

振動エネルギーの吸収にもとづいた手腕振動ばく露の評価 —加振方向および前腕・肘姿勢の影響の検討—

柴田 延幸*1

一日当たり（8時間相当）の等価振動ばく露量にもとづいた手腕振動ばく露の健康影響評価方法が我が国の手腕振動ばく露作業の作業管理の手段として導入されたこととともない、同評価方法の根拠となっている等感度曲線にもとづいた周波数補正曲線の問題点である、(1) 多軸加振時の方向依存性および(2) 前腕・肘姿勢の影響を考慮・改善するために、振動エネルギーの吸収(VPA)にもとづいた手腕振動ばく露の人体影響係数の提案およびこれにもとづいた多軸手腕振動ばく露の評価方法の提案と検討を行った。その結果、振動エネルギーの吸収にもとづいて得られた手腕振動ばく露に対する人体影響係数は加振方向依存性を示すこと、前腕姿勢の変化は人体影響係数に大きな影響を及ぼさない一方で肘姿勢は人体影響係数に大きく影響を及ぼすこと、肘屈曲姿勢をとることにより肘伸展時よりも人体影響係数が高い値を呈することが明らかになった。さらに、得られた人体影響係数を用いて、小型かつ軽量でさまざまな腕姿勢での使用が想定される5種類の手持ち振動工具を選び、これらの工具の実測振動波形に対するVPAにもとづいた補正加速度実効値を算出し、ISOによる従来の補正加速度実効値と比較した。その結果、ISOによる手腕振動ばく露の評価方法は、とりわけ肘屈曲姿勢時の振動ばく露量の過少評価およびそれにもとづく振動ばく露限界時間の過大評価の可能性があることが示された。

キーワード: 手腕振動, ばく露, 力学応答, 前腕・肘姿勢, 補正曲線, 影響係数

1 はじめに

局所的な振動を長期間にわたって手腕にばく露することにより、手腕振動障害を発症することが知られており、手持ち振動工具（例えば、削岩機やインパクトレンチ、チェーンソー等）を使用する作業者は同障害発症の危険性が高いとされる。手腕振動障害は手腕振動ばく露を主因とし、寒冷時に発作的に現れるレイノー現象を主徴とする末梢循環障害、手指のしびれや感覚鈍麻などの末梢神経障害、肘関節より遠位の関節における可動域制限や手指握力の低下などの骨格系障害を特徴とする障害の総称¹⁾であり、根本的な治療法がないことから、適切な予防対策をとることが極めて重要である。

わが国における振動障害防止対策としては、かつて振動の強さやばく露量に関係なく手腕振動ばく露作業時間を一日当たり二時間以下とする等の措置が講じられてきたが、近年、欧州諸国で導入されている振動ばく露量にもとづいた健康影響等の評価方法²⁾にならぬ、一日（8時間相当）当たりの等価振動ばく露量にもとづいて手腕振動ばく露作業従事者の健康および作業管理をする方法を導入した^{3,4)}。

しかしながら、等価振動ばく露量の考え方は、ばく露振動に対する周波数補正加速度にもとづいており、この周波数補正加速度を算出する上で前提となる周波数補正曲線にはいくつかの問題点が指摘されている。例えば、現在の評価方法では、振動ばく露の方向に関係なく振動加速度の実効値が等しいならば、それによって人体が受ける影響も等しいものとし、作業者の作業姿勢が多様に

変化した場合でも人体の振動伝達特性は変化せず、振動加速度の補正実効値のみに依存する。しかし、手持ち振動工具を実際に使用した際に作業者が感じる疲労感は作業姿勢に依存し、時として体感的な振動伝達挙動も変化することは周知の事実である。

手腕振動障害は、振動ばく露時に手腕を介して吸収・散逸される振動エネルギーが長期にわたって過度に課される場合に、このエネルギーによる仕事によって生体組織に機械的影響がおよび、その結果としてさまざまな障害が引き起こされる。このことから、人体の振動エネルギーの吸収にもとづいて手腕振動ばく露の影響を評価することは、等感度曲線にもとづいた従来の周波数補正曲線の持つ前述の問題点を克服するために重要と考えられる。

本研究では、振動エネルギーの吸収(VPA)にもとづいた手腕振動ばく露の人体影響係数の提案およびこれにもとづいた多軸手腕振動ばく露の評価方法の提案と検討を行った。

2 方 法

1) 被験者

被験者として12名の健康な成人男性が本実験に参加した。表1に被験者の身体的特徴に関する基本データをまとめて示す。いずれの被験者も日常生活において高いレベル或いは長期間にわたる手腕振動ばく露の経験はなかった。尚、本実験は独立行政法人労働安全衛生総合研究所に設置された研究倫理審査委員会の承認のもと、被験者個々に対して実験に関する十分な説明およびそれに関する質疑応答を経た後、書面によるインフォームドコンセントを得た。

2) 実験装置

*1 労働安全衛生総合研究所 人間工学・リスク管理研究グループ

連絡先: 〒214-8585 神奈川県川崎市多摩区長尾 6-21-1

労働安全衛生総合研究所 人間工学・リスク管理研究 G 柴田延幸

E-mail: shibata@h.jniosh.go.jp

表1 被験者の身体特徴データ

	身長(cm)	体重(kg)	掌の長さ(mm) ^{注1}	掌の幅(mm) ^{注2}	掌の周囲長(mm) ^{注3}
平均値	175.2	65.1	190.5	90.6	202.9
標準偏差	4.01	6.52	9.33	7.09	8.54

注1)中指の中心線に沿ってその先端から手首の折線までの長さを測定

注2)掌の中手骨の位置における幅を測定

注3)掌の中手骨の位置における周囲長さを測定

図1に本実験で使用した3軸加振型手腕振動実験装置の概観を示す。本装置は3個の加振機それぞれが前後、左右、鉛直方向の加振を担うように配置され、それぞれが連結棒を介して実験ハンドル用固定フレームに連結されている。

固定フレームには本実験で使用する実験用ハンドルが設置されており、ハンドルの長手方向の軸が左右方向に水平になるように固定されている。同実験用ハンドルは材質をアルミ合金とし、高剛性を発揮するように動特性を考慮の上設計されており、グリップ部外径は40mm、同有効長さは150mmを有する。グリップ部は半円柱状の取り付け具がねじ止めにより着脱可能となっており、同取り付け具とハンドル基部の間に2個の3成分計測用力センサを2点支持の構造で固定した。また、ハンドル中心部には振動計測用の3軸加速度センサを固定した。また、被験者がハンドルを押し込む力を測定するために、被験者の立ち位置にフォースプレートを設置した。



図1 三軸加振型手腕実験装置の概観

3) 実験方法

本実験では疑似ランダムな振動波形を使用した。この振動波形は、10 Hz から 1,000 Hz までの範囲でほぼ一定のパワースペクトル密度となるように設計されており、加速度実効値としては 18.3m/s^2 に相当する。この振動波形を前後、左右、鉛直方向それぞれから印加することにより3軸ランダム加振を実現した。したがって、最終的に実験用ハンドルに加えられる三軸振動の合成加速度実効値は 31.7m/s^2 に相当する。

被験者は、3軸加振型手腕振動実験装置の手前に設置されたフォースプレート上に、前後方向に肩幅程度に両

足を広げた状態で直立した。実験用ハンドルは右手で把持し、ハンドルを把持する際には右腕は所定の実験条件にしたがった姿勢をとるものとし、体側に腕が触れぬように腋下に若干の隙間を維持した。また、実験中被験者はハンドルを把持する力（以下、把持力）およびハンドルを押し込む力（以下、押し込み力）を目の前のモニターを通して確認しながら、所定の値の範囲内に維持するように努めるものとした。

4) 実験条件

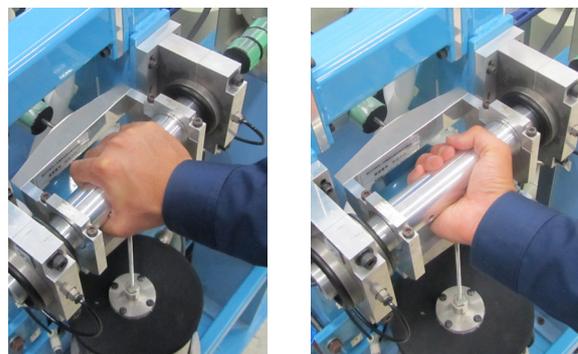
本実験で考慮した前腕・肘姿勢の条件を表2に示す。前腕はハンドル把持の際に水平になるようにし、回内および回外のいずれかの姿勢をとるようにした(図2参照)。肘姿勢は、 90° 屈曲位および伸展位のいずれかとした。

実験に際して、まず被験者は、所定の前腕・肘姿勢を維持した後、把持力 30 N（許容範囲 ± 5 N）、押し込み力 50 N（許容範囲 ± 8 N）を保つように努めた。ハンドルに対して被験者が加える2つの荷重条件の安定が確認された後、所定の加振を開始し、被験者は40秒間所定の姿勢条件で上述の荷重条件を維持した。

尚、個々の測定は加振開始直後および終了直前のそれぞれ5秒間を除いた30秒間とした。被験者ごとに各々の実験条件に対して3回の測定を行い、それぞれ平均値を算出した。

表2 実験における前腕・肘姿勢の条件一覧

条件	肘の姿勢	前腕姿勢
BP	90° 屈曲	回内
BS	90° 屈曲	回外
SP	伸展	回内



(a)前腕回内姿勢

(b)前腕回外姿勢

図2 前腕姿勢

5) 振動エネルギーにもとづいた人体影響係数の算出

各加振軸方向における単位時間当たりの振動エネルギーの吸収 $P(\omega)$ は、駆動点である掌における動的力 $F(\omega)$ と同じく駆動点における振動速度 $V(\omega)$ の積として次式で表される。

$$P(\omega) = F(\omega) \cdot V(\omega) \quad (1)$$

また、手腕系に振動が伝達される場合の駆動点における機械インピーダンス $DPMI(\omega)$ は、駆動点である掌における動的力 $F(\omega)$ に対する同地点の振動速度 $V(\omega)$ の比として定義される。

$$DPMI(\omega) = F(\omega) / V(\omega) \quad (2)$$

振動加速度 $A(\omega)$ は時間領域では振動速度 $V(\omega)$ を時間微分することによって得られることを考慮すると、式(1)(2)より、

$$P(\omega) = \text{Re}[DPMI(\omega)] \cdot \left| \frac{A(\omega)}{\omega} \right|^2 \quad (3)$$

と表すことができる。

現行の手腕振動ばく露における周波数補正係数は周波数領域における振動加速度 $A(\omega)$ の比例係数として定義されており、そのアナロジーの観点から式(3)を考察すると式(4)の関係が成り立つことがわかる⁵⁾。

$$\sqrt{P(\omega)} = \frac{\sqrt{DPMI(\omega)}}{\omega} A(\omega) \propto A(\omega) \quad (4)$$

したがって、振動エネルギーの吸収にもとづいた人体への影響係数 W_{VPA} は次式に示すような周波数の関数として得ることができる。

$$W_{VPA}(\omega) = 0.958 \cdot \frac{\omega_{ref}}{\omega} \cdot \sqrt{\frac{\text{Re}[DPMI(\omega)]}{\text{Re}[DPMI(\omega_{ref})]}} \quad (5)$$

本実験では、加振方向は上下(x), 左右(y), 前後(z)の三方向であることから、それぞれの方向について人体への影響係数 W_{VPA} が周波数の関数として得られることになる。

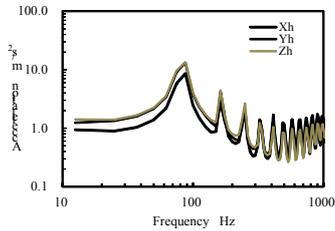
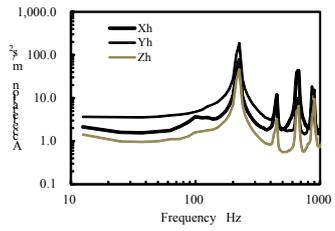
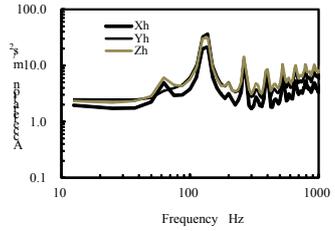
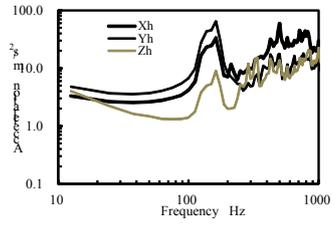
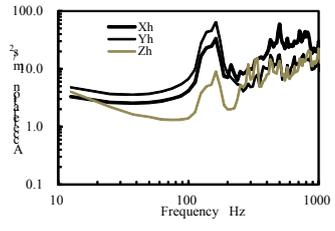
ただし、式(5)における係数 0.958 は国際規格 ISO5349-1 に定める周波数補正係数の最大値（周波数：12.5Hz）⁶⁾ であり、 ω_{ref} は標準化する上で参照する機械インピーダンスの周波数を表し、本報では 12.5Hz とした。

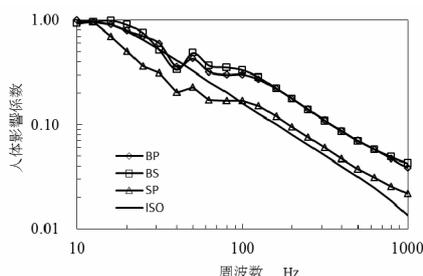
6) 振動工具の実波形による検討

本実験で前腕・肘姿勢の違いを考慮の上、手腕系の動力的応答を測定することにより得た各方向の人体影響

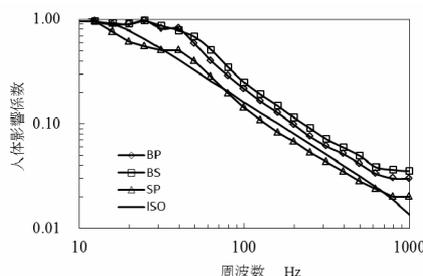
係数曲線を実際の手持ち振動工具の振動実波形に適用す

表3 人体影響曲線の適用を検討した振動工具と実振動波形のスペクトル

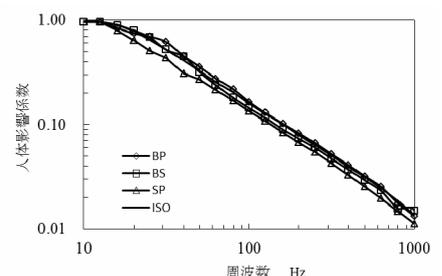
振動工具	実振動波形のスペクトル
 直動式ポリッシャー	
 ハンディカムサンダー	
 ダブルアクションサンダー	
 L型グラインダー	
 ディスクグラインダー	



(a) 上下 (x) 方向



(a) 左右 (y) 方向



(a) 前後 (z) 方向

図3 人体影響係数曲線

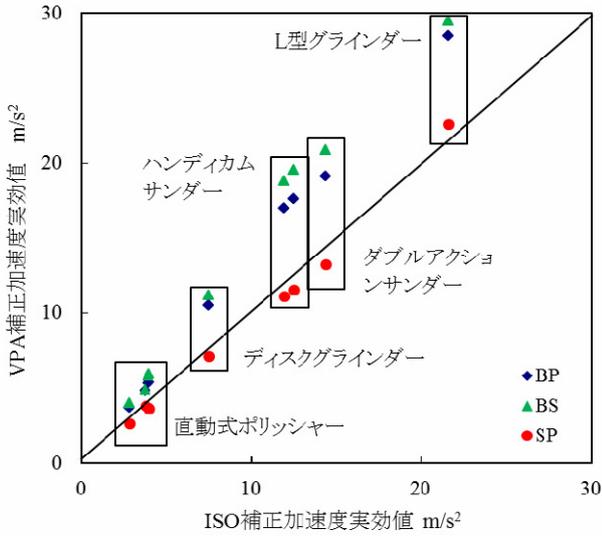


図4 補正加速度実効値の比較

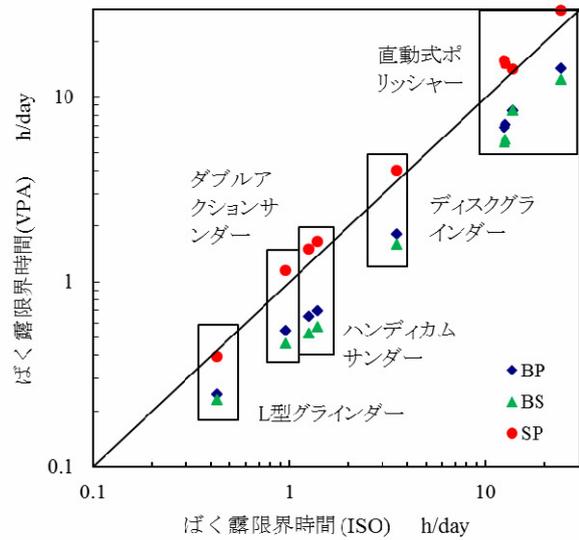


図5 ばく露限界時間の比較

ることにより、前腕・肘姿勢の違いを考慮した場合に得られる W_{VPA} にもとづいた補正加速度実効値を従来の ISO 補正加速度実効値と比較・検討した。この比較・検討に使用した手持ち振動工具は 5 種類、その具体名と実際に測定した実作業における振動波形を表 3 にまとめて示す。いずれの工具も手持ち振動工具の中では比較的小型・軽量であり、実作業では前腕・肘姿勢を変化させて使用されているものである。

3 実験結果

本実験の結果得られた上下(x), 左右(y), 前後(z)方向それぞれの振動エネルギーの吸収にもとづいた人体への影響係数曲線 W_{VPA} を従来の ISO5349-1 にもとづく周波数補正曲線と比較して図 3 に示す。

上下方向では、肘を 90° 屈曲させた場合に得られた影響係数曲線は前腕の回内および回外に依存しないことが認められた。また、肘屈曲時の影響係数曲線は 31.5 Hz 程度までは ISO に定められた周波数補正曲線と差は認められなかったが、周波数が高くなるにつれて ISO に定められた周波数補正曲線よりも大きな値を示した。これに対して、肘伸展で前腕回内姿勢をとった場合、100 Hz 未満の周波数では影響係数曲線の方が ISO に定められた周波数補正曲線よりも低い値を示したが、100 Hz 以上の周波数になるにつれて両者の大小関係に逆転現象が認められた。

左右方向では、肘を 90° 屈曲させた場合に得られた影響係数曲線は前腕を回内或いは回外させた場合も、20 Hz 以上の周波数で ISO に定められた周波数補正曲線よりも大きな値を示し、さらに 20 Hz から 63 Hz の周波数帯域で特に大きな差を示した。これに対して、肘伸展で前腕回内姿勢をとった場合、肘屈曲の場合よりも ISO に定められた周波数補正曲線に近い値を示し、個々の周波

数帯域では周波数補正曲線との間で大小関係の逆転が認められた。

前後方向では、肘を 90° 屈曲させた場合に得られた影響係数曲線は前腕の回内および回外に関係なく、63 Hz 未満の周波数帯域では ISO に定められた周波数補正曲線にほぼ一致する値を示し、63 Hz 以上の周波数帯域では ISO に定められた周波数補正曲線よりも若干大きな値を示した。これに対して、肘伸展で前腕回内姿勢をとった場合、63 Hz 未満の周波数帯域では影響係数曲線が ISO に定められた周波数補正曲線よりも小さな値を示したが、63 Hz 以上の周波数帯域では ISO に定められた周波数補正曲線にほぼ一致する値を示した。

図 3 で示した振動エネルギーの吸収にもとづく人体影響係数曲線を用いて求めた VPA 補正加速度実効値と ISO 補正加速度実効値の比較を図 4 に示す。ある工具の振動加速度の VPA 補正加速度実効値が ISO 補正加速度実効値と一致する時、図中の斜めの線上にプロットがくる。肘伸展で前腕回内の姿勢をとった時、最も大きな加速度実効値を示した L 型グラインダーを除く他の工具において、VPA 補正加速度実効値が ISO 補正加速度実効値よりも若干小さな値を示した。一方、肘屈曲姿勢をとった時、前腕姿勢に関係なく VPA 補正加速度実効値が ISO 補正加速度実効値よりもかなり大きな値を示した。

各工具ごとに求められた VPA 補正加速度実効値および ISO 補正加速度実効値をもとに、EU directive⁷⁾で定める振動ばく露限界値 5.0m/s^2 を用いて次式により一日当たりの振動ばく露限界時間 T_L を求めることができる。

$$T_L = 8.0 \cdot \left(\frac{5.0}{A_w} \right)^2 \quad (6)$$

VPA 補正加速度実効値および ISO 補正加速度実効値を式(6)中の A_w に代入することによって得られた VPA にもとづいた振動ばく露限界時間と ISO にもとづいた振動

ばく露限界時間の関係を図5に示す。肘伸展で前腕回内姿勢をとった時、VPAにもとづく振動ばく露限界時間はISOにもとづく振動ばく露限界時間よりも若干大きな値を示した。これに対して、肘屈曲姿勢をとった時、前腕姿勢に関係なくVPAにもとづく振動ばく露限界時間はISOにもとづく振動ばく露限界時間よりも小さな値を示した。

4 考 察

エネルギー法にもとづいて求められた手腕振動ばく露に関する人体影響係数曲線は、加振方向ごとに異なる傾向が見受けられ、結果として加振方向に依存することが示された。従来のISOにもとづく周波数補正曲線は等感度曲線にもとづいて構築されており、その補正係数は加振方向に依存しないとの考えであったが、本実験の結果によればエネルギー法にもとづいた手腕振動ばく露に関する人体影響係数は加振方向によって異なる。

両曲線を比較すると、とりわけ肘屈曲姿勢の場合には、より高い周波数帯域においてISO周波数補正曲線は手腕振動ばく露の影響を過小評価する傾向にある。その結果として同姿勢の時、VPAにもとづいた振動ばく露限界時間がISOにもとづく振動ばく露限界時間よりもかなり小さな値を示したが、以前に疫学研究の見地から同様の指摘がされている⁸⁻¹⁰。本結果は疫学的視点から指摘されたISO周波数補正曲線の矛盾点を改めて生体力学的な分析により裏づけたことになる。

肘屈曲時の前腕回内および回外姿勢における各加振方向の手腕振動ばく露における人体影響係数曲線の比較により、加振方向に関係なく前腕姿勢の違いによる振動ばく露への影響は小さいといえる。これに対して肘伸展姿勢をとることにより人体影響係数は各周波数において減少し、とりわけ左右・上下の加振方向における人体影響係数の減少の程度が大きかった。尚、本実験においては肘伸展かつ前腕回外の姿勢を考慮していないが、同様の姿勢を実際の作業現場でとる場合は極めて稀であると考えられる。以上のことから、肘伸展姿勢をとることにより肘屈曲姿勢時よりも振動ばく露の影響を減少する可能性があり、その傾向は左右・上下の加振方向において顕著となりやすいといえる。

5 結 論

日当たり（8時間相当）等価振動ばく露量にもとづいた手腕振動ばく露の健康影響評価方法を我が国の手腕振動ばく露作業の作業管理手法として導入するにあたり、等感度曲線にもとづいた従来の周波数補正曲線の問題点である、(1)多軸加振時の方向依存性および(2)上腕・前腕姿勢の影響を改善するためにエネルギー法にもとづいた多軸手腕振動ばく露の評価方法について提案・検討した。その結果以下の結論を得た。

・人体影響係数に加振方向依存性が認められ、したがって加振方向によって手腕振動ばく露の影響の程度が異なる可能性がある。

・左右および上下の加振方向においては、とりわけ肘屈曲姿勢をとった時、ISOによる手腕振動ばく露評価方法はこれらの方向の振動ばく露量を過小評価している可能性がある。

・肘伸展姿勢をとることにより、肘屈曲姿勢よりも手腕振動ばく露量を減少させる可能性がある。

参 考 文 献

- 1) George G, Taylor WF. Hand-arm vibration and the central autonomic nervous system. *J. low Freq. Noise.* 1983; Suppl: 1-12.
- 2) International Organization of Standards 5349-1: Mechanical vibration, measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration. Part 1: General requirements, 2001.
- 3) チェーンソー取扱い作業指針について、厚生労働省労働基準局長、平成21年7月10日、基発0710第1号。
- 4) チェーンソー以外の振動工具取扱い業務に係る振動障害予防対策指針について、厚生労働省労働基準局長、平成21年7月10日、基発0710第2号。
- 5) Mansfield NJ, Griffin MJ. Effect of magnitude of vertical whole-body vibration on absorbed power for the seated human body. *J. Sound Vib.* 1998; 215(4): 813-825.
- 6) Dong RG, Welcome DE, McDowell TW, Wu JZ, Schopper AW, Frequency weighting derived from power absorption of fingers-hand-arm system under Zh-axis vibration. *J. Biomech.*, 2006; 39: 2311-2324.
- 7) Directive 2002/44/EC of the European Parliament and of the Council of on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (vibration) (sixteenth individual Directive within the meaning of Article 16(1) of Directive 89/391/EEC), Official Journal of the European Communities, L177, 13-19, 2001.
- 8) Starck J, Jussi P. Physical characteristics of vibration in relation to vibration-induced white finger. *Am. Ind. Hyg. Assoc.*, 1990; 51, 179-184.
- 9) Bovenzi M, Franzinelli A, Mancini R, Cannava MG, Maiorano M, Ceccarelli F. Dose-response relation for vascular disorders induced by vibration in the fingers of forestry workers. *Occup. Environ. Med.*, 1995; 52: 722-730.
- 10) Bovenzi M, Franzinelli A, Mancini R, Cannava MG, Maiorano M, Ceccarelli F. Exposure-response relationship for vibration-induced white finger among forestry workers., *Cent. European J. Pub. Health*, 1996; 4: 69-72.