーの押圧子の半径である。Maxwell モデルを基にしたこの方程式により、次の重要な皮膚筋系の特性が導かれる³⁾。すなわち、1/M が増加するにつれて、あるいは 1/V が減少するにつれて、対象が完全弾性体に近づき、逆に、1/M の減少と 1/V の増加により Newton 粘性流動体に近似されてくる。この関係は、1/M が弾性体の要素、1/V が粘性要素であることを意味している。したがって、本研究では弾性要素の指標として 1/M を、粘性要素の指標として 1/V を用いて表した。また、一般に硬度とは外力による変形に対する抵抗の度合を示すものと定義されることから、弾性指標 (1/M) または粘性指標 (1/V) の減少はともに硬度の増加を意味する。また一定の速度で荷重を与えれば、硬度に対しては、小さい荷重のもとでは弾性指標 (1/M) が、大きい荷重では粘性指標 (1/V) の役割が大きい。

2. 指血流量および指皮膚温の測定

指血流量は熱拡散法に基づき、吸入式水素ガスクリアランス法で絶対値較正を行った体表循環モニターシステム¹²⁾¹³⁾を用いて測定した。その血流量計のプロープは両面接着盤を用いて第3指の中節背部に取り付けた。指皮膚温はサーミスター D111 (宝工業, 東京) を用いて測定し、そのセンサーは指血流量計のプロープ近くに取り付けた。

3. 爪圧迫試験

第3指において10秒間の爪圧迫後の爪血流の回復時間を測定した。

4. 振動覚閾値の測定

振動覚閾値は振動覚計 AU-02 (リオン, 東京) により、125 Hz の振動数を用いて測定した。その測定は第3指の指頭部で行った。

III. 統計処理

相関関係は Pearson の相関係数を用い、また2群間の平均値の差の検定には分散が等しいときには Student の t 検定、等しくないときには、Welch の t 検定を用いた。また、多変量解析には多重ロジスティック分析を用いて解析した。すべての検定は両側検定で行い、有意水準を0.05未満を有意、0.10未満を傾向ありとみなした。

成 績

チェーンソー作業の第2-4指の弾性指標 (1/M) と粘性指標 (1/V) を事務職従事者のそれと比較した (図1)。チェーンソー作業の第2-4指の弾性指標 (1/M) は事務職従事者のそれに比べ、有意に低いことが認められたが、いずれの指においても粘性指標 (1/V) には有意な差はなかった。

表1には、チェーンソー作業のチェーンソー総使用時間と、第2-4指の弾性指標 (1/M) および粘性指標 (1/V) の間の相関関係を示した。第2-4指の弾性指標 (1/M) と総使用時間の間には負の関係が認められ、特に第4指での相関は有意であることが、また第3指での関係はその傾向があることが示された。第3指における粘性指標 (1/V) と総使用時間の間には正の相関を有する傾向があることが観察された。

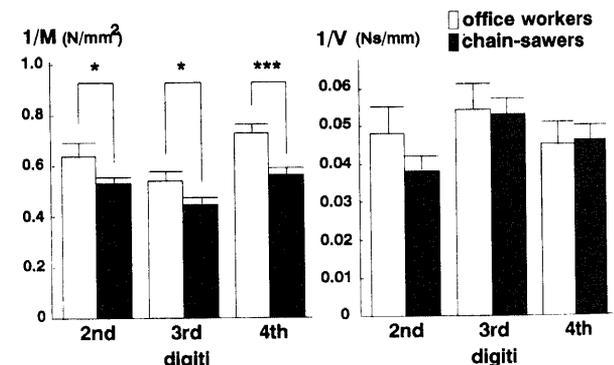


Fig. 1. Comparisons of the indices of elasticity (1/M¹⁾ and viscosity (1/V²⁾ in the 2nd, 3rd, and 4th digits between office workers and chain-sawers. Each value represents the mean (standard error). 1) M [N/mm²]=E/(1-P²) (E: Young's modulus, P: Poisson's ratio), 2) V: modulus of viscosity [Ns/mm]. Student t- or Welch t-test was used in testing the difference of mean. Significant difference from the value of office workers: *p<0.05, ***p<0.001.

Table 1. Correlation of the indices of elasticity (1/M¹⁾ and viscosity (1/V²⁾ in the 2nd, 3rd and 4th digits to total exposure time to vibration at use of chain-saws (TET [1000 hr])

	2nd	3rd	4th
1/M	-0.16	-0.17 ⁺	-0.23 [*]
1/V	0.067	0.16 ⁺	0.14

For correlation, Pearson's correlation coefficient was used. ⁺p<0.10, *p<0.05, 1) M [N/mm²]=E/(1-P²) (E: Young's modulus, P: Poisson's ratio), 2) V: modulus of viscosity [Ns/mm].

VWF, 手指のしびれ, 痛み, 冷えの各症状を有する作業者の皮膚筋系の粘弾性などの特性を評価するために, まず年齢, チェンソー総使用時間を症状の有無にしたがって比較した(表2). 年齢については症状の有無に有意な差はなかったが, VWFを有する作業者の総使用時間は有さない作業者に比し, 有意に大きいことが観察された. 図2および図3には各症状の有無にしたがって第2-4指の弾性指標(1/M)と粘性指標(1/V)を比較した結果を示した. VWFを有する作業者の第3, 4指の弾性指標(1/M)は, VWFを有さない作業者のそれに比

べ, 有意に低いことが認められた(図2). 図表には示さないが, チェンソー総使用時間を共変量とした共分散分析により, 弾性指標(1/M)を両群間で比較した場合にも総使用時間とは独立した有意差が認められた(第3, 4指ともに $p < 0.05$). また手指の痛みを有する作業者の第2指の粘性指標(1/V)は有さない作業者のそれに比し, 有意に低いことがみいだされた. 手指にしびれおよび冷えを有する作業者の第2指の粘性指標(1/V)は有さない作業者よりも低い傾向を示した(図3).

表3には, 第3指の弾性指標(1/M)と粘性指標(1/V)と年

Table 2. Age and total exposure time to vibration at use of chain-saws (TET [1000 hr]) according to the symptom of hands in chain-sawers

symptom		number	age	TET
VWF	(-)	78	56.7 (0.747)	13.4 (0.868)
	(+)	31	56.6 (0.703)	17.5 (1.63)*
numbness	(-)	76	57.2 (0.691)	13.9 (0.939)
	(+)	33	55.6 (0.985)	16.1 (1.45)
pain	(-)	80	56.9 (0.655)	14.1 (0.870)
	(+)	29	56.2 (1.16)	16.1 (1.76)
chill	(-)	77	56.7 (0.638)	14.1 (0.950)
	(+)	32	56.8 (1.20)	15.7 (1.42)

Each value represents the mean (standard error). Student t- or Welch t-test was used in testing the difference of mean. Significant difference from the value without the symptom. * $p < 0.05$.

Table 3. Correlation of the indices of elasticity (1/M³) and viscosity (1/V²) in the 3rd digitus to other properties in chain-sawers

	1/M	1/V
age	-0.049	-0.033
total exposure time ³ [1000 hr]	-0.173 ⁺	0.163 ⁺
digital blood flow [ml/100g/min]	0.198*	0.095
digital skin temperature [°C]	0.052	-0.066
nail press test ⁴	0.049	-0.091
vibratory sense threshold ⁵	0.000	-0.158
digital circumference [mm]	-0.164 ⁺	0.276**
obesity index ⁶	-0.051	0.018

For correlation, Pearson's correlation coefficient was used. ⁺ $p < 0.10$, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$. 1) M [N/mm²] = E/(1-P²)(E: Young's modulus, P: Poisson's ratio), 2) V: modulus of viscosity [Ns/mm], 3) total exposure hours at use of chain-saw, 4) recovery time [sec] of the nail blood flow after 10 sec finger nail press test, 5) vibratory sense threshold [dB] at the frequency of 125 Hz, 6) Broca's index.

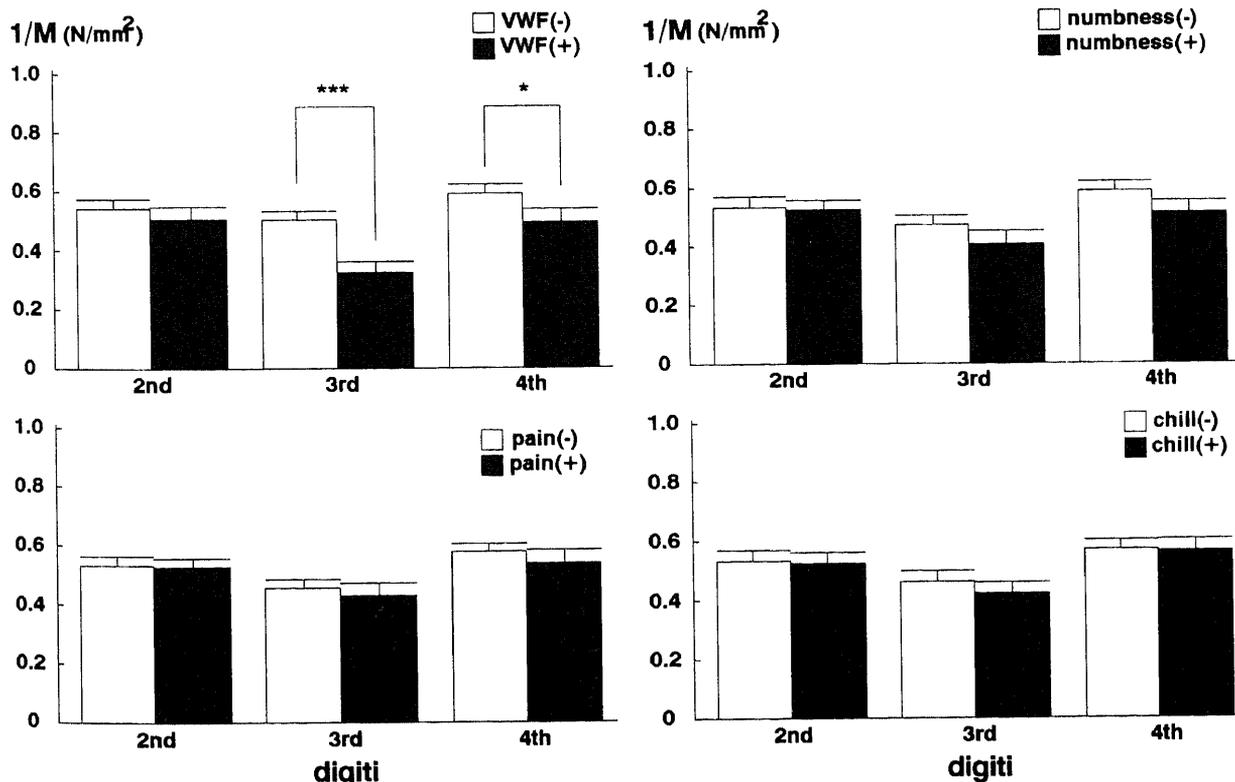


Fig. 2. The index of elasticity (1/M³) according to the symptom of hands in chain-sawers. Each value represents the mean (standard error). Student t- or Welch t-test was used in testing the difference of mean. Significant difference from the value without the symptom: * $p < 0.05$, 1) M [N/mm²] = E/(1-P²) (E: Young's modulus, P: Poisson's ratio).

齢, チェンソー総使用時間, 指血流量, 指皮膚温, 爪圧迫試験における爪血流の回復時間, 振動覚閾値, 指頭部における周囲長および Broca 指数との相関関係を示した. 指血流量と弾性指標 (1/M) および指周囲長と粘性指標 (1/V) の間には有意な正の相関関係が認められた. またチェンソー総使用時間と粘性指標 (1/V) の間には正の関係を有する傾向がみられた. チェンソー総使用時間と弾性指標 (1/M) の間および指周囲長と弾性指標 (1/M) にも正の関係を有する傾向が認められた.

表4はVWFの有無にしたがって第3指における指血流量, 指皮膚温, 爪圧迫試験における爪血流の回復時間, 振動覚閾値, 指頭部における周囲長および Broca 指数を比較した結果である. VWFを有する作業者の指血流量, 指皮膚温はVWFを示さない作業者のそれと比較して有意に低い値を示した. またVWFを有する作業者の振動覚閾値は, VWFを有さない作業

者のそれより有意に大きいことが観察された. VWFの症状の有無に対して弾性指標 (1/M) と粘性指標 (1/V) を含めた第3指における諸特性および Broca 指数を説明変数とした多重ロジスティック分析を施行したとき (表5), VWF有りに対して有意な寄与を認めた変数は弾性指標 (1/M), 指血流量, 振動覚閾値であり, 弾性指標 (1/M) が低いこと, 指血流量の低いこと, 振動覚閾値が大きいことがVWFを有することと有意な関連が認められた. 指皮膚温の低いこともVWF有りに対して寄与する傾向を示した.

表6は, 手指の痛みの症状の有無にしたがって第2指の特性および Broca 指数を比較した結果であるが, 両群間に有意な差を呈する項目はみられなかった. VWFの有無と同様に, 痛みの有無について多重ロジスティック分析を施したとき (表7), 弾性指標 (1/M) および粘性指標 (1/V) の低いこと, 振動覚閾値

Table 4. Comparisons of other main properties in chain-sawers with and without VWF

	VWF(-)	VWF(+)
digital blood flow [ml/100g/min]	63.8 (1.44)	49.6 (1.88)***
digital skin temperature [°C]	33.9 (0.368)	31.4 (1.17)**
nail press test ¹⁾	1.91 (0.150)	2.01 (0.128)
vibratory sense threshold ²⁾	2.60 (0.739)	7.25 (1.15)**
digital circumference [mm]	63.3 (0.625)	63.5 (0.710)
obesity index ³⁾	106 (1.54)	107 (1.93)

Statistical significance ; **p<0.01, ***p<0.001. 1) recovery time [sec] of the nail blood flow after 10 sec finger nail press test, 2) vibratory sense threshold [dB] at the frequency of 125 Hz, 3) Broca's index.

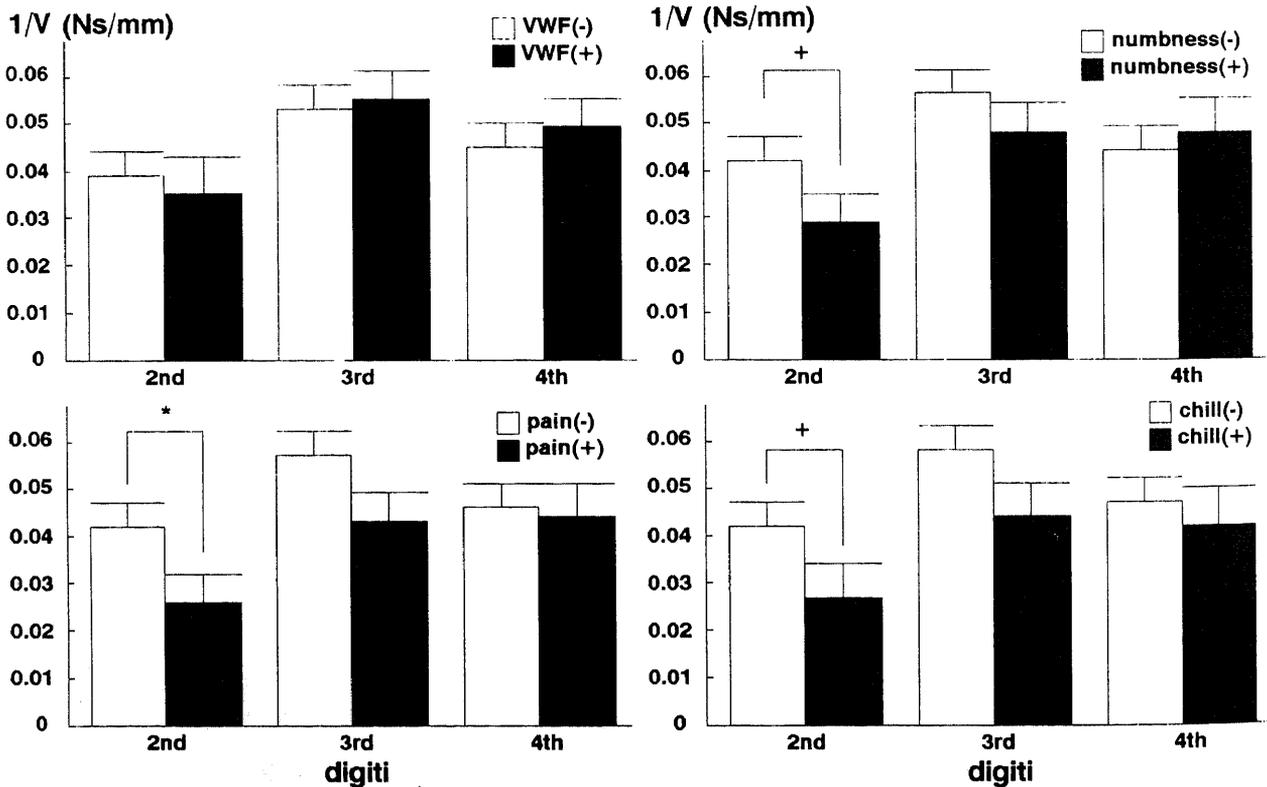


Fig. 3. The index of viscosity (1/V¹⁾) according to the symptom of hands in chain-sawers. Each value represents the mean (standard error). Student t- or Welch t-test was used in testing the difference of mean. Significant difference from the value without the symptom: *p<0.10, *p<0.05, 1) V: modulus of viscosity [Ns/mm].

が大きいことが痛みを有する方向へ有意な関連を認めた。

本研究では手指に痛みを認めた29人のうち、約半数の15人がVWFを示した。したがって痛みを有するがVWFを認めなかった14人と、手指にVWF、しびれ、痛み、冷えのいかなる症

状を示さなかった54人について粘性指標(1/V)を比較した(図4)。両群間に年齢、チェーンソー総使用時間には有意な差はなかったが、痛みを有する14人の第2および第3指の粘性指標(1/V)はいかなる症状を示さない54人に対し、有意に低い値を

Table 5. Results on multiple logistic regression analysis regarding VWF with the indices of elasticity (1/M¹⁾ and viscosity (1/V²⁾ of the 3rd digitus, and other main properties in chain-sawers

variables	coefficient (standard error)	F value
1/M	-4.52 (1.84)	6.04*
1/V	-10.7 (10.03)	1.07
age	-0.0872 (0.0561)	2.42
total exposure time ³⁾ [1000 hr]	0.0595 (0.0409)	2.11
digital blood flow [ml/100g/min]	-0.121 (0.0362)	11.2**
digital skin temperature [°C]	-0.163 (0.0876)	3.44 ⁺
nail press test ⁴⁾	-0.322 (0.0396)	0.664
vibratory sense threshold ⁵⁾	0.112 (0.0535)	4.35*
digital circumference [mm]	-0.0052 (0.0624)	0.007
obesity index ⁶⁾	0.0036 (0.0232)	0.024
constant	16.84 (6.64)	6.43*

Statistical significance; ⁺p<0.10, *p<0.05, **p<0.01. 1) M [N/mm²]=E/(1-P²)(E: Young's modulus, P: Poisson's ratio), 2) V: modulus of viscosity [Ns/mm], 3) total exposure hours at use of chain-saw, 4) recovery time [sec] of the nail blood flow after 10 sec finger nail press test, 5) vibratory sense threshold [dB] at the frequency of 125 Hz, 6) Broca's index.

Table 6. Comparisons of other main properties in chain-sawers with and without pain in hands

	pain(-)	pain(+)
digital blood flow [ml/100g/min]	56.4 (1.50)	52.0 (2.34)
digital skin temperature [°C]	32.6 (0.357)	32.4 (0.665)
nail press test ¹⁾	1.77 (0.072)	1.79 (0.100)
vibratory sense threshold ²⁾	2.75 (0.737)	5.43 (1.58)
digital circumference [mm]	58.7 (0.566)	57.5 (0.956)
obesity index ³⁾	105 (1.40)	108 (2.52)

1) recovery time [sec] of the nail blood flow after 10 sec finger nail press test, 2) vibratory sense threshold [dB] at the frequency of 125 Hz, 3) Broca's index.

Table 7. Results on multiple logistic regression analysis regarding pain in hands with the indices of elasticity (1/M¹⁾ and viscosity (1/V²⁾ of the 2nd digitus, and other main properties in chain-sawers

variables	coefficient (standard error)	F value
1/M	-2.73 (1.34)	3.75*
1/V	-23.4 (1.03)	5.19*
age	-0.0487 (0.0455)	1.15
total exposure time ³⁾ [1000 hr]	0.0322 (0.0310)	1.08
digital blood flow [ml/100g/min]	-0.0209 (0.0205)	1.03
digital skin temperature [°C]	-0.102 (0.0946)	1.17
nail press test ⁴⁾	-0.375 (0.480)	0.608
vibratory sense threshold ⁵⁾	0.0700 (0.0338)	3.81*
digital circumference [mm]	-0.0188 (0.0194)	0.935
obesity index ⁶⁾	0.0777 (0.0572)	1.85
constant	10.8 (4.20)	3.72*

Statistical significance; ⁺p<0.05. 1) M [N/mm²]=E/(1-P²)(E: Young's modulus, P: Poisson's ratio), 2) V: modulus of viscosity [Ns/mm], 3) total exposure hours at use of chain-saw, 4) recovery time [sec] of the nail blood flow after 10 sec finger nail press test, 5) vibratory sense threshold [dB] at the frequency of 125 Hz, 6) Broca's index.

示した。

考 察

従来の皮膚筋系の硬度についての研究の多く^{14)~16)}は、弾性要素を中心に硬度を評価してきた。ところが本田の基礎的研究⁹⁾では、第2-4指の粘性指標(1/V)は手腕系の他の部位の中で最も大きい値を呈することが示されている。このように特に第2-4指においては弾性指標(1/M)だけでなく粘性指標(1/V)を同時に評価することによって皮膚筋系の硬度についての重要な知見を得ることができると考えられる。一方、加齢は皮膚筋系の硬度を増加させることが指摘されており^{19)~21)}、さらには弾性要素だけでなく粘性要素の点からも加齢の皮膚筋系への正の影響が認められている⁹⁾。それゆえ本研究では事務系職従事者とチェーンソー作業者の間の比較や、症状の有無にしたがって分けた2群の比較には、特に年齢が等しいことを確かめて弾性指標(1/M)および粘性指標(1/V)を比較した。

事務系職従事者とチェーンソー作業者の間の比較では、チェーンソー作業者の第2-4指の弾性指標(1/M)が減少し、他方、粘性指標(1/V)には有意な差が認められなかった。この結果を、弾性指標(1/M)と粘性指標(1/V)の減少がともに硬度の増加をもたらすという事実⁹⁾に照らし合わせれば、チェーンソー作業者の第2-4指の皮膚筋系の硬度は事務系職従事者に比べ、大きいことが示される。さらに本研究では、第4指においてチェーンソー総使用時間は弾性指標(1/M)との間に負の相関関係を認めたが、粘性指標(1/V)との間には有意な相関関係は示さなかった。この弾性指標との関係からチェーンソー作業は指の皮膚筋系の硬度の増加をもたらすことが定量的、客観的方法によって明らかとされた。長期にわたる振動暴露と把持がチェーンソー作業者の指に胼胝の発生をもたらすとされている¹⁾が、この胼胝がチェーンソーの作業者の指における皮膚筋系の硬度の増加に関与していると考えられる。皮膚の弾性要素を構成する成分は、真皮の膠原線維、弾性線維、網状線維および表皮の有棘細胞であり、また胼胝は、表皮の有棘細胞層の厚みの増加であることも知られている²²⁾²³⁾。したがって、この弾性要素の組織学的説明が、チェーンソーの作業者の胼胝が、弾性指標(1/M)の減少を引き起こすという推論を支持するとともに、その減少がチェ

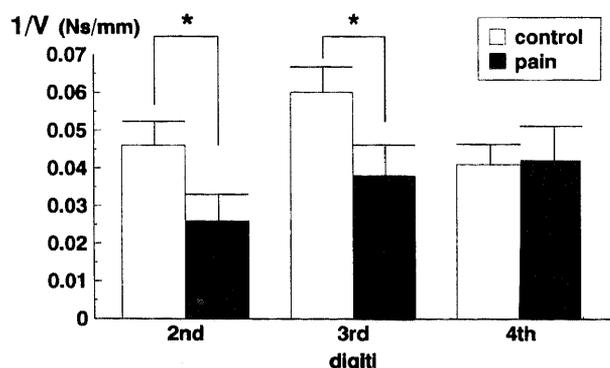


Fig. 4. Comparison of the index of viscosity (1/V¹⁾) between the chain-sawyers with pain, but without VWF (14 cases) and that without any symptoms in hands (54 cases). Each value represents the mean (standard error). Significant difference: *p<0.05. 1) V: modulus of viscosity [Ns/mm].

ンソー作業において有棘細胞以外の他の線維細胞の変性を生じていることも推測される。Stewart ら¹⁾はその胼胝を振動暴露自体の直接的影響と考えているが、振動暴露と把持のどちらが多く弾性要素の減少に影響を与えているかは、手作業によって把持や運搬を主とする作業者の皮膚筋系の粘弾性を本研究と同様な方法により調べることによって明らかにされると考えられる。

ところでVWFの発生機序については振動暴露を中心として多くの因子が関与することが知られているが、その詳細な成因については論議が多い⁸⁾²⁴⁾²⁵⁾。VWFを発生させる基盤は、振動暴露を中心とした機械的作用による末梢循環動態の障害であることはよく知られており、その基盤をもとに、振動や寒冷、把持、騒音などの血管収縮因子を誘引にVWF発生が生じるとされている²⁶⁾。ところが、その基盤である末梢循環障害がいかなる生理的機序によって生じるかは不明な点が多い。長期振動暴露によって、血管内膜肥厚が生じること²⁷⁾や、血管がノルアドレナリンなどの血管作動性物質に対する過剰反応を獲得すること²⁸⁾²⁹⁾、あるいは血管が血管自体の硬度の増加のため、寒冷や把持などの血管収縮因子に対する反応性の減弱を生じること¹³⁾などといった血管自体の障害によるとされているが、血管に作用する末梢神経系の異常^{30)~34)}や血液粘度の増加³⁵⁾³⁶⁾あるいは種々の液性因子の関与^{37)~39)}も指摘されている。このようなVWFの様々な成因に加え、振動工具使用者の胼胝や皮膚の硬度の増加もVWFの一因であることが指摘されたこともある¹⁾。このことを定量的、客観的方法によって証明することを本研究の目的の一つとしたが、その結果、VWFを有する作業者の第3, 4指の弾性指標(1/M)は、VWFを有さない作業者のそれに比べ、有意に低いことが認められ、また粘性指標(1/V)には両群間には有意差は観察されなかった。したがって、VWFを有する作業者の指の皮膚筋系硬度の増加が確認されたが、VWFを有する作業者のチェーンソー総使用時間は有さない作業者に比し、有意に大きいことが認められたため、その弾性指標(1/M)の減少が総使用時間の違いに基づくものかどうかを検証しなければならなかった。チェーンソー総使用時間を共変量とした共分散分析および多重ロジスティック分析からその弾性指標(1/M)の減少はチェーンソー総使用時間を含めた他の因子とは独立してVWFの発生に寄与していることが示された。このように本研究は皮膚筋系の硬さの増加あるいは弾力性の減少がVWFの一因であるとするStewart ら¹⁾による仮説を支持するものであった。皮膚筋系の弾性要素の減少がVWF発生の一因となることについては、皮膚組織の硬化が組織のコンプライアンスの低下を引き起こし、同時に血管そのものの弾性が喪失することによると説明される。VWF患者におけるこの血管弾性の喪失はNakamura ら¹³⁾によっても指摘されており、このことがVWFの末梢循環障害の基盤である血管の反応性の減弱を引き起こすと考えられる。

チェーンソー作業者の第3指における皮膚筋系の弾性指標(1/M)と指血流量の間の正の相関関係が観察されたが、同時にVWFを有する作業者の指血流量および指皮膚温の減少も、他の多くの研究者の報告^{40)~43)}と同様、本研究においても認められた。これらの減少がVWFを呈する作業者に末梢循環障害が生じていることを示す所見であることから、チェーンソー作業者の末梢循環障害に皮膚筋系の弾性要素の減少が関与することが裏付けられたといえる。興味深いことには、末梢循環動態の障害を

示すパラメータである指血流量と指皮膚温がVWFの有症への関与についての多変量解析の結果は、単変量解析のそれほど大きくないと決定された。すなわち指血流量と指皮膚温の多重ロジスティック分析での有意水準は、単変量解析のそれに比べ大きくなるのが本研究では認められた。このことは弾性指標(1/M)が正常域を呈する作業者が指血流量や指皮膚温が低い時には、その指標が低いとき以上にチェンソー作業者に末梢循環障害を有している可能性が高いことを意味する。この点で、皮膚筋系硬度、特に弾性要素を測定することによって、末梢循環障害をスクリーニングすることが有効であることが本研究によってみいだされた。

振動起因性の末梢神経障害には、圧迫や絞扼による尺骨神経や正中神経障害による場合以外にも、皮膚表面の感覚器の障害による場合も多いことが近年では明らかにされている^{9)~11)}。手指に痛みを有する作業者の第2指の粘性指標(1/V)は有さない作業者のそれに比し、有意に低いことが認められた。この痛みと粘性指標(1/V)との関係は多重ロジスティック分析によって、他の項目と独立して成り立つことが示された。振動工具使用者のこの手指の痛みは末梢神経障害を主に表すとされるが、末梢循環障害によっても生じることがあり、VWFを呈する作業者は同時に手指の痛みを認めることも自覚症状の解析によって報告されている^{44)~46)}。本研究においても痛みとVWFをともに有する作業者が多くみられるため、痛みを有するがVWFを認めなかった作業者と、指にいかなる症状も示さなかった者について粘性指標(1/V)を比較する必要がある。この場合においても、痛みを有する作業者の第2および第3指の粘性指標(1/V)はいかなる症状を示さない者に対し、有意に低い値を示した。したがって、痛みを有するチェンソー作業者に粘性指標(1/V)の低下がみられることは、振動起因性の末梢神経障害と皮膚筋系の粘性要素の低下とが関連することを示すと考えられた。粘性要素については、Yoshitoshiら¹²⁾は線維間をみたすムコ多糖体や体液などが中心的役割を果たしているとし、浮腫をきたしたときに粘性要素の役割が増大することから、体液が組織間、あるいは組織と毛細管をいききする際の流れやすさが粘性要素と密接な関わりがあると報告されている⁴⁸⁾。ところが、本田³⁾は浮腫が生じていない健康人では、粘性指標(1/V)はその測定領域の筋量に左右されると推定している。振動工具使用によって圧迫や絞扼を原因とした末梢神経障害が生じた場合、その神経に支配される筋線維の萎縮が生じること⁴⁹⁾⁵⁰⁾を考えれば、本研究の結果については末梢神経障害の存在が筋萎縮を介して、粘性指標(1/V)の低下につながったと解釈したほうが妥当と思われる。チェンソー作業全体において粘性指標(1/V)と指周囲長との間に正の相関が観察されたことも振動起因性末梢神経障害を呈する作業者に筋組織の量的減少が生じていることを示唆しているが、その萎縮を含めた筋の問題と粘性要素の関係は、今後、さらに組織学的、病理学的に解明されなければならない。同時にこのようなアプローチは、振動工具使用と関連した皮膚筋系の粘性要素の低下が、振動起因性の末梢神経障害の原因となっているかどうかをも明らかにするものと考えられる。

結 論

振動工具使用者における指の皮膚筋系の弾性要素および粘性要素の大きさを定量的および客観的に評価し、さらにそれらと

VWFあるいは末梢神経障害との関連を明らかにするために、粘弾性の指標と同時に作業者の指血流量、指皮膚温などの末梢循環動態や振動覚閾値を調べた。その結果は以下の如くである。

1. 事務系職従事者とチェンソー作業者の間での比較では、チェンソー作業者の第2-4指の弾性指標(1/M)は減少を示し、またチェンソー総使用時間と弾性指標(1/M)の間には第4指で負の相関が認められた。粘性指標(1/V)には両群間には有意な差が認められず、また総使用時間との間にも有意な相関関係はなかった。これらのことから、チェンソー作業が指の皮膚筋系硬度の増加をもたらすことが示唆された。

2. VWFを有する作業者の第3, 4指の弾性指標(1/M)は、VWFを有さない作業者のそれに比べ、有意に低いことが認められたが、粘性指標(1/V)については両群間には有意差は観察されなかった。チェンソー総使用時間や指血流量あるいは指皮膚温などの他の作業者の特性を説明変数とした多重ロジスティック分析によってもその弾性指標(1/M)の減少が独立してVWFの有症に寄与することが確認された。これらの結果から、皮膚筋系の弾性力の減少および硬度の増加がVWFの一因であると考えられた。また多重ロジスティック分析の結果は弾性指標(1/M)が正常域を呈する作業者が指血流量や指皮膚温が低い時には、その指標が低いとき以上にチェンソー作業者に末梢循環障害を有している可能性が高いことを示したことは、皮膚筋系硬度、特に弾性要素を測定することは、末梢循環障害をスクリーニングするのに有効であることを支持するものである。

3. 痛みを有する作業者の第2指の粘性指標(1/V)は有さない作業者のそれに比し、有意に低いことが認められた。痛みの有無についても多重ロジスティック分析を施したとき、粘性指標(1/V)の低いことは痛みの症状に対して有意に寄与する因子であることがみいだされた。さらに痛みを有するがVWFを認めなかった作業者と指にいかなる症状も示さなかった者の粘性指標(1/V)を比較したとき、痛みを有する者の第2および第3指の粘性指標(1/V)はいかなる症状も有しない者に対し、有意に低い値を示した。このことは振動起因性の末梢神経障害は筋萎縮を介して皮膚筋系の粘性指標の低下に関与することを示唆する。

謝 辞

稿を終えるに臨み、終始御懇篤な御指導と御校閲を賜りました恩師岡田見教授に深甚の謝意を表します。また、本研究に際し御助力、御教示下さいました元東京大学宇宙研究所、中村円生博士に深く感謝の意を表します。さらに直接の御指導を賜りました金沢大学医学部助教授中村裕之博士に衷心より感謝の意を捧げ、併せて本研究に御協力いただきました福井県予防医学協会関係各位に深く感謝いたします。

本研究の要旨の一部は第60回日本衛生学会(1990年4月、福岡)にて発表した。

文 献

- 1) Stewart, A. M. & Goda, D. F.: Vibration syndrome. *Br. J. Ind. Med.*, 27, 19-27 (1970).
- 2) Olsen, N.: *Vibration-Induced White Finger-Physical & Clinical Aspects*, 1st ed., pl-26, Legforeningens Forlag, Copenhagen, 1988.
- 3) 本田 貞: 皮膚筋系静的硬度測定装置の開発ならびに

用に関する基礎的研究. 日衛誌, 45, 860-872 (1990).

- 4) **Ridge, M. D. & Write, V.:** The rheology of skin. A bioengineering study of the mechanical properties of human skin in relation to its structure. *Br. J. Dermatol.*, 77, 639-649 (1965).
- 5) **Ridge, M. D. & Write, V.:** The directional effects of skin. A bio-engineering study of skin with particular reference to Langer's Lines. *J. Invest. Dermatol.*, 46, 341-346 (1966).
- 6) **Ashe, W. F. & Williams, N.:** Occupational Raynaud II. *Arch Environ. Health*, 9, 425-433 (1964).
- 7) **Taylor, W., Pearson, J., Kell, R. L. & Keighley, G. D.:** Vibration syndrome in Forestry Commission chain saw operators. *Br. J. Ind. Med.*, 28, 83-89 (1971).
- 8) **Okada, A.:** Pathogenic mechanism of vibration-induced white finger (VWF) -Recent findings and speculations. *In* A. Okada, W. Taylor & H. Dupuis (eds.), *Hand-Arm Vibration*, 1st ed., p1-8, Kyoei Press Co., Ltd., Kanazawa, 1990.
- 9) **Brammer, A. J., Piercy, J. E., Auger, P. L. & Nohara, S.:** Tactile perception in hands occupationally exposed to vibration. *J. Hand Surg.*, 12A, 870-875 (1987).
- 10) **Brammer, A. J., Piercy, J. E., Nohara, S., Nakamura, H., Auger, P. L., Haines, A. T., Lawrence, M., Brubaker, R. & Van Netten, C.:** Vibrotactile thresholds in operators of vibrating hand-held power tools. *In* A. Okada, W. Taylor & H. Dupuis (eds.), *Hand-Arm Vibration*, 1st ed., p221-223, Kyoei Press Co., Ltd., Kanazawa, 1990.
- 11) **Pyykkö, I., Brammer, A. J., Starck, J. & Färkkilä, M.:** Vibration-induced neuropathy. *In* A. Okada, W. Taylor & H. Dupuis (eds.), *Hand-Arm Vibration*, 1st ed., p93-96, Kyoei Press Co., Ltd., Kanazawa, 1990.
- 12) **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, Kyoei Co. Ltd, Kanazawa, 1987.
- 13) **Nakamura, H., Nakamura, H., Nohara, S. & Okada, A.:** Assessment of peripheral circulatory function in workers exposed to hand-arm vibration using non-invasive monitoring system for skin blood flow. *In* A. Okada, W. Taylor & H. Dupuis (eds.), *Hand-Arm Vibration*, 1st ed., p195-199, Kyoei Press Co., Ltd., Kanazawa, 1990.
- 14) **Schade, H.:** Gewebselastometrie zu klinischem und allgemeinärztlichem Gebrauch. *Munch. Med. Wochenschr.*, 73, 2241-2246 (1926).
- 15) **Simonson, E., Snowden, A., Keys, A. & Brozek, J.:** Measurement of elastic properties of skeletal muscle in situ. *J. Appl. Physiol.*, 1, 512-525 (1949).
- 16) **Bruestone, R., Grahame, R., Holloway, V. & Holt, P. J. L.:** Treatment of systemic sclerosis with D-penicillamine. *Ann. Rheum. Dis.*, 29, 153-158 (1970).
- 17) **Bunch, T. W. & Tervo, E. A.:** Assessment of scleroderma skin involvement. *Arthritis Rheum.*, 18, 629 (1975).
- 18) **Fernandez-Herlihy, L.:** Skin elasticity and colchicine in scleroderma. *Arthritis Rheum.*, 19, 832 (1976).
- 19) **Dick, J. C.:** The tension and resistance to stretching of human skin and other membranes, with results from a series of normal and oedematous cases. *J. Physiol.*, 112, 102-113 (1951).
- 20) **Grahame, R. & Holt, P. J. L.:** The influence of aging on the in vivo elasticity of human skin. *Gerontologia*, 15, 121-139 (1969).
- 21) **Kirk, E. & Kvorning, S. A.:** Quantitative measurements of elastic properties of skin and subcutaneous tissue in young and old individuals. *J. Gerontol.*, 4, 273-284 (1949).
- 22) **Evans, R., Cowdry, E. V. & Nielson, B. E.:** Ageing of human skin. *Anat. Rec.*, 86, 545-565 (1943).
- 23) **Gibson, T. & Kenedi, R. M.:** The dermis. *In* A. Montagna (ed.), *Advances in Biology of Skin*, 1st ed., p19-38, Appleton, New York, 1970.
- 24) **Dupuis, H. & Gemne, G.:** Hand-arm vibration and the central nervous system. Report from an international symposium. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 55, 185-189 (1985).
- 25) **Bovenzi, M.:** Some pathophysiological aspects of vibration-induced white finger. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 55, 381-389 (1986).
- 26) **Gemne, G.:** Pathophysiology and multifactorial etiology of acquired vasospastic disease (Raynaud syndrome) in vibration-exposed workers. *Scand. J. Work Environ. Health*, 8, 243-249 (1982).
- 27) **Okada, A., Inaba, R. & Furuno, T.:** Occurrence of intimal thickening of the peripheral arteries in response to local vibration. *Br. J. Ind. Med.*, 44, 470-475 (1987).
- 28) **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).
- 29) **Azuma, T., Ohhashi, T. & Sakaguchi, M.:** An approach to the pathogenesis of "white finger" induced by vibratory stimulation: acute but sustained changes in vascular responsiveness of canine hind limb to noradrenaline. *Cardiovasc. Res.*, 14, 725-730 (1980).
- 30) **Futatsuka, M., Pyykkö, I., Färkkilä, M., Korhonen, O. & Starck, J. P.:** Blood pressure, flow, and peripheral resistance of digital arteries in vibration syndrome. *Br. J. Ind. Med.*, 40, 431-441 (1983).
- 31) **Pyykkö, Färkkilä, M., Korhonen, O., Starck, J. & Jantti, V.:** Cold provocation tests in the evaluation of vibration-induced white finger. *Scand. J. Work Environ. Health*, 12, 254-258 (1986).
- 32) **Gemne, G. & Pyykkö, I.:** Finger blood flow and pressure in chain-sawyers with a past history of vibration-induced Raynaud's phenomenon. *In* P. Donati, T. Fairley & B. Martin (eds.), *Effects des vibrations sur l'homme*, 1st ed., p77-82, INRS, Vandoeuvre-Nancy, 1988.

- 33) Olsen, N., Nielsen, S. L. & Voss, P.: Cold response of digital arteries in chain saw operators. *Br. J. Ind. Med.*, **38**, 82-88 (1981).
- 34) Olsen, N., Fjeldborg, P. & Brochner-Mortensen, J.: Sympathetic and local vasoconstrictor response to cold in vibration induced white finger. *Br. J. Ind. Med.*, **42**, 272-275 (1985).
- 35) Okada, A., Ariizumi, M. & Fujinaga, H.: Diagnosis of the vibration syndrome by blood viscosity. *In* A. J. Brammer & W. Taylor (eds.), *Vibration Effects on the Hand and Arm in Industry*, 1st., p67-70, John Wiley & Sons, New York, 1983.
- 36) Okada, A., Inada, R., Furuno, T., Nohara, S. & Ariizumi, M.: Usefulness of blood parameters, especially viscosity, for the diagnosis and elucidation of pathogenic mechanisms of the hand-arm vibration syndrome. *Scand. J. Work Environ. Health*, **13**, 358-362 (1987).
- 37) Bovenzi, M.: Vibration white finger, digital blood flow, and some biochemical findings on workers operating vibrating tools in the engine manufacturing industry. *Am. J. Ind. Med.*, **14**, 575-584 (1988).
- 38) Knutsson, A.: Immunoglobulins in workers with traumatic vasospastic disease. *J. Occup. Med.*, **17**, 706-707 (1975).
- 39) Lafferty, K., De Trafford, J. C., Roberts, V. C. & Cotton, L. T.: On the nature of the role of histamine. *Lancet*, **2**, 313-315 (1983).
- 40) Arneklo-Nobin, B., Jahansen, K. & Sjoberg, T.: The objective diagnosis of vibration-induced vascular injury. *Scand. J. Work Environ. Health*, **13**, 337-342 (1987).
- 41) Bovenzi, M.: Finger thermometry in the assessment of subjects with vibration-induced white finger. *Scand. J. Work Environ. Health*, **13**, 348-351 (1987).
- 42) Pelmeur, P. L., Roos, J., Leong, D. & Wong, L.: Cold provocation test results from a 1985 survey of hard-rock miners in Ontario. *Scand. J. Work Environ. Health*, **13**, 343-347 (1987).
- 43) Dupuis, H.: Thermographic assessment of skin temperature during a cold provocation test. *Scand. J. Work Environ. Health*, **13**, 352-355 (1987).
- 44) Futatsuka, M., Yasutake, N., Sakurai, T. & Matsumoto, T.: Comparative study of vibration disease among operators of vibrating tools by factor analysis. *Br. J. Ind. Med.*, **42**, 260-266 (1985).
- 45) Färkkilä, M.: Vibration-induced injury. *Br. J. Ind. Med.*, **43**, 361-362 (1986).
- 46) Nagase, H., Nakamura, H., Nakamura, H., Nohara, S., Miura, K., Ohnishi, T., Kuriyama, M. & Okada, A.: Epidemiologic studies on determination of risk factors for subjective symptoms in chain sawers. *Hand-Arm Vibration* (in print)
- 47) Yoshitoshi, Y. & Nagasaki, M.: Viscoelastic properties of edematous skin. *Jpn. Heart J.*, **3**, 220-230 (1962).
- 48) 渡辺 登: 浮腫の物理的性状に関する研究 スクレロメトリー法. *日内誌*, **41**, 714-723 (1953).
- 49) Hunter, D., McLaughlin, A. I. G. & Perry, K. M. A.: Clinical effects of the use of pneumatic tools. *Br. J. Ind. Med.*, **2**, 10-16 (1945).
- 50) Marshall, J., Poole, E. W. & Reynard, W. A.: Raynaud's phenomenon due to vibratory tools. Neurological observations. *Lancet*, **1**, 1151-1156 (1954).

Study on Viscoelasticity of Skin-Muscle System in Workers Using Vibratory Tools Teruo Tomoda, Department of Public Health, School of Medicine, Kanazawa University, Kanazawa 920—J. Jusen Med Soc., **102**, 305—314 (1993)

Key words elasticity, hardness, vibration, viscosity, white finger

Abstract

To assess the increase in the hardness of the skin-muscle system quantitatively and objectively, and to clarify the involvement of the elasticity and the viscosity of skin-muscle system in fingers in workers using vibratory tools in vibration-induced white finger (VWF) and peripheral neuropathy, the author determined the indices of elasticity (1/M) and viscosity (1/V) in the distal phalanxes of the 2nd-the 4th digits of 109 chain-saw operators. A significant decrease in the 1/M of chain-saw operators was recognized as compared with 50 office workers who served as the control sample. A converse relationship between the 1/M in the 4th digit and the total exposure hours to chain-saw use was observed. The 1/M of chain-saw operators with VWF was lower than that without VWF. The multiple logistic regression analysis with the 1/M, the 1/V and other main properties including digital blood flow and skin temperature in its explanatory variables showed the contribution of both the 1/M and digital blood flow to the prevalence of VWF independent of the other variables. The analysis also suggested that peripheral circulatory disturbances in users of vibratory tools should be diagnosed with reference to the index of the elasticity of skin-muscle systems. The mono and multivariate analyses showed that the decrease in the 1/V was related to pain in the hands. These results show that the elasticity of skin-muscle system is decreased in proportion to the use of vibratory tools, suggesting that the decrease in the elasticity, accompanied by the increase in the hardness of skin-muscle system, may lead to the occurrence of VWF. In contrast, the results on the viscosity of the skin-muscle system suggest that the decrease in the viscosity may be caused by the vibration-induced peripheral neuropathy via muscle atrophy generated by that neuropathy.