

ELF 電界曝露に起因するヒト血流量変化の基礎的研究 II
— 電界・振動刺激による血流量変化の可能性 —

Fundamental study for human blood flow change
associated with ELF electric field exposure II
— Possibility of blood flow change by electric field and vibration stimulation —

清水 久恵* 石河 貴之** 北間 正崇* 山下 政司* 有澤 準二*

Hisae O. Shimizu, Takayuki Ishikawa, Masataka Kitama,
Masaji Yamashita and Jyunji Arisawa

Abstract

We have found human peripheral blood flow change associated with ELF (Extremely Low Frequency, 0-300 Hz) electric field exposure. When the ELF electric field is exposed to a human body with electrodes insulated from the body, low-frequency mechanical vibration occurs around the electrode at close contact to the body. An experimental study was conducted to find whether the blood flow change was caused by this vibration or electric field itself. First, the environmental effect of an experiment was investigated. It was confirmed that the effect of electric field exposure is larger in humid atmosphere than dry one. Then, the electric field and the mechanical vibration were applied to a human body, and the blood flow was measured. In the vibration exposure, blood flow increased locally near the applied area. In the field exposure, blood flow increased at all body surface of the subject. Finally, to differentiate the cause of the blood-flow increase, the effect of mechanical vibration was eliminated using a vibration absorbing material. It was found that blood flow still changed in the electric field exposure even without mechanical vibration.

1. はじめに

近年、科学技術の発展に伴う電気・電子機器類の急激な普及により、我々が日常生活を過ごす上で電気エネルギーは必要不可欠なものとなっている。そのため、我々の生活圏内には数多くの電磁界が存在しており、これらに曝されることなく生活することは困難である。そのため、電磁界の人体に対する影響が懸念され、関心が高まっている。これまで、ELF電磁界の生体影響については、多くの研究が行われてきた⁽¹⁻³⁾。しかしその生理的作用については未知の点も多い。我々はこれまで、電界局所曝露に伴う末梢血流量変化等の現象を見出してきた⁽⁴⁻⁶⁾。一方、送電線下や電界治療器においては、全身曝露の場合が多い。ELF周波数帯域の全身曝露では、印加電極付近でハム音のような機械的低周波振動が発生し、その生体影響も無視できない⁽⁷⁾。そこで本研究では、電界全身曝露時の血流量変化に対する機械的振動の影

響の可能性について実験的検討を行った。

2. 実験環境の影響

過去の電界局所曝露の研究では、高湿度の環境で電界による血流への影響が大きくなることを見出されてきた⁽⁴⁾。しかし、全身曝露の際の環境の影響に関しては検討されていなかった。そこで、実験環境を設定するため、まず電界全身曝露時の血流に対する環境の影響について調べた。

2.1. 実験方法

実験装置の概略を Fig.1 に示す。電界曝露装置には、理学診療用高圧交流電界装置(白寿生化学研究所、ヘルストロン HES-30, 最大電圧値 30 kV)を用いた。この装置では、頭上の離れた電極板と、足裏に接触した表面絶縁電極板の間に高電圧を印加することにより、全身に交流高電界が曝露される。血流量計測には、レーザ血流計(アドバンス, ALF21N)を用い、プローブを左前腕部に装着して、体表部組織血流量

* 北海道科学大学大学院工学研究科医療工学専攻

** 日本光電工業株式会社(北海道工業大学大学院工学研究科医療工学専攻修了)

を連続的に計測した。被験者は、健康成人男性 10 名（年齢 22～24 歳）である。

実験手順を Fig.2 に示す。被験者は、まず室内条件に適応するため、実験室内で 30 分間安静を保った後、実験装置に着座させた。安静時を rest と呼び、計測過程は rest 1, exposure, rest 2, rest 3 として、各期間 15 分の合計 60 分間、連続して血流量を計測した。このうち exposure 期間に、電界を曝露した場合および電界を曝露しなかった場合を、それぞれ電界曝露、擬似曝露と呼ぶ。

実験環境は、case 1：室温 26～27 °C，相対湿度 (R.H.) 40～50% と case 2：室温 26～27 °C，R.H.80～90 % の 2 条件とし、比較検討を行った。

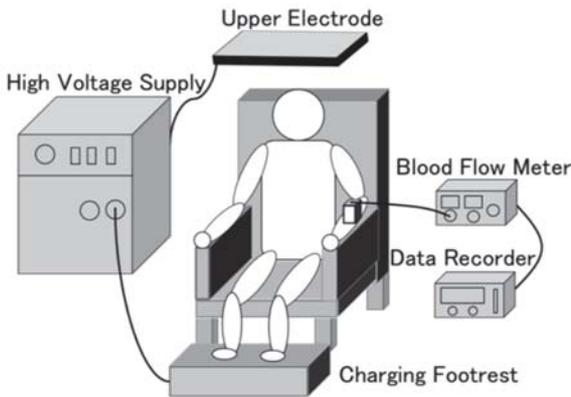


Fig.1 Experimental system for electric field exposure to whole human body.

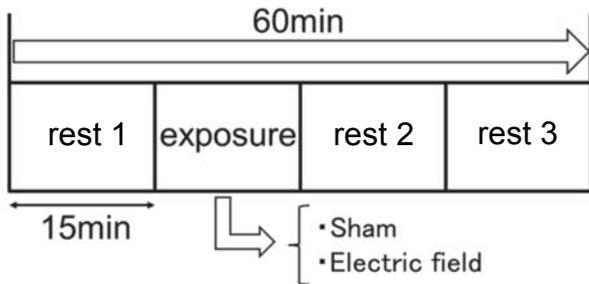


Fig.2 Measurement process.

2.2. 実験結果

実験結果を Figs.3,4 に示す。結果は、rest 1 を基準にした血流量の計測過程にわたる平均値を示し、擬似・電界曝露それぞれの場合での 2 条件の結果を比較している。

擬似曝露では、Fig.3 のように case 1, 2 とともに時間経過に伴う有意な変化は認められず、血流量は全期間を通して安定した傾向が認められた。

電界曝露では、Fig.4 のように case 1 においては、時間経過に伴う有意な変化は認められず、血流量は

全期間を通して安定していた。case 2 では、rest 1 から exposure にかけて 16 %程度の血流量増加が見られたが、全期間を通し統計的有意差は認められなかった。ただし case 1, 2 の結果を期間ごとに比較したところ、case 2 の exposure 以降の期間で、case 1 に対して血流量の有意な上昇が認められた。

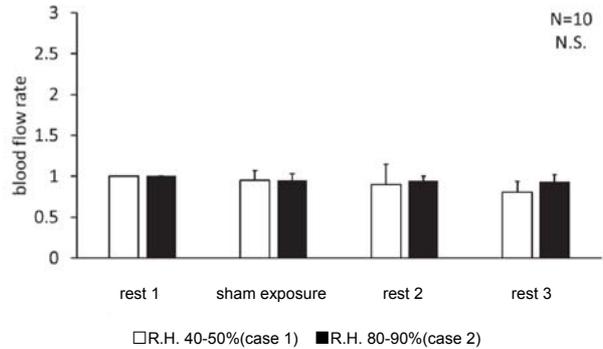


Fig.3 Blood flow change in sham exposure.

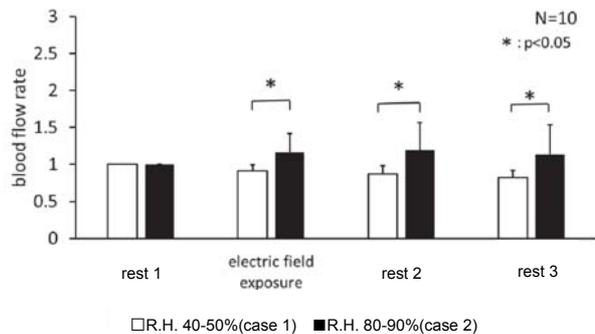


Fig.4 Blood flow change in electric field exposure.

2.3. 考察

擬似曝露の結果より、本計測の安定性が確かめられた。また、実験環境の違いは擬似曝露時の血流に影響を与えないことが確認された。電界曝露の結果から、高湿度環境で血流量変化が大きくなることが確認された。この結果は、過去の局所曝露の研究と同様の傾向である⁽⁴⁾。これは、相対湿度が上昇したことにより、体毛の誘電率が上昇し、体毛に働く電気力が増加したためと考えられる⁽⁸⁾。このように、高湿度環境で電界による影響がより明確になることから、以降の実験は室温 26～27 °C，相対湿度 80～90%の環境下で行った。

3. 電界・振動曝露による血流量変化

前述のように、高湿度環境では、電界曝露に伴い体表血流量の増加が観測される。一方、Fig.1 の装置で全身に電界を曝露した場合、足下の表面絶縁電極板と足裏の間に、基本周波数 100Hz の低周波振動が発生する。

したがって、この血流量増加の原因として、低周波振動の影響も考えられる。そこで、電界曝露と低周波振動曝露による血流変化につき、実験的検討を行った。

3.1. 実験方法

実験システム、電界曝露装置は前章と同様である。電界の影響と機械的振動の影響を個別に調べるため、電界曝露時と同様の振動感覚を与える振動装置を作製した。この装置は、モータ振動子をアクリル板に固定したもので、両足を乗せることにより、足裏に周波数 100 Hz の機械的振動が加わる。振動強度は、電界曝露時の振動感覚とほぼ同様になるように調整した。振動曝露実験の際には、この振動装置を Fig.1 の足下電極板上に設置し、種々の体表位置で血流量を計測した。被験者は健康成人男性 10 名 (22~27 歳) であり、計測過程は、前章と同様である。実験は、前章の擬似曝露・電界曝露に加え、exposure 期間に振動を曝露した場合の 3 条件で行った。種々の部位の血流量は、レーザ血流計のプロープを前腕、大腿、脛、足背部に当てて計測した。

3.2. 振動曝露の結果

電界装置の電源を切り、足下に機械的振動を加えた場合の計測結果を Figs.5-8 に示す。結果は、前章同様に各計測過程における血流量の平均値を、rest 1 を基準に示し、擬似曝露の場合と比較している。

擬似曝露では、全部位で時間経過に伴う有意な変化は認められず、血流量は全期間を通して安定した様子であった。

足下に振動を曝露した場合、前腕においては、Fig.5 のように全期間を通し統計的有意差は認められず、安定した傾向が見られた。これに対し大腿においては、Fig.6 のように曝露時に、擬似曝露やrest 3 に対して、有意な血流の増加が認められた。大腿より振動位置に近い脛においては、Fig.7 のように曝露時に 15%程度の血流増加があり、rest 2, rest 3 に対して有意な血流増加となった。さらに、曝露位置直近の足背では、Fig.8 のように 60%程度の血流増加があり、rest 1, rest 2, rest 3 すべてに対して統計的有意差が認められた。このように、足下に振動を曝露した場合、曝露部位に近いほど顕著に血流量は増加し、その後振動曝露前のレベルに復帰した。これらの結果より、振動曝露により体表血流量は増加すること、またその増加量は、曝露部位から離れるにつれ急速に減少することが見出された。また、血流量変化が生じた Figs.6-8 の結果では、血流量は、

振動停止と共にすぐに事前の血流値に復帰した。

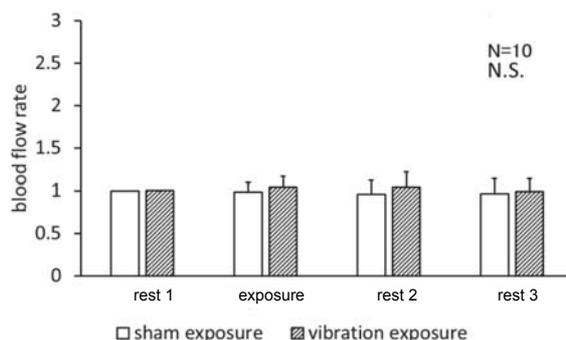


Fig.5 Blood flow change at arm in vibration exposure.

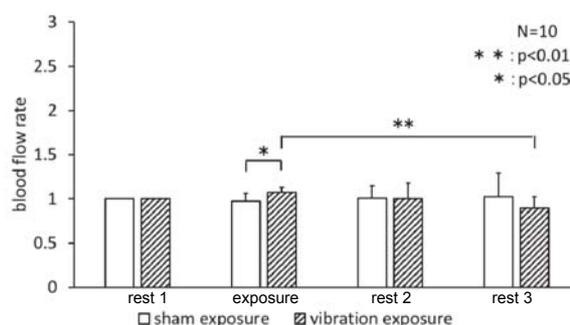


Fig. 6 Blood flow change at thigh in vibration exposure.

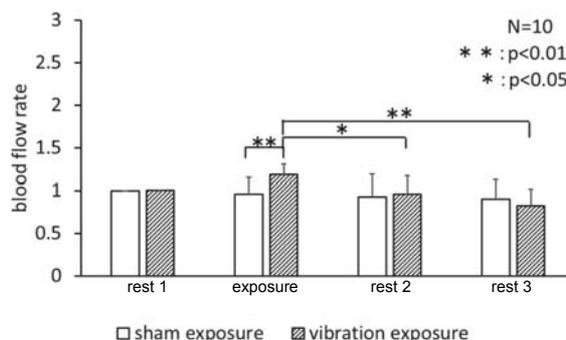


Fig. 7 Blood flow change at shin in vibration exposure.

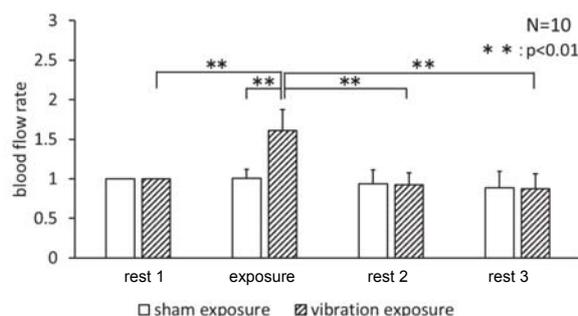


Fig. 8 Blood flow change at instep in vibration exposure.

3.3. 電界曝露の結果

Fig.1 の装置により全身に電界を曝露した場合の結果を Figs.9-12 に示す。電界曝露時に血流量は有意に増加し、曝露終了後、ゆるやかに曝露前のレベルに復帰した。曝露時の血流量増加の程度は、足背部を除き、12~17%とほぼ同程度であった。これに対し足背部では、Fig.12 のように45%程度の顕著な血流量増加が認められた。曝露停止後に血流量がゆるやかに曝露前のレベルに復帰する様子は、Figs.9-11 の場合と同様である。

これらの結果より、電界を全身に曝露した場合、血流量が一過性に増加すること、また曝露停止後の回復は、振動曝露の場合に比べ緩やかであることが確かめられた。この結果は、低周波電流刺激による血流促進の報告⁽⁹⁾とも一致するものである。

血流増加の部位については、振動感覚のある足背部を除き、Figs.9-11 のように大きな違いはなかった。足背部での結果は、電界曝露に伴う血流量増加に振動曝露に伴う血流量増加が重畳して、血流量の増加が顕著になったとも考えられる。

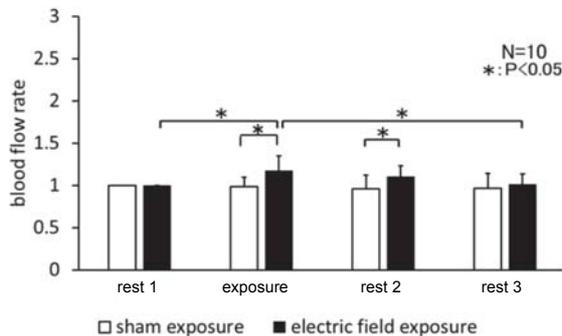


Fig.9 Blood flow change at arm in electric field exposure.

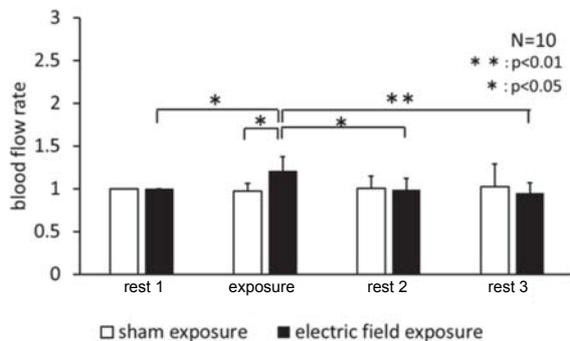


Fig.10 Blood flow change at thigh in electric field exposure.

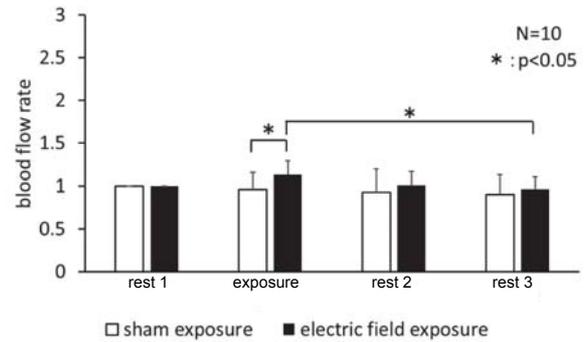


Fig.11 Blood flow change at shin in electric field exposure.

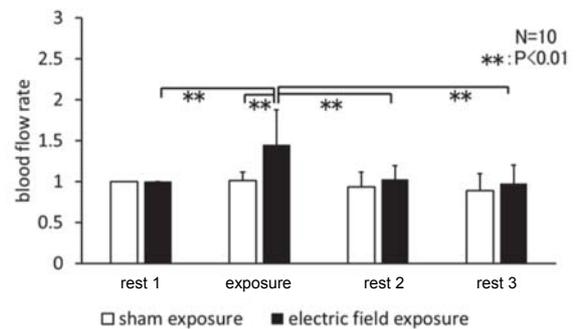


Fig.12 Blood flow change at instep in electric field exposure.

4. 電界曝露時の振動の影響評価

前章の結果より、電界曝露に伴う局所的な振動が血流増加に影響する可能性が認められた。そこで、この影響を明らかにするため、振動吸収材を用いて実験的検討を行った。

4.1. 実験方法

実験システム、電界および振動の曝露装置は前章と同様である。前述のとおり、使用した曝露装置では、表面を絶縁した電極板を足下に置き、頭上の接地電極板との間に交流高電界を発生させる。この際、足裏には変位電流が流れ、100 Hz の振動が生じる。この振動の感覚を変化させるため、足裏と足下電極板の間に厚さ 45 mm の振動吸収材（板状スポンジ）を複数枚重ねて挿入した。

実験では、振動吸収材なしで素足を表面絶縁電極板に直接接触させた場合、振動吸収材を 2 枚挿入した場合、および 4 枚挿入した場合をそれぞれ conditions 1, 2, 3 として、前腕部および足背部の血流量を計測した。被験者は、健康成人男性 7 名 (22~24 歳) である。

4.2. 実験結果

実験結果を Figs.13-18 に示す。これらは、前章同様に、rest 1 の血流量を基準にした各計測過程にわたる血流量の平均値である。振動曝露の場合には、Fig.13 のように、振動位置から離れた前腕部では、顕著な血流量の増加は見られない。これに対し、振動位置に近い足背部では、Fig.14 のように、振動吸収材の枚数に応じた有意な血流量の増加が認められた。これら振動曝露の場合の傾向は、Figs.15, 16 のように、電界の全身曝露の場合も同様であった。つまり、前腕部では顕著な変化は見られず、足背部では振動吸収材の枚数に応じた有意な血流増加が認められた。

このように、どちらの場合も機械的振動が吸収されると血流増加量が減少することから、足下の振動が足背部血流増加の直接的原因であると考えられる。ただし、振動の影響をほぼ除いた condition 3 の場合でも、電界曝露に伴う足背部の血流量増加の効果は残存しているように見える。つまり、顕著ではないが、電界曝露そのものが血流増加に直接寄与しているとも考えられる。この可能性を、次のようにして検証した。

Condition 3 の血流量増加の程度が小さい原因として、絶縁スポンジ層が厚く電気インピーダンスが大きくなり、変位電流が減少した可能性が考えられる。そこで、厚い振動吸収材でも足裏までの距離が変わらないよう、帯電防止剤を用いてスポンジを導電性とした。その場合の電界曝露時の血流量計測結果を Figs.17, 18 に示す。厚い振動吸収材により機械的振動をほぼ遮断しても、電界曝露に伴う血流量の有意な増加とその後の緩やかな減少が確認された。

このような解析をとおし、ヒト全身電界曝露時の血流量増加の機序として、次の点が明らかになった。

- (1) 電界曝露に伴い発生する振動により、振動部位近傍に局所的な血流増加が起こる。
- (2) 電界の全身曝露により全身性の血流増加が見られ、これは振動を除いても残存する。

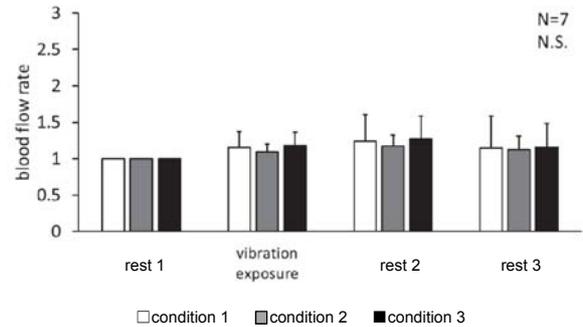


Fig.13 Blood flow change at arm in vibration exposure with insulating vibration-absorber.

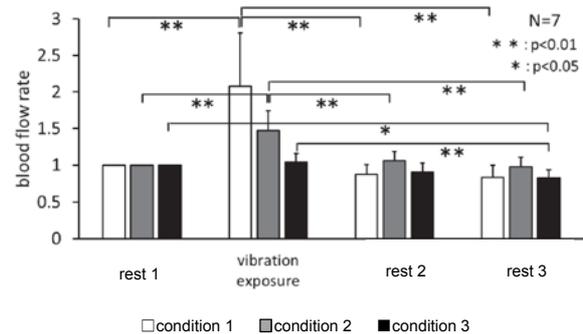


Fig.14 Blood flow change at instep in vibration exposure with insulating vibration-absorber.

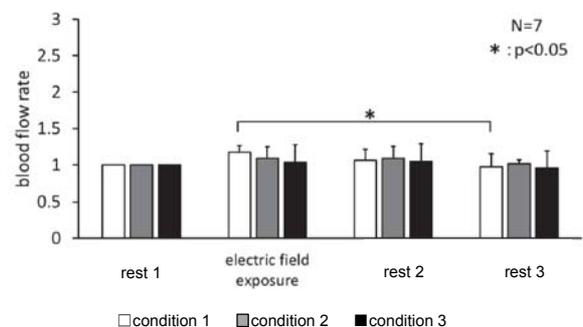


Fig.15 Blood flow change at arm in electric field exposure with insulating vibration-absorber.

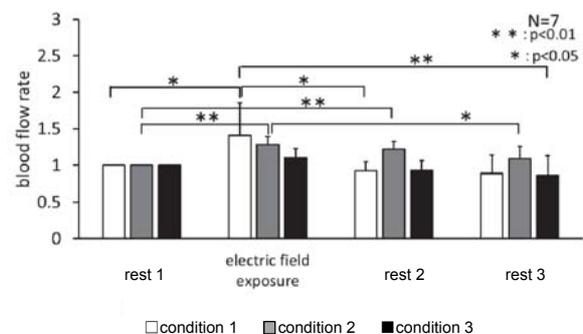


Fig.16 Blood flow change at instep in electric field exposure with insulating vibration-absorber.

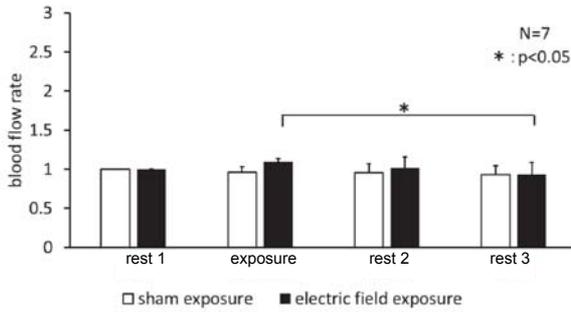


Fig.17 Blood flow change at arm in electric field exposure with conductive vibration-absorber.

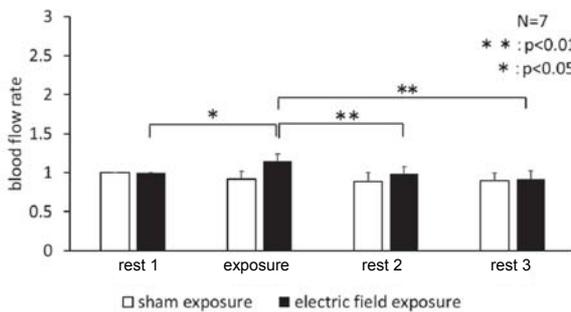


Fig.18 Blood flow change at instep in electric field exposure with insulating vibration-absorber.

5. おわりに

ELF 電界の生体作用、とくに全身曝露における血流増加の機序に関し、低周波振動との関係を明らかにすることを旨とし、実験的検討を行った。まず電界の全身曝露による血流変化に対する実験環境の影響を調べた。その結果、過去の局所曝露実験と同様に、高湿度環境で電界の影響がより大きくなることが確かめられた。次に、電界曝露に伴い発生する振動について、機械的振動を発生する装置を作製して、比較検討した。その結果、振動曝露では振動部位近傍で血流量が増加することが確かめられた。また、電界曝露では振動部位だけではなく、全身で血流量が増加することが確かめられた。最後に電界と振動の影響を区別するため、振動吸収材を用いて振動の影響を調べた。その結果、機械的振動により血流量は局所的に増加するが、その影響を除去しても、電界曝露により血流量が増加する可能性が確かめられた。本研究で得られた結果は、ELF 全身電界曝露に

伴う生理的変化の機序解明に重要な情報を提供するものと考えられる。

本研究を行うにあたり、貴重なご意見・ご指導をいただいた北海道大学清水孝一教授に感謝を申し上げます。また本研究における実験は、北海道科学大学倫理委員会の承認を得、被験者からは事前にインフォームドコンセントを得て行われた。

参考文献

- (1) 雨宮好文, “ELF 磁界とがんの疫学結果の論理的アプローチ”, 信学会論文誌, Vol.J89-B, No.6, 2006, pp985-991.
- (2) 雨宮好文, “ELF 電磁界の健康影響と防護指針”, 信学会誌, Vol.84, No.4, 2001, pp.227-232.
- (3) WHO, “電磁界と公衆衛生 極低周波電磁界へのばく露”, ファクトシート No.322, 2007.
- (4) 清水(小田切)久恵 他, “ELF 電界曝露に伴う生理的変化に関する基礎的検討-ヒト体表面における血流量変化の可能性-”, 信学技報, EMCJ99-97, 1999, pp.49-53.
- (5) 坂本将樹 他, “強電界の生体作用機序に関する基礎的検討(その 3)-諸種パラメータに対する電界感知閾値変化の可能性-”, 信学技報, EMCJ96-52, 1996, pp.29-36.
- (6) 清水(小田切)久恵 他, “ELF 電界曝露においてヒト体毛に働く電気力の解析”, 信学会論文誌, vol.J86-B, No.7, 2003, pp.1225-1233.
- (7) Massimo Bovenzi et.al, “Duration of acute exposures to vibration and finger circulation”, Scand J Work Environ Health, 24(2), 1998, pp.130-137.
- (8) H. Odagiri-Shimizu et al, “Experimental analysis of the human perception threshold of a DC electric field”, Medical & Biological Engineering & Computing, Vol.37, 1999, pp.727-732.
- (9) 江端広樹 “TENS による仙骨部皮膚血流の変化”, 日本リハビリテーション医学会誌, 26(4), 1989, pp.247-248.