

## ELF 電界の生体作用機序に関する研究 —電界をなぜ感じるのか?—

清水 久恵

北海道科学大学 保健医療学部 臨床工学科

### 1. はじめに

近年、電磁界と生体との関わり合いが問題となり、多くの研究が盛んに行われている[1]。しかし、高圧送電線下などに見られる ELF (Extremely Low Frequency, 0-300Hz) 電磁界の生体作用機序については、未だ不明の点が多い。その中で、明らかな生体作用としては、電界曝露に伴う体表刺激作用がある。我が国の安全基準[2]は、この刺激の感知限界、すなわち感知閾値を重要な要因として決定されている。

我々はこれまで、電界の生体影響の機序解明に向け、電界の感知につき理論的、実験的検討を行ってきた[3-5]。

ここではそれらのうち、電界をなぜ感じるのか、またなぜ感じ方が種々異なるのかについて検討した結果を紹介する。

### 2. 電界を感じる?

ヒトが高圧送電線下など強い電界に曝された場合、体表面に独特の感覚を生じる。その感覚を表現してもらおうと、ある人はゾクゾクッと毛がよだつような感じと言ひ、またある人は何かが体表を這うような感じあるいは体表をくすぐられる感じと言う。このように個人差や周囲の状況により感じ方は色々異なるが、共通しているのは、体表面の体毛の動きが関与していると思われることである。そこで予備的考察や予備実験を行った結果、次の可能性が考えられた。

- ①強電界中では体毛が動き、ヒトはその動きを感じている。
- ②直流電界(静電界)と交流電界では感じ方が異なる。
- ③高温高湿の夏期の方が、低温で乾燥した冬期より電界を感じやすい。
- ④電界に対しては、女性より男性の方が

敏感である。

⑤電界の存在や感じ方などに関する予備知識の有無によって、感じ方が変化する。

これらの可能性を調べ、ヒトの電界感知の機序やその特性を明らかにすることを目指し、以下のような基礎的研究を行った。

### 3. どのようにして電界を感じるのか

体表の感覚を通して電界を感じるとしたら、二種類の機序が考えられる。第一は、温覚や痛覚と同様、電界自体を感じる感覚器が体表面にあり、センサとして働いている可能性が考えられる。第二は、体毛の機械的動きにより、二次的に毛根の感覚受容器が刺激されている可能性が考えられる。

このような機序を明らかにするため、次のような実験を行った。比較的敏感で体毛状態がわかりやすい前腕部外側の部分に局所的に電界を曝露し、その感じ方を調べた。まず、体毛の存在する部分に電界を曝露し刺激感覚があることを確認した後、体毛を除毛(剃毛)して同様の電界曝露を行った。その結果、同部位、同電界強度であるにもかかわらず、後者の場合、ほとんど電界を感知できないことがわかった。

この実験により、電界感知には体毛が重要な役割を果たしていることがわかった。次に電界曝露時の体毛の動きを観測した。実験の概略を図1に示す。電界は、二枚の平行平板電極の間に高電圧を印加することにより発生させた。接地された下部電極中央には直径 30mm の円形孔があり、体表面に電界が曝露されるようになっている。この電極板をヒト前腕部外側に固定し、体毛のある部分に局

所的に電界を曝露した。電界曝露に伴う体毛の動きの概略を図 2 に示す。直流電界を 0kV/m から所定値にステップ状に変化させた場合、体毛は電界の方向(図の場合は、体表面の法線方向)に向かって、立ち上がるように一過性に動く。一方、交流電界(50Hz)を曝露した場合には、体毛は曝露電界の周波数またはその倍周波で振動する。このような実験により、曝露された電界に従って体毛が動き、毛根にある感覚受容器がその機械的動きによって刺激されることが、電界感知の主な機序であることがほぼ明らかになった。

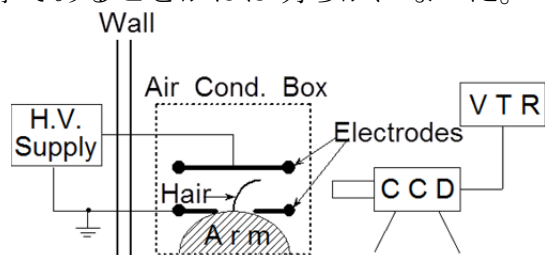


図 1 体毛の動きの測定概略図

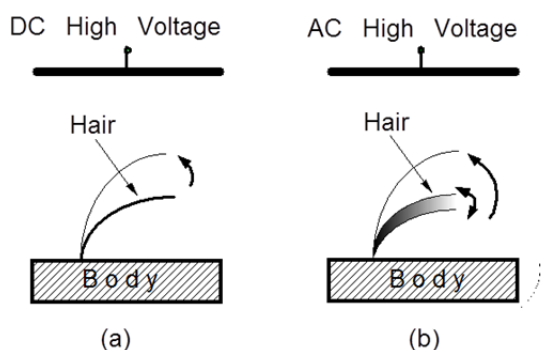


図 2 電界曝露に伴う体毛の動き  
(a) 直流 (b) 交流

#### 4. 直流より交流を感じやすい？

電界の感じやすさ、感じにくさを定量的に評価するため、電界感知閾値が用いられる。これは、電界強度を上昇させていった場合に電界を感じ始める最小の電界値、または電界強度を下降させていった場合に電界の感覚が消滅し始める最大の電界値と定義される。一般に、上昇の場合と下降の場合とで、閾値は完全には一致しない。厳密には、両者の平均をとつ

て閾値とすることが多い。

前述のように、直流電界と交流電界では体毛の動き方が異なることから、感じ方も違うと考えられる。そこで、それぞれについて感知閾値を調べた。結果を図 3 に示す。男女とも交流電界の方が、直流電界に比べ、感知閾値が明らかに低い、つまり感じやすいことがわかる。これは、体毛が一過性に動く直流電界に比べ、体毛が振動する交流電界の方が感覚量が大きくなるためと考えられる。後述のように、相対湿度が上昇して体毛が動きやすくなるとこの差は小さくなる[6]ことも、この推論を裏付けている。

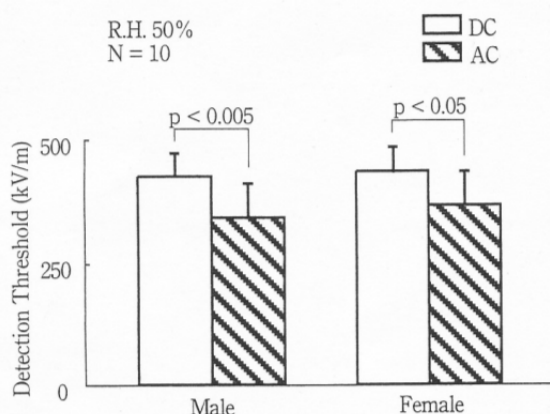


図 3 直流と交流電界(50Hz)における電界感知閾値

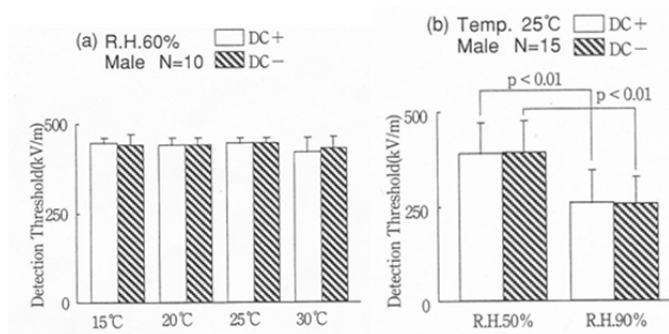


図 4 異なる温度(a)および湿度(b)における電界感知閾値

#### 5. 夏は感じやすい？

ヒトの電界感知閾値を調べていく中で、季節による閾値の変動が大きいことが見出された。季節による閾値変動の原因としては、まず気温と大気中の湿度の違いが考えられる。そこで、異なる温湿度条

件下で電界感知閾値を調べた。結果を図 4 に示す。この結果より、電界感知閾値は気温にはほとんど影響されないことがわかる。一方、低湿度(50%RH)に比べ高湿度(90%RH)では、感知閾値が 30%程低下することがわかる。つまり高湿な夏は、乾燥した冬に比べ、明らかに電界を感知しやすいことになる。

### 6. 湿度依存性の原因解析

上記のような湿度依存性の原因を調べるため、異なる湿度環境下で体毛の動きを調べた。結果の一例を図 5 に示す。これは、電界を体表に曝露した場合の体毛の動きを計測したものである。体表面に対する体毛角度の経時変化より、高湿度程体毛が早く立ち上がることがわかる。実験の湿度変動範囲では、体毛の質量は大きくは変化しない。従ってこの原因は、高湿度程体毛に働く電気力が大きいためと考えられる。この推論の妥当性を調べるため、モデル解析を行った。

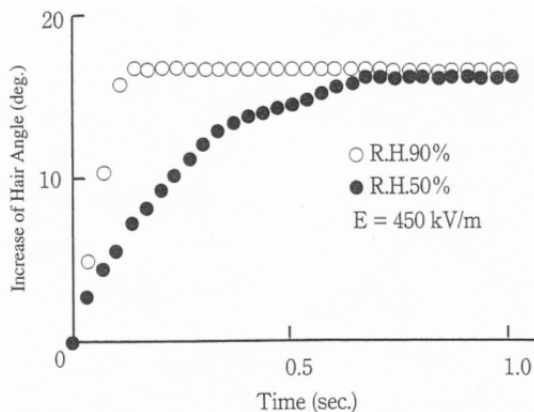


図 5 異なる湿度環境下での体毛の動き

図 6 に、解析の対象としたモデルを示す。平等電界  $E_0$  中に、体毛にあたる誘電体円柱(比誘電率  $\epsilon_r$ )が、水平な皮膚面に斜めに(皮膚面に垂直な平面内で角度  $\theta$  を持って)立っていると考える。誘電体の局所部分に働く力  $F$  は、誘電率の不連続面に働く力の合成から、次式のように表される。

$$F = \frac{\epsilon_0}{2} (\epsilon_r - 1) (\sin^2 \theta + \frac{1}{\epsilon_r} \cos^2 \theta) (E_a^2 - E_b^2) \dots (1)$$

ここで  $E_a$ 、 $E_b$  は、力  $F$  の作用点の両側の電界値である。

一般に  $\theta \approx 0$  ではなく、 $\epsilon_r \gg 1$  と考えられることから、(1)式は

$$F \approx \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \sin^2 \theta (E_a^2 - E_b^2) \dots (2)$$

のように簡略化される。体毛に働く力は、この  $F$  を体毛全体にわたって積分したものである。この式から、体毛に働く電気力は、体毛の比誘電率並びに体毛にかかる電界の二乗の勾配に、ほぼ線形に比例することがわかる。

つまり、湿度上昇により体毛の比誘電率または電界の勾配が増加すれば、体毛に働く力の増加が説明できる。

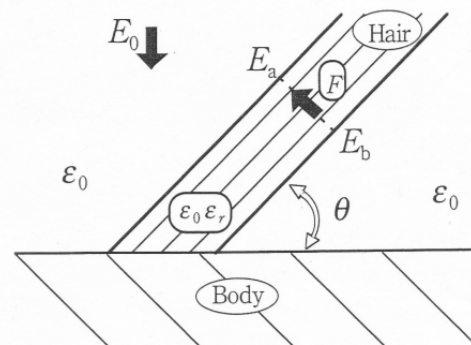


図 6 体毛に働く電気力の解析モデル

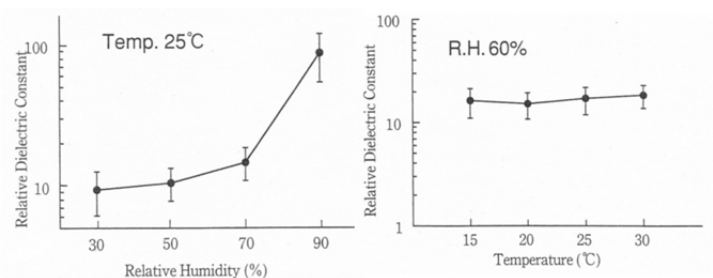


図 7 異なる温・湿度条件下での体毛誘電率

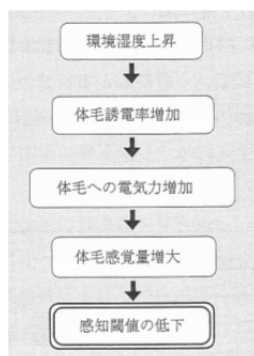


図 8 感知閾値の湿度依存の機序

この解析結果より、感知閾値の湿度依存性は、体毛に働く力の湿度依存性に起因すると考えた。この仮説を検証するため、新たに体毛の誘電率計測法を開発し [4]、異なる湿度条件下で計測を行った。結果を図 7 に示す。参考に示した温度依存性に比べ、体毛誘電率には明らかな湿度依存性があることが見出された。

これらの解析を通し、環境の湿度が上昇すると体毛の誘電率が増加し、体毛に働く電気力が増加すること、またそれに伴い体毛の動きおよび感覚量が増大し、結果として感知閾値が低下することが明らかとなった(図 8)。

### 7. 感じ方が違う？

複数の被験者に対し感知閾値を繰り返し計測していく中で、感知閾値には一定の個人差があることが認められた。このことは、相対湿度以外にも感知閾値を左右する要因があることを示唆するものである。そのような要因を調べていく中で、被験者の男女による違い、電界の感じ方に関する予備知識の違い、電界の有無の先験的情報などが候補としてあげられた。そこで、感知閾値に対するこれらの影響を調べるため、以下の実験的検討を行った。

まず、電界の感知は体毛の動きによることから、閾値の男女差は体毛の物理的性質の違いによると考えた。そこで、同一被験者の同一部位において、体毛の長さや密度を人為的に変化させ、電界感知

閾値の変化を調べた。結果を図 9 に示す。挿入図 (a) に見られるように、Case I は体毛に何も処理を施さない状態で、体毛の長さは一般に 15~17mm、体毛の密度は毛の間隔が一般に 2.8~3.1mm である。Case II は体毛の上半分を切除し長さを約半分にした場合、Case III は体毛を間引いて体毛間隔を約 2 倍にした場合、Case IV は体毛の切除と間引きの両方を行った場合である。

複数被験者の結果を同図 (b) に示す。男女とも体毛が長い程、また密度が高い程電界を感じやすいことがわかる。体毛が通常の状態では、女性に比べ男性の閾値が低い、体毛が短くなるとその差が消滅または逆転することもわかる。これは、男性の方が一般に体毛が太く長いことから電界を感じやすいため、また体毛の差がなくなると女性本来の敏感さが反映されるためと考えられる。

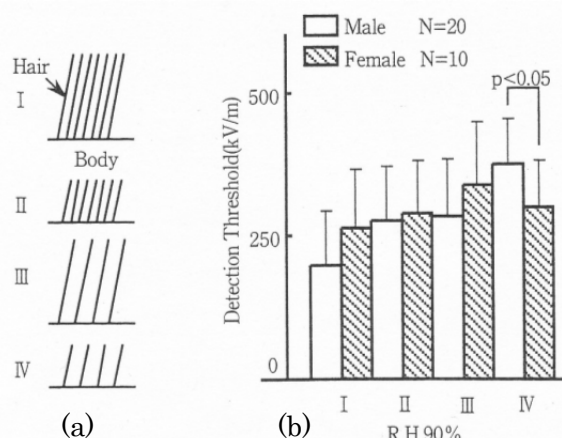


図 9 体毛の物理的条件による電界感知閾値 (a)体毛の条件 (b)電界感知閾値の計測結果

(a)

case	
A	no prior knowledge
B	study of how to perceive (explanation and experience)
C	study of the sensation + audio cue (sound of switch)
D	study + audio cue + visual cue (hair movement)

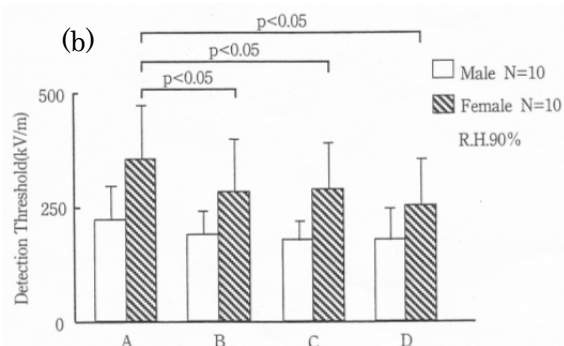


図 10 予備知識や先験的情報による閾値の変化 (a) 予備知識などの条件 (b) 電界感知閾値の計測結果

電界感知は体表の微妙な感覚によって生じるため、電界曝露の経験、感じ方についての予備知識、電界有無の先験的情報などに影響されると思われる。電界曝露の国際的安全基準[7]では、日常曝露時間の長い職業人と一般公衆とに分けて異なる基準が設けられている。それぞれの場合に対する感知閾値を考えるためにも、これらの影響を明らかにする必要がある。そこで感知閾値が、電界の感じ方や電界の存在についての予備知識によりどう変化するのかを調べた[4]。その結果を図 10 に示す。予備知識の増加に伴い閾値が低下していくのがわかる。またこの傾向は、初めから閾値の高い女性の方が、男性に比べ顕著である。

## 8. おわりに

商用周波数を含む ELF 電界の生体作用として体表刺激作用を取り上げ、電界感知の機序や感知閾値の特性に関する基礎的研究結果のいくつかを紹介した。このような研究を通し、以下の点が明らかになった。

- ①強電界中でヒトは電界を感知する。電界感知の主要な機序は、電界曝露により体毛に電気力が働き、体毛の機械的動きが毛根部の感覚受容器を刺激するためと考えられる。
- ②体毛は、直流電界内では曝露時に一過性に動き、交流電界内では振動する。従っ

て、感知閾値は通常後者のほうが低い。

③感知閾値は、環境の相対湿度に依存して顕著に変化する。温度に対する依存性は、湿度に比べ小さい。その原因は、湿度の上昇に伴い体毛の誘電率が上昇し、体毛に働く電気力が増大するためと考えられる。

④感知閾値は体毛の長さにも依存し、一般に男性の方が女性に比べ低い。体毛の差が減少すると、女性の方が閾値が低くなる傾向が見られる。

⑤感知閾値は、電界曝露の経験や感じ方の予備知識、また電界有無の先験的情報などによっても影響される。

これらの結果は、電界曝露の安全基準を考える際に、直流・交流の別、対象国の気候、個人差、公衆・職業曝露の別などを考慮する必要があることを示唆していると考えられる。

本研究は、北海道大学(現早稲田大学)清水孝一教授のご指導に負うところが大きい。ここに感謝の意を表す。

## 参考文献

- [1] 電気学会・電磁界生体影響問題調査特別委員会編, 電磁界生体影響問題の最近の動向, 2011
- [2] 電気書院編, 平成九年版電気技術設備基準とその解釈, 電気書院, 1997
- [3] H. Odagiri, K. Shimizu and G. Matsumoto, Fundamental Analysis on Perception Mechanism of ELF Electric Field, IEICE Trans. Commun., Vol. E77-B, No. 6, pp. 719-724, 1994
- [4] H. O. Shimizu and K. Shimizu, Experimental Analysis of the Human Perception Threshold of a DC Electric Field, Medical & Biological Engineering & Computing, Vol. 37, No. 6, pp. 727-732, 1999
- [5] H. O. Shimizu and K. Shimizu, Analysis of Body Hair Movement in ELF Electric Field Exposure -For Mechanism of Seasonal Change in Perception Threshold-, 2014International Symposium on Electromagnetic

- Compatibility, pp.162-165, 2014
- [6] 坂本将樹, 小田切久恵, 三澤顕次, 有澤準二, 清水孝一, 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, pp. 29-36, 1996
- [7] ICNIRAP, Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric Magnetic and Electromagnetic Fields (1Hz-100kHz), Health Physics, Vol.99, No. 6, pp.818-836, 2010