



## 小特集

放電プラズマ・電磁界を応用した生物学・農学的研究

### 5. 高電界の動物影響

伊坂 勝生

(徳島大学工学部)

Effects of High Electric Fields on Animals

ISAKA Katsuo

Faculty of Engineering, The University of Tokushima, Tokushima 770-8506, Japan

(Received 25 March 1999)

#### Abstract

The biological effects of extremely low frequency electric fields on animals are reviewed with emphasis on studies of the nervous system, behavior, endocrinology, and blood chemistry. First, this paper provides a historical overview of studies on the electric field effects initiated in Russia and the United States mainly regarding electric utility workers in high voltage substations and transmission lines. Then, the possible mechanisms of electric field effects are explained using the functions of surface electric fields and induced currents in biological objects. The real mechanisms have not yet been identified. The thresholds of electric field perception levels for rats, baboons, and humans are introduced and compared. The experimental results concerning the depression of melatonin secretion in rats exposed to electric fields are described.

#### Keywords:

electric field, animal, extremely low frequency, electric field perception, surface electric field, induced current density, magnetic field, melatonin

#### 5.1 はじめに

自然界には電界が存在し、地上では晴天下で約 100 V/m、雷雲下では最大で 30 kV/m となっている。このような高電界の昆虫類への影響が古くから調べられていたが、本格的な電界影響の研究は人工の電界、すなわち電力設備からの電界とその作業員のカップリングが問題視されてからのことである。

本稿では 3 Hz～3 kHz の極低周波帯 (ELF)，主として電力周波数の電界の生体影響の研究の歴史、電界の作用機序、電界の動物影響、電界の医学的応用について述べる。なお、ここでは電界強度は単に電界、また磁束密度は磁界と呼ぶ。

---

author's e-mail: [isaka@ee.tokushima-u.ac.jp](mailto:isaka@ee.tokushima-u.ac.jp)

#### 5.2 ELF 電界の生体影響に関する研究の歴史 [1,2]

ソ連ではすでに 1950 年頃に 220 kV 以下の電力設備からの電界の生体影響が研究対象となり、1962 年には超高压設備からの電界による健康問題へと移行している。一方、米国では 1960 年に、従来から使われた絶縁棒による作業に代わって、電力作業員の素手による活線作業法（充電部に直接乗り移るか、あるいは大地より絶縁された作業サイトから、素手により作業を行う方法で、いずれの場合も人体と充電部の電位を同一にする）が開発されたのを契機として、作業員に対する高電界影響についての研究が開始された。

1960 年代にはソ連における電界の健康影響に関する医学研究報告が数件ある。それらはいずれも電力開閉所勤

務の従業員に関するもので、電界測定と健康に関する自覚症状（頭痛、疲労、性的能力の減退など）の聞き取り調査・診断結果を主とした検討の内容には対照区（比較対象グループ）の設定がないなど、科学的というにはほど遠いものであった。米国では電界測定に力点が置かれた研究が推進され、活線作業中の人体周辺の電界分布、人体誘導電流の大きさとその時間波形、電界遮へい方法など、現在でも十分参考になるデータが明らかにされている。これらの研究と並行して電界影響に関する医学的検討が行われ、電力設備からのX線放射がないこと、11人の作業員には3年半にわたって健康影響がないこと、等が確認された。マウスの高電界（160 kV/m）暴露実験からは特に有害な影響は現れなかったものの、子ネズミの体重に有意差が生じた点が問題として残された。

1970年代に入ると、1972年の大電力網会議におけるソ連からの電界有害説の発表を契機として、米国では折りからの環境重視世論もあって電界の健康影響の大論争が展開されるに至った。この背景には1969年12月に制定された国家環境政策法案 NEPA (National Environmental Policy Acts) があり、電力事業環境アセスメントのための環境影響申告書 EIS (Environmental Impact Statement) には電界影響を含む電気的環境影響について記述が求められるようになっていたからである[3]。この点についての公聴会の中で、特に1973年に認可申請されたニューヨーク州の765 kV送電線建設に関する公聴会では主として電界の健康影響が議論され、この方面的関心が学術学会内でも深まりをみせ、1978年には生体電磁気学会 BEMS (Bio-Electro-Magnetics Society) が設立された。米国ではこの時期、電界影響に関する動物実験が多く行われたが、後述のごとく、初期の実験には質的に問題のあるものがあり、これらの研究結果が議論に拍車を掛けたことは否めない。政府は主としてエネルギー省 (DOE)、民間は電力研究所 (EPRI) を通してこの時期に研究・調査を開始し、現在まで継続している。

1980年当時は、1979年に発表された磁界と小児白血病の相関関係を示唆する疫学調査結果にもかかわらず、電界影響中心の研究が行われていたが、決定的な影響を見出せないこともあって次第にもう一つの因子としての磁界を取り込んだ複合的な電界・磁界の影響に関する研究が行われるようになった。そして1987年に磁界と小児白血病の相関関係を追認する研究成果が発表されるや否や、研究のターゲットは一気に磁界の生体影響の解明に向かった。この流れは現在まで続いているが、電界影響の研究結果の総括はいまだ行われていないと見る向きが

多く、昨年の米国での電界影響シンポジウムでもそのような声が多くあがっている。確かにELF電界・磁界は生物学的影響を引き起こす物理量であるが、身の周りの環境におけるそれらのレベルでは健康影響を及ぼすとはいえないとの結論[4]が現在のところ妥当であると考えられる。国際的な電界影響研究のまとめは1984年の世界保健機関 (WHO) によるもの[5]、電界の暴露防護ガイドラインは1998年の国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) によるもの[6]がある。

### 5.3 電界の作用機序

ELF電界の生体影響そのものが明確でないために、その作用機序についての定説はまだない。電気工学的立場からは、もし電界の影響があるとすれば、(1)生体表面に誘導される電界による刺激作用、(2)体内に誘導される電流の生理的作用、のいずれか、または双方によるものと考えることができる。

#### 5.3.1 体表面電界の作用

電界内に生体が入ると、体表面の形状と姿勢に応じて電界分布が定まる。その表面の凸部には静電誘導によって誘導される電荷が集中するために、大きな電界が生じる。ELF電界の場合は空気のインピーダンスは生体のそれに比して極めて大きいので、生体表面の電界を評価する際には生体を金属物体に置き換えて実験することができる。このような測定原理を使って行われた平等電界 10 kV/m における実験結果[7]を紹介すると、最大電界は人体頭頂部では 180 kV/m、ミニブタの背中では 67 kV/m、ラットの背中では 37 kV/m に達している。これらの表面電界は生体の接地状態に影響を受け、完全接地状態で最も大きくなる。このような電界が表面の産毛・体毛を動かし、皮膚に刺激を与えることによって、神経系などに影響を与え、あるいはこれがストレスを引き起こすことが考えられる。

#### 5.3.2 体内誘導電流の作用

電界内に生体が入ると、体表面の電界分布に応じた電流が体内に誘導される。平等電界内の直立した成人が接地されている場合、足元には最大の電流が流れ、その値は約 15~20 μA (1 kV/mあたり) である。人体影響を評価するのに用いられる電流密度でみると、一般に首、足首で大きな電流密度が生じる。動物の場合の誘導電流密度分布はその姿勢によって大きく異なる。すなわち、四足で立っている状態、後ろ足で立ち上がった状態、腹ばい状態では誘導電流の流れ方が異なり、特に四足で立っている場合には誘導電流は前後の足に分流するので、腹部での電

流密度はその他の状態の場合と比較してかなり小さくなる。

このような体内誘導電流は神経・筋などを刺激し、影響を与えることはすでに確認されており、その電流密度のしきい値（約  $100 \text{ mA/m}^2$ ）は電界暴露防護ガイドラインの基本制限値として採用されている[6]。神経・筋の刺激レベル以下の誘導電流の影響は明確にされていないが、例えば細胞間質（細胞間にある電解質）におけるイオンの動き・働きに影響を与えることによって、生体効果を引き起こす可能性がある。

### 5.3.3 スケーリングファクタについて

ある強度の電界の人体影響を調べるために動物実験を行う場合、動物に何倍の電界をかけると等価な実験条件が得られるか、その電界の倍数をスケーリングファクタ ( $S_F$ ) という。上述の電界ドシメトリ（表面電界と誘導電流密度の定量的解析）に基づいたマクロ的な  $S_F$  は、最大の表面電界を比較すると、ミニブタに対しては 2.7、ラットに対しては 4.9 となる。また、首における電流密度を比較すると、ミニブタの 14 に対して、ラットでは 20 となる[8]。現在のところ  $S_F$  は電界影響および磁界影響分野ともに明確にされていないので、動物実験結果を外挿して人体影響を直接、論じることはできない。

スケーリングファクタについては、米国エネルギー省が電界と生体のカップリングのコンピュータモデリングに関する RFP (Request For Proposals) を提出したのが 1983 年 11 月である[9]。この頃、我が国においても同様の研究が進行していた[10]。

## 5.4 電界の動物影響

### 5.4.1 実験結果の整理

1984 年に出版された WHO 報告書[5]には、動物の神経系および行動、血液生成、内分泌および血液化学、成長と発育、繁殖力および生殖機能に関する実験結果がまとめある[2]。この中から、(1) 神経系および行動、(2) 内分泌および血液化学について、1985 年から 1998 年までに生体電磁気学会 (BEMS) 雑誌に掲載された論文[11-24]を付け加えた結果の一覧をそれぞれ Table 1 および Table 2 に示す。これまでに実に多くの実験が行われてきたが、結果の再現性のあるものは少なく、現在では(1) 動物は電界を感知する、(2) メラトニン分泌に影響する、の 2 点が電界影響として知られている。ただし、メラトニンに関する実験についても影響として確立されたものではなく、さらに実験を要する状態である。最近 15 年間の BEMS 論文を見ると、血液生成に関する論文は 0 件、成長と発育については 4 件、繁殖力および生殖

機能に関しては 1 件に留まっている。

高電界の動物影響に関する実験の難しさは(1)部分放電によるオゾンの発生、(2)電界曝露装置の機械的振動、(3)動物を囲っている媒体が動物の糞尿によって汚損され、その結果、生じる曝露電界の特性の変化、(4)給水・給餌システムと動物の電位差に基づくマイクロ放電の発生、(5)磁界の有無、(6)電圧印加の方法、などに留意しなければならない点にある。初期の実験にはこのような点が見過ごされたものが多く見られる。

### 5.4.2 電界の感知

動物の電界感知については多くの実験で認められている。電界感知のしきい値は次のとおりである[10]。ラットについては雄は  $4 \sim 10 \text{ kV/m}$ 、雌は  $3 \sim 10 \text{ kV/m}$  であり、平均は約  $8 \text{ kV/m}$  である。また、しきい値検出方法によって異なり、8 または  $13 \text{ kV/m}$  となる結果がある[13]。アフリカヒビ (baboon) では  $12 \text{ kV/m}$  である[12]。したがって、感知しきい値を超える高電界の下で動物実験を行うと、皮膚刺激の影響に関する結果が卓越して現れる可能性がある。実験結果の評価に際し、電界感知現象に対する相対湿度の影響を見過ごしてはならない。

### 5.4.3 メラトニンの分泌

メラトニンは松果体から産生されるホルモンで、ガン増殖に対する抑止作用をもっていると言われている。このメラトニンの分泌が夜間に抑制されることが 1981 年と 1983 年のラットの研究で初めて見出された (Table 2 参照)。その後もこれを支持する実験結果[21]が出されたが、1994 年の研究[23]ではこれが否定され、血清中のメラトニンの変化が指摘された。ELF 磁界についてもラットの松果体メラトニンの抑制効果を持っているとの実験結果があるが[25]、どのような作用機序に基づいているかは不明である。なお、(1) 電界  $6 \text{ kV/m}$ 、磁界  $50 \mu\text{T}$  ( $0.5 \text{ G}$ )、または電界  $30 \text{ kV/m}$ 、磁界  $100 \mu\text{T}$  ( $1.0 \text{ G}$ ) の実験条件で行われたアフリカヒビ[26]、(2) 送電線下で飼育された羊[27]には血清メラトニンの変化は見られていない。

### 5.4.4 人体影響

室内における人体曝露実験はドイツで精力的に行われたことがある。 $20 \text{ kV/m}$  までの電界条件下では反応時間は若干低下し、白血球は幾分増加傾向にあるものの、いずれも生理学的に正常といえる限度内にあることが実験結果として示されている[5]。電界影響については電力作業員を対象にした多くの疫学研究が行われたが、検討課題が残されたままになっているものがある[28]。最近、磁界の影響の大規模疫学調査が行われ、電界曝露を

Table 1 Nervous system and behavioral studies in animals [2,5,11-19].

Exposure (kV/m)	Frequency (Hz)	Subject	Effects examined
0.035	15, 30, 50	rat	no effect on overall rate of neuron firing
0.0074	60	monkey	no effect on operant behavior
~ 0.056	45, 60, 75	monkey	altered behavior (frequency specific)
0.010- 056	7, 10	monkey	changes in interresponse time, dose-dependent. EEG entrainment at field frequency
0.1	60	rat	no effect in preference behavior or in temporal discrimination
~ 0.1	45	mouse	no effect on brain and serum serotonin
~ 0.1	45	rat	altered brain acetyl transferase
0.8-1.2	60	mouse	more active in dark periods
4.2	60	bees	increased activity during exposure
~ 25	60	rat	initial startle reaction
2-10	60	rat	detection threshold approximately 8 kV/m
~ 15	60	baboon	detection threshold approximately 12 kV/m
25, 50	60	mouse	initial sterile reaction
25, 50	60	rat	preference for area of exposure
26	60	chick	peck suppression, 28 % decrease in motor activity
~ 27	60	rat	detection threshold at 7.9 or 13.3 kV/m, depending on methods used
30	60	swine	perception of field, prefer shielded area at night
30	60	rat	no effect in taste aversion
30	60	baboon	small behavioral changes
30, 60	60	baboon	temporary cessation of operant behavior
30, 60	60	baboon	differences in three social behavior categories
32	60	pigeon	perception of field altered in exposed animals
10-75	60	mouse	transient hyperactivity in inactive phase, 35 kV/m average threshold
40	60	chick	decreased activity in exposed animals
50	50	mouse	no effect on behavior (also for rat and guinea-pig)
50	60	rat	movement of vibrissae decreased with increase of relative humidity
10-75	60	mouse	hyperactivity with intermittent exposure (commencing at 50 kV/m)
67	60	chicken	no effect on activity or gross behavior
67	60	mouse	hyperactivity with intermittent exposure
79, 90, 100	60	rat	rats spend more time out of field
80	60	cat	EEG changes
65	60	rat	increased excitability of sympathetic ganglion
65	60	rat	no effect on peripheral nerve function
65	60	rat	excitory changes in neuromuscular function, slower recovery from fatigue
~ 65	60	baboon	electric field of as much 65 kV/m is not aversive
100	60	rat	no aversive stimulus
100	60	rat	aversion behavior
~ 600	60	cat	observation stimulation of paw by surface electric field of 160 kV/m

Table 2 Studies on endocrinology and blood chemistry [2,5,20-24].

Exposure (kV/m)	Frequency (Hz)	Subject	Effects examined
0.1	45	rat	altered plasma corticosterone levels
0.1	45	rat	no effects on serum chemistry
1.5	60	rat	lower melatonin in pineal gland (1981, 1983)
5	60	rat	no effect on serum chemistry
10	60	rat	adrenal response elevated
15	60	rat	lower serum corticosterone
15	60	rat	lower albumin
15	60	dog	no effects on cortisol secretion
25	50	dog	no effects
25, 50	60	mouse	transient effect on steroid concentrations
39	60	rat	alterations in diurnal rhythms of biogenic amines
39	60	rat	decrease in pineal melatonin level
50	50	rabbit	altered calcium, glucose, urea
50	50	mouse	no effects on blood biochemistry
50	50	rabbit	no effects
50	50	guinea-pig	no effects on blood biochemistry
50	60	rat, rabbit	no effect on plasma and adrenal levels of corticosterone
65	60	rat	lower testosterone level (120-day exposure); no effects in other hormones
65	60	rat	alteration in serum melatonin
80	60	rat	no change in corticosterone level
100	60	rat	no effects on serum chemistry
100	59	rat	no effects
100	60	rat	no effect in corticosterone level, increase in growth hormone (intermittent exposure)

考慮に入れると、白血病[29]や脳腫瘍[30]に有意差が生じる結果が報告されており、関心を呼んでいる。この場合の問題は電界曝露量の評価をどのように行ったかにあり、磁界の場合よりもはるかに難しいだけにその定量化の手法には問題点が多いと考えられる。

最近、人体の脳に誘導される電流がその周囲に存在する導電率の高い脳骨髄液によって低減されることがモデル数値計算により確かめられた[31]。数値計算アプローチには限界があるが、人体影響を考えるうえでこのようなモデリングは重要であると考えられる。

## 5.5 電界の応用

骨折すると、骨折部に仮骨が形成されるが、電流が新しい骨組織を増殖することによって仮骨の形成促進に効果的に働くことは広く認められている。したがって電界は骨折治療への適用が可能であるが、骨の成長や強度の増加には効果はない。

人体を電界内に置いて、生体を刺激し、肩こり・不眠

症・頭痛・便秘などの日常の愁訴を改善しようとする電界療法が一部で普及している。これは、絶縁台に座った人の足元に高電圧電極を配置し、その人に電界を作用させようとするものである。現在、電界の医学分野での応用は限られているが、これは健康に悪い影響があるかもしれないとの立場から議論を重ねてきたためと考えられる。今後は有効な応用面に着目した研究も求められる。

## 5.6 おわりに

今から30年前に世界的な注目を集めた低周波電界の生体影響について、その歴史的論争、メカニズム、動物・人への影響の実際などについてレビューした。最近の15年間は磁界の生体影響の研究が主流となり、電界関係の研究はあまり進展していないが、電界は

- (1) 帯電粒子などとの相互作用を持つなど、電界とは異なる作用を有する、
  - (2) 大きな体内電流を誘導する、
- ので、今後も磁界と同様に大きな関心が持たれると考え

られる。

### 参考文献

- [1] 伊坂勝生, 横井良秀, 長田正義, 吉村 昇, 能登文敏: 静電気学会誌 **4**, 90 (1980).
- [2] 横井良秀, 伊坂勝生: 電磁気と生体 大森豊明編 (日刊工業新聞社, 東京, 1987) p.19.
- [3] 伊坂勝生, 横井良秀: 電気協会雑誌 **691**, 1 (1981).
- [4] 電気学会生体影響問題調査特別委員会: 電磁界の生体影響に関する現状評価と今後の課題 (電気学会, 1998).
- [5] World Health Organization, *Environmental Health Criteria 35 / Extremely Low Frequency Fields* (World Health Organization, Geneva, 1984).
- [6] International Commission on Non-Ionization Radiation Protection, *Health Phys.* **74**, 494 (1998).
- [7] W.T. Kaune and R.D. Phillips, *Bioelectromagnetics* **1**, 117 (1980).
- [8] T.D. Bracken, *Bioelectromagnetics Suppl.* **1**, 15 (1992).
- [9] 伊坂勝生, 横井良秀: 静電気学会誌 **9**, 53 (1985).
- [10] A. Chiba, K. Isaka, Y. Yokoi and M. Nagata, *IEEE Trans. PAS* **103**, 1895 (1984).
- [11] B.W. Wilson, E.K. Chess and L.E. Anderson, *Bioelectromagnetics* **7**, 239 (1986).
- [12] J.L. Orr, W.R. Rogers and H.D. Smith, *Bioelectromagnetics Suppl.* **3**, 23 (1995).
- [13] P.M. Sagan, M.E. Stell, G.K. Bryan and W.R. Adey, *Bioelectromagnetics* **8**, 303 (1987).
- [14] W.R. Rogers, J.L. Orr and H.D. Smith, *Bioelectromagnetics Suppl.* **3**, 35 (1995).
- [15] A.M. Coelho, J.S.P. Easley and W.R. Rogers, *Bioelectromagnetics* **12**, 117 (1991).
- [16] R.J. Weigel and D.L. Lundstrom, *Bioelectromagnetics* **8**, 107 (1987).
- [17] W.R. Rogers, J.L. Orr and H.D. Smith, *Bioelectromagnetics Suppl.* **3**, 48 (1995).
- [18] S. Stern and V.G. Laties, *Bioelectromagnetics* **10**, 99 (1989).
- [19] R.J. Weigel, R.A. Jaffe, D.L. Lundstrom, W.C. Forsythe and L.E. Anderson, *Bioelectromagnetics* **8**, 337 (1987).
- [20] D.B. Lyle, R.D. Ayotte, A.R. Sheppard and W.R. Adey, *Bioelectromagnetics* **9**, 303 (1988).
- [21] B.W. Wilson, E.K. Chess and L.E. Anderson, *Bioelectromagnetics* **7**, 239 (1986).
- [22] R. Porter and J. Cabanes, *Bioelectromagnetics* **9**, 95 (1986).
- [23] L.J. Grota, R.J. Reiter, P. Keng and S. Michaelson, *Bioelectromagnetics* **15**, 427 (1994).
- [24] W.J. Quinlan, D. Petrondas, N. Lebda, S. Petti and S.M. Michaelson, *Bioelectromagnetics* **6**, 381 (1985).
- [25] M. Kato, K. Honma, K. Shigemitsu and T. Shiga, *Bioelectromagnetics* **14**, 97 (1993).
- [26] W.R. Rogers, R.J. Reiter, L. Barlow-Walden, H.D. Smith and J.L. Orr, *Bioelectromagnetics Suppl.* **3**, 111 (1995).
- [27] J.M. Lee, F. Stormshak, J. Thompson, D.L. Hess and S. Hefeneider, *Melatonin Hypothesis* (Battelle Press, Columbus/Ohio State, 1997) p. 391.
- [28] 伊坂勝生, 横井良秀: 静電気学会誌 **9**, 176 (1985).
- [29] A.B. Miller, T. To, D.A. Agnew, C. Wall and L.M. Green, *Am. J. Epidemiol.* **144**, 150 (1996).
- [30] P. Guenel, J. Nicolau, E. Imbernon, A. Chevalier and M. Goldberg, *Am. J. Epidemiol.* **144**, 1107 (1996).
- [31] 千葉敦生, 伊坂勝生: 電気学会論文誌 **118-B**, 627 (1998).