

## Acute Effects of Whole-Body Exposure to Low Frequency 16 Hz and 50 Hz Electromagnetic Fields on Cutaneous Microcirculation in Mice - EMF-Frequency Dependence of Changes in the Blood Vessels Diameter

Traikov L., \*Ushiyama A., Masuda H., and Ohkubo C.,  
Department of Environmental Health; National Institute of Public Health, Tokyo, Japan

**Introduction:** The goal of this study was to investigate the possible modulating effect of low-frequency electromagnetic fields with physiotherapeutic parameters on the microcirculation. A number of papers claim, that specific combinations of low-level DC and AC magnetic fields can cause biologically significant effects. Specific combinations of frequencies of these fields evoke these responses fulfilling the theoretical conditions of classical cyclotron resonance. Calcium ions play an important key role in regulation of physiological processes and mediation of interactions of biological systems with external physical and chemical factors. It is well known that calcium ions play important roles in the regulation of vasomotion. Modulation of the microcirculation by external physical factors such as LF-EMF is a main point for understanding the mechanisms involved in the medical application of these fields.

**Material and methods:** 8-12 week old BALB/c mice were used in this investigation, and a Dorsal Skin-fold Chamber (DSC), were surgically implanted 4 days before the experiment. Intravital video-microscopy (with 3CCD-camera, SONY Inc.) measurements of the vasomotion of micro-blood vessels (diameter between 45 -70  $\mu\text{m}$ ) *in vivo* were applied. Vasomotion or temporal changes of the blood vessel diameter was measured by High-speed Digital Machine Vision System CV-2100 (KEYENCE Inc.), using an edge-gap detection algorithm (with a sampling time 200 ms), for calculating the outer diameter of the blood vessels by means of fluorescence-image visualization, after caudal vein injection of (50  $\mu\text{l}$  per 25g animal) Fluorescein Isothiocyanate (FITC)-labeled Dextran 150 kDa (FITC-Dextran-150), concentration 2.5%. Experimental set up include three series of experiments, a Control series: Pre- exposure group, Sham exposure group and Post-exposure group, Exposure series: (16 and 50 Hz; 20 mT; 10 min), containing Pre-exposure group, exposure and Post- exposure groups.

**Results:** In this investigation we used mean blood vessel diameter for each group as a criteria for microcirculatory activity, demonstrated by blood vessel vasomotion (condition defined by vasodilatation and vasoconstriction of the blood vessel). The results obtained by detection of mean diameter of the blood vessel obtained for 10 min period of time, shows that Control series of experiment do not show significant differences between experimental groups, blood vessel diameter remained without significant ( $p < 0.05$ ) changes ( $0.51 \pm 0.01 \mu\text{m}$ ). The exposure series showed a significant ( $p < 0.05$ ) difference between pre-exposure mean blood vessel diameter and 10 min post exposure diameter ( $10.78 \pm 1.88 \mu\text{m}$ ) observed at 16 Hz low frequency electromagnetic field exposure. For the series exposed to 50 Hz LF-EMF changes of the mean blood vessel diameter difference between pre-exposure mean blood vessel diameter and 10 min post exposure diameter ( $5.35 \pm 4.38 \mu\text{m}$ ) and therefore not significant.

**Conclusion:** Increasing of the values for mean blood vessel diameter at EMF with frequency (16 Hz). 10 min after exposure, suggest that possible modulator effect of this field could exist at the skin microcirculation.

**Key words:** microcirculation, electromagnetic fields, acute effects, blood vessel diameter

## 6-6 STUDENT

**DOSIMETRY OF RAT-HEAD SAR CAUSED BY A HIGH-PERFORMANCE g8h-SHAPED LOOP ANTENNA.** H. Watanabe<sup>1,2\*</sup>, K. Wake<sup>1</sup>, M. Hanazawa<sup>1\*</sup>, S. Watanabe<sup>1</sup>, H. Masuda<sup>3</sup>, C. Ohkubo<sup>3</sup>, M. Taki<sup>4</sup>, Y. Yamanaka<sup>\*1</sup>, and T. Uno<sup>2\*</sup>, <sup>1</sup>Nat'l Inst of Information and Communications Tech, Tokyo 184-8795, Japan, <sup>2</sup>Tokyo Univ of Agriculture and Tech, Tokyo 184-8588, Japan, <sup>3</sup>Nat'l Inst of Pub Hlth, Tokyo 106-8638, Japan, <sup>4</sup>Tokyo Metropolitan Univ, Tokyo 912-0397, Japan.

**INTRODUCTION:** Many *in vivo* studies on unknown health effects due to localized exposure to microwaves radiating from cellular phones have been reported. Most of the studies have been criticized due to insufficient localization of high SAR region in laboratory animals, e.g., rats and mice. Some new high-performance antennas have therefore been developed in order to improve the localization of high SAR region. Exposure setups including a small loop can realize localized exposure conditions (Chou, et al., *Bioelectromagnetics*, Vol.20, pp.75-92, 1998; Dulou, et al., *20th Annual Meeting of BEMS*, pp.152-153, 1998). It is however difficult to observe real-time biological changes, via “cranial-window” embedded in a rat’s head (Masuda, et al., *Microcirculation Annual*, pp.151-152, 2000), during exposure to cellular-phone signals by those antennas. We have therefore designed a new loop antenna which can provide real-time observation as well as highly-localized SAR distribution (Watanabe, et al., *6th International Congress of EBEA*, pp.147, 2003).

**OBJECTIVE:** In this presentation, we present the dosimetry of rat-head SAR caused by the new antenna, both numerically and experimentally.

**METHOD AND MATERIAL:** A high-performance X-ray CT equipment has been used in order to obtain high-resolution anatomical data of the cranial-window rat. From the CT data, we have developed a voxel rat model with 0.5-mm spatial resolution, as shown in Figure 1. Distribution and statistics of the rat SAR have been calculated with FDTD method. Homogeneous rat phantom with the same shape of the voxel model have also been developed. SAR distributions have been experimentally estimated with the thermography method.

**RESULTS AND DISCUSSION:** SAR distributions are shown in Figure 2. It is shown that high SAR region is localized around the top of the rat head, i.e., the target tissue of the “cranial-window observation”. The measure of the SAR localization, i.e., the ratio of target-tissue averaged SAR (TTA-SAR) to the whole-body averaged SAR (WBA-SAR), has been estimated to be over 60. This value is very effective in compared to at most about 20 for ordinary antennas. The comparison of the SAR distribution between the experiment and the calculation is shown in Figure 2. Good agreement between the experiment and the calculation implies that the results of our dosimetry have good accuracy.

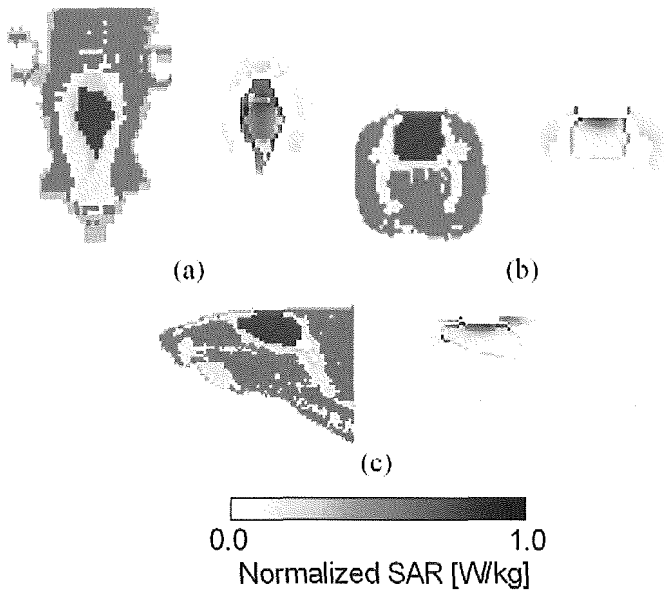


Figure 1: Calculated SAR distributions on the top surface of the brain (a), in the mid section of the brain normal to the sagittal axis (b), and in the sagittal section (c).

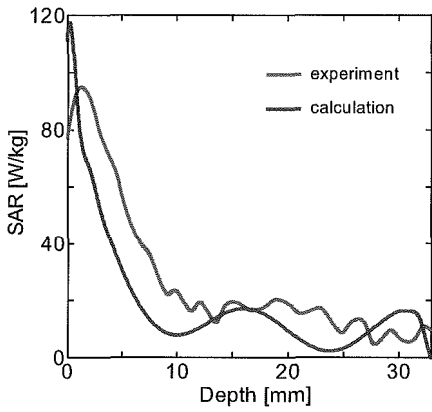


Figure 2: SAR distributions along the axis through the center of the brain from top surface of the brain to bottom of the head. SAR values are normalized as the antenna output power is 1 W.

## **Intravital Microscopic and Histological Evaluation of Acute Effects on the Brain by Local Exposure to Radio-Frequency Electromagnetic Fields in Rats**

H. Masuda<sup>1</sup>, S. Hirota<sup>1</sup>, A. Ushiyama<sup>1</sup>, H. Watanabe<sup>2</sup>, K. Wake<sup>2</sup>, S. Watanabe<sup>2</sup>, Y. Yamanaka<sup>2</sup>,  
M. Taki<sup>3</sup> and \*C. Ohkubo<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Dept. of Environmental Health, National Institute of Public Health, Tokyo 108-8638, Japan.  
ohkubo@niph.go.jp

<sup>2</sup>EMC Research Group, Communications Research Laboratory, Independent Administrative Institution, Tokyo 184-8975, Japan.

<sup>3</sup>Dept. of Electrical Engineering, Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan University, Tokyo 192-0397, Japan.

To investigate the acute effects of radio-frequency electromagnetic fields (RF) exposure on the cerebral microcirculation, we evaluated not only blood-brain barrier (BBB) function but also other several microcirculatory parameters using intravital microscopic approach and histological approach in the rats.

The each head of Sprague-Dawley rats positioned under loop antenna was locally exposed to a 1,439MHz electromagnetic near-field TDMA (time division multiple access) signal for PDC (Personal Digital Cellular, Japanese cellular telephone standard) system in a small anechoic chamber. Using a cranial window method as a intravital microscopic approach, four cerebral microcirculatory parameters, BBB permeability, leukocyte behavior, plasma velocity, and vessel diameter were measured before and after RF exposure for 10 min at brain averaged SARs of 0.18, 1.80, 6.48 W/kg. On the other hand, BBB disruption in a whole brain was histologically observed with the brain sections. The brains were fixed with 4% paraformaldehyde 0-, 2-, 24-hour after RF exposure for 2 hours at a brain averaged SAR of 35W/kg. BBB disruption was estimated by extravasations of three types of molecule, Evans blue (MW: 960), FITC-BSA (MW: 69000), and internal immunoglobulin (MW: 156000).

Using intravital microscopy, we found no noticeable change in BBB permeability, leukocyte behavior, plasma velocity, and vessel diameter after RF exposure for 10 min at up to 6.48 W/kg. In addition, we histologically observed no extravasation of Evans blue, FITC-BSA, and internal immunoglobulin in any brain sections after RF exposure even for 2 hours at 35 W/kg. These results suggest that there is no acute effect on the cerebral microcirculation including BBB function after RF exposure under the present conditions.

\*This study was financially supported by The Committee to Promote Research on the Possible Biological Effects of Electromagnetic Fields, Ministry of Public Management, Home Affairs, Posts and Telecommunications, Japan.

**Key words: BBB permeability, cerebral microcirculation, cranial window**

# Effects of Continuous Whole-Body Exposure to 50 Hz Electromagnetic Fields with Repetitive Transient Magnetic Fields on the Intramicrovascular Leukocyte Behavior in Mice

A. Ushiyama<sup>1</sup>, Y. Suzuki<sup>2</sup>, H. Masuda<sup>1</sup>, S. Hirota<sup>1</sup>, M. Taki<sup>2</sup>, C. Ohkubo\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Environmental Health, National Institute of Public Health, -

4-6-1 Shirokanedai, Minato-Ku Tokyo, 108-8638, Japan

<sup>2</sup> Department of Electrical Engineering, Tokyo Metropolitan University,

1-1 Minami-Osawa, Hachioji-shi Tokyo, 192-0397, Japan

\*Email:ohkubo@niph.go.jp

## Abstract

Many studies to explore the effects of electromagnetic fields (EMF) exposure have been done, however, little information is available about the effect of transient magnetic fields. In order to explore the biological effect of transient magnetic waves, we exposed mice to sinusoidal 50 Hz EMF and repetitive transient waves for 16 days and monitored leukocyte behavior by using of a dorsal skinfold chamber (DSC) technique. The results indicated that repetitive transient magnetic field with 50 Hz EMF induced leukocytes endothelium interaction as we observed under the condition of pure 50 Hz EMF exposure. No specific effect of transient magnetic field was detected under this condition.

## 1. Introduction

The use of electrical energy brings us many kinds of amenities and advantages. However, the use of electrical energy produces of weak electric and magnetic fields (EMF) associated with transmission lines and electric appliance itself. In Japan, electricity is delivered as altering current that oscillates at 50 or 60 Hz categorized as Extremely Low Frequency (ELF). Although many reports have suggested a variety of biological effects from ELF-EMF, there are few reports of *in vivo* study focused on microcirculatory effects of ELF-EMF. Recently, the importance of noise components in EMF has been also recognized. Fifty or 60 Hz EMF in residential environment sometimes include various noise as transient waves which arise from several electric devices such as switching regulators and inverters.

Previously, we studied subchronic effects of whole body exposure to pure 50 Hz time varying EMF up to 3 mT, particularly, we focused on leukocytes endothelium interaction because this interaction can be treated as one of parameters for immunological response. Our previous

results showed 50 Hz EMF at 3mT elicited leukocytes endothelial interaction which means this exposure condition induced some immunological responses. Therefore, in this study we focused whether transient magnetic wave with pure 50 Hz EMF affect leukocyte behavior *in vivo*. In this study, mice were subchronically exposed to the combination of 50 Hz EMF at 3 mT and repetitive transient EMF (1 burst/s; 7.4 kHz waves with duration of 50 msec whose peak magnet density was 162  $\mu$ T) and determined leukocyte behavior by using intravital microscopy.

## 2. Materials and Methods

### Animal models

In the present study, we used a non-metal chamber which we recently developed [1]. The chamber frame was made of Duracon™ resin, a non-metallic material specifically utilized for this purpose. This chamber prevents heat production induced by electrical current. DSCs were implanted in 8-week-old male BALB/c mice (Tokyo Zikken Doubutsu Co., Tokyo). The implantation procedure was described in our previous paper.

All animals were fed a standard pellet diet and given water *ad libitum*. Mice were maintained with a 12-h light/dark cycle, and at a temperature of  $23.0 \pm 1.0$  °C. Animal cages, lids and water bottles did not contain any metal that might interfere with electromagnetic fields. All procedures were conducted in accordance with the ethical guidelines for animal experiments at the National Institute of Public Health.

### ELF-EMF and transient magnetic fields exposure

The exposure apparatus used throughout experiments comprised of the exposure system setup shown in Figure 2. The power supply unit and coils were obtained from Takano Giken, Inc. (Japan). Experimental magnetic fields are generated by Helmholtz coil (Fig.2). Mice were maintained inside of this coil, and subchronically exposed to sinusoidal 50 Hz time-varying EMF at 0.3

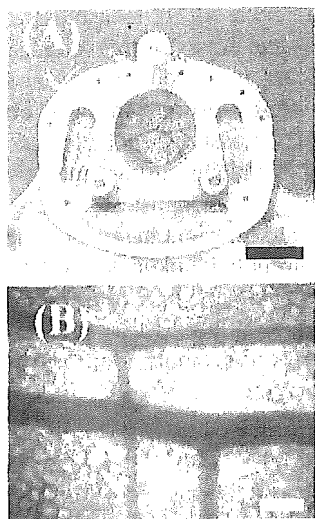


Figure 1 Overview of mouse dorsal skinfold chamber (DSC)

(A) A side view of mouse having DSC. Bar indicates 10 mm.

(B) Microvasculature within DSC under transparent microscope. Bar indicates 100

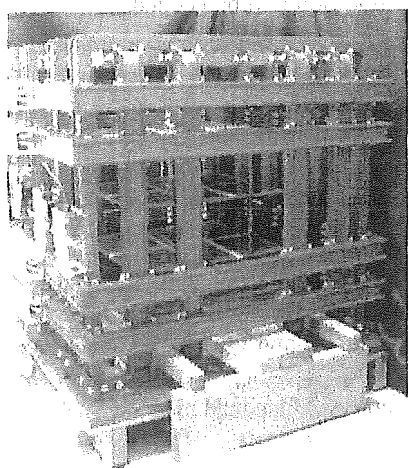


Figure 2 Photograph of the exposure apparatus. The animal rack is located at the center of coils, and is separated from the coils to prevent vibration. Minimum longitude of coils is 870 mm.

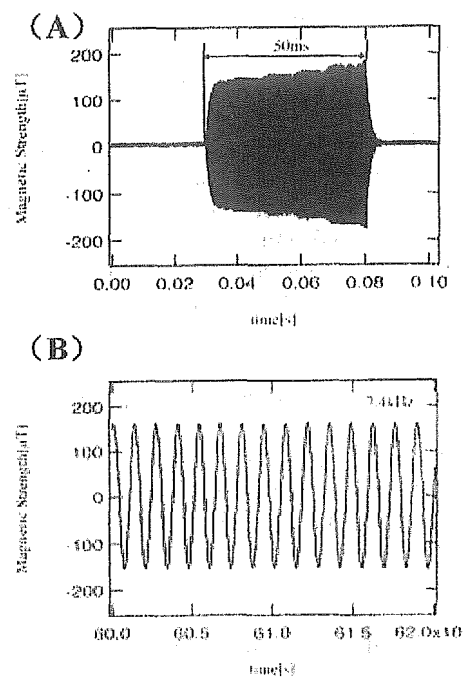


Figure 3 Exposure condition of transient Magnetic Field. Transient waves are superposed on 50 Hz (3 mT) sinusoidal wave.

(A) Wave form of one burst of transient wave.

(B) Wave form within one burst of transient wave.

and 3.0 mT (rms), or combination of 50 Hz EMF at 3.0 mT (rms) with repetitive transient EMF (1 burst/s, 7.4 kHz waves with duration of 50 msec and peak magnet density of 162  $\mu$ T). This wave form is illustrated in Fig. 3. Mice were continuously exposed to EMF for 15 hours/day (7 p.m. to 10 a.m.) for 15 days.

#### Intravital Microscopy

To visualize leukocytes *in vivo* the fluorescent marker rhodamine 6G (Wako Pure Chemicals Industries, Ltd., Osaka, Japan) was used. Rhodamine 6G was dissolved in physiological saline. Each solution was freshly diluted with saline until a final concentration of 0.02 mg/ml on the day of experiment. To remove unsolved substances, the solution filtered through a 0.22  $\mu$ m membrane filter before each experiment. Prepared solution (100  $\mu$ l) was injected into the caudal vein 5 min before image recording. During the data recording under CLSM, animals were anesthetized with the cocktail of ketamine and xylazine used in the DSC operation and then placed in an acrylic resin tube of 26 mm in inner diameter. The tube was fixed to an acrylic resin plate that was then set on the microscope. For repeated observations of the

# Development of a Transparency High Molecular Gel Phantom for Three-Dimensional Visualization of Radio Frequency Electromagnetic Power Absorption with Capsulate Thermo-chromic Liquid Crystal

Madoka BABA†, Yukihiisa Suzuki†, Aki Ishii†, Masao Taki†, Kaori Fukunaga‡, and Soichi Watanabe‡

†Graduate School of Engineering, Tokyo Metropolitan University,

1-1 Minami-Osawa, Hachioji, Tokyo 192-0397, Japan

‡National Institute of Information and Communications Technology,

4-2-1 Nukuikitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan

†E-mail: baba@com.eei.metro-u.ac.jp

**Abstract** Safety of radio frequency (RF) electromagnetic fields (EMF) is commonly discussed in terms of specific absorption rate (SAR). Phantoms are useful for the dosimetry on energy absorption of RF-EMF exposures. SAR is estimated from measurements of an increase in temperature within the phantom over a short period of time following the exposure. In the past study, a method for visualizing the three-dimensional (3D) distribution of temperature due to RF-EMF energy absorption was reported[1]. A difficulty of this method is that it can only visualize the temperature higher than the clouding point. We focused our interest on capsulate liquid crystal that has been used for visualization of temperature distribution within fluids [2].

The objective of this study is to make a phantom containing capsulate liquid crystal so as to develop a method to visualize 3-D distribution of electromagnetic power absorption. We have investigated the suitable materials for transparency phantom and discussed for the method to adjust dielectric properties of the phantom.

## 1. Development of Phantom

Micro-capsulated thermo-chromic liquid crystal (MTLC) is used for our experiments. Thermo-chromic liquid crystal is contained in the urea resin capsule. The diameter of the capsule is about 20 to 30 micrometer. The incident light into MTLC is needed for visualization. The wavelength of scattered light depends on the temperature of the capsulate liquid crystal. The wavelength becomes shorter with the increase of temperature. In other words, the scattered light changes in its color from red to purple with the increase of temperature. MTLC are suspended uniformly in the gel phantom.

The substrate material for the phantom should not be convective to measure SAR. Therefore, high-molecular gel constructed from "carrageenan", which is extracted from seaweed and has high transparency, is used as the substrate of the phantom to prevent convection. The dielectric properties of the phantom are adjusted by mixing propylene glycol, or KCl (potassium chloride).

## 2. Complex Permittivity and RF Exposure

Complex permittivity plots of the dielectric properties of phantoms that are made from carrageenan are shown in Fig. 1. Values of complex permittivity are measured by the dielectric probe (Agilent 85070C). In this graph, horizontal axis and vertical axis indicate relative permittivity ( $\epsilon'(\omega)$ ) and loss ( $\epsilon''(\omega)$ ), respectively. As shown in Fig. 1, each marker indicates the complex permittivity at 500[MHz], 900[MHz], 1.5[GHz], 1.95[GHz], and 2.45[GHz], respectively. Solid line which shows muscle property is obtained by the parametric model of biological tissues [3]. As shown in Fig. 1, dielectric properties of the transparency phantom based on carrageenan can be controlled by varying the concentration of sucrose, propylene glycol and KCl mixed in the phantom. We can approximately adjust a value of complex permittivity of transparency phantom to that of muscle at 900[MHz] and 1.5[GHz].

We perform a preliminary exposure experiment using above-mentioned phantom. A dipole antenna is used to irradiate a phantom containing MTLC with RF-EMF at the frequency of 1.439 [GHz]. The temperature distribution, which is indicated by scattering light from red to purple, on the plane lit up by the slit light is obtained clearly. The temperature distributions on other planes are also visualized by moving the slit light location. These observations

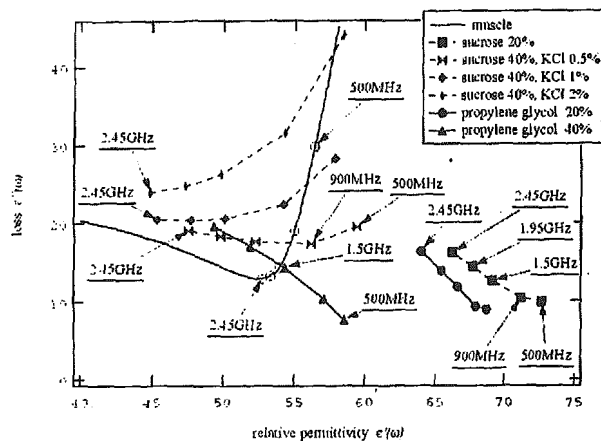


Figure 1: Complex permittivity plots of the dielectric properties for carrageenan phantoms.

suggest the possibility of the 3-D visualization that is reconstructed by measured data at each plane.

### 3. Conclusions

We have proposed a new non-invasive method for visualizing the 3-D distribution of electromagnetic power absorption by using MTLC. The transparency phantom for this method is developed. The substrate material for the phantom is carrageenan. Values of complex permittivity for the phantom can be controlled by the concentration of sucrose, propylene glycol and KCl mixed in it. The electromagnetic power absorption could be visualized by using the phantom. It suggests that this new method has capability to reconstruct the 3-D distribution of power absorption due to RF-EMF.

### References

- [1] M. Miyakawa, S. Hoshina, and Y. Kanai: "Visualization and 3-D measurement of local SAR using a gel phantom". Proc. 1998 IEEE EMC Symposium, Denver, Co., Vol.2, pp. 751-756, 1998.
- [2] Y. B. Du and P. Tong: "Turbulent thermal convection in a cell with ordered rough boundaries", J. Fluid Mech., vol. 407, pp. 57-84, 2000.
- [3] S. Gabriel, R. W. Lau, and C. Gabriel: "The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues", Phys. Med. Biol., 41, pp. 2271-2293, 1996.



## 電磁界の健康リスク評価とWHOの動向 —超低周波電磁界を中心にして—

大久保 千代次\*

### WHO International EMF Project and Health Risk Assessment —ELF Environmental Health Criteria—

Chiyoji OHKUBO\*

#### 1. はじめに

電磁界 (electromagnetic fields; EMF), 分けても 50/60 Hz の商用周波電磁界を含む超低周波 (extremely low frequency; ELF) 電磁界への健康リスク評価で最も重大な問題点は, 疫学研究結果と細胞や動物を用いた生物学的研究結果の乖離である。リスクの存在が疫学研究で示唆される  $0.4 \mu\text{T}$  にあるのか, これまでの生物学的知見から数 mT 以上と考えるのかによって, 今後の商用周波電磁界防護政策が大きく異なる。

国際的に注目される超低周波電磁界曝露による健康リスク評価としては, 1993 年より 6 年掛かりで実施された米国の電磁界ラピッド (EMF-RAPID) 計画 [1] と 1996 年から現在進行中の WHO (世界保健機関) による国際電磁界プロジェクト (WHO International EMF Project) [2] がある。著者は, 国際電磁界プロジェクト事務局に今年 4 月から所属しているが, 2005 年 10 月初旬に低周波電磁界の健康リスク評価を実施するので, プロジェクトの概要とリスクおよびリスク評価の動向について述べたい。

#### 2. 国際電磁界プロジェクト

##### 2.1 世界保健機関 (WHO)

1996 年 WHO は国際電磁界プロジェクトを発足させた。今年で満 10 年に達した。リスク評価の対象とする電磁界は, 商用周波を含む極低周波 (ELF,  $> 0 \sim 300 \text{ Hz}$ ) 電磁界のみならず, 静 (定常;  $0 \text{ Hz}$ ) 電磁界, 中間周波 (IF;  $> 300 \text{ Hz} \sim 10 \text{ MHz}$ ) および無線周波 (RF;  $> 10 \text{ MHz} \sim 300 \text{ GHz}$ ) 電磁界と, 広範囲に及んでいる。

国際電磁界プロジェクトの組織は, 各国政府代表, 共同

研究センターおよび国際機関からなる国際諮問委員会 (International Advisory Committee; IAC) により運営され, その事務局を WHO に置いている。

プロジェクト参加国 (関心国も含む) は, 1996 年発足当初は, クウェート, マレーシア, 英国, ドイツ, インドネシア, ニュージーランド, スロベニア, カナダ, オランダ, スイス, オーストラリア, 日本, フィンランド, スウェーデン, 米国, アイルランド, アラブ首長国連邦の僅か 17 カ国であったが, 2005 年現在 60 カ国以上に及んでいる。以下に国名を示す。アルメニア, オーストラリア, オーストリア, パーレーン, バングラディシュ, ベルギー, ブラジル, ブルガリア, カナダ, 中国, コスタリカ, クロアチア, キューバ, キプロス, チェコ共和国, デンマーク, エクアドル, エジプト, フィンランド, フランス, ドイツ, ギリシャ, 香港, ハンガリー, インドネシア, アイルランド, イスラエル, イタリア, 日本, ヨルダン, ケニア, 韓国, レバノン, クウェート, ルクセンベルグ, マレーシア, マルタ, モロッコ, ナミビア, ノルウェー, ニュージーランド, オマーン, パレスチナ自治政府, フィリピン, ポーランド, ロシア連邦, シンガポール, スロベニア, 南アフリカ, スペイン, スウェーデン, スイス, 台湾, タイ, オランダ, トルコ, アラブ首長国連邦, イギリス, 米国である。

共同研究センターとしては, 英国の健康保護庁放射線防護局 (HPA-RPD, 旧 NRPB), ドイツの放射線防護局 (BS), 米国の食品医薬品局 (FDA; 生命科学部), 環境衛生科学研究所 (NIEHS), 産業衛生研究所 (NIOSH), 空軍ブルックス電波研究所, スウェーデンのカロンスカ研究所, オーストラリア放射線防護・核安全庁 (AEPANSA), カナダのオタワ大学, 日本から国立環境研究所が参加協力している。年内にスペインの対がん協会の参加が承認される予定である。

国際機関としては, 国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP), 国際がん研究機関 (IARC), 国連環境計画

\* 世界保健機関放射線と環境保健ユニット  
Radiation and Environmental Health, World Health Organization

(UNEP), 国際労働機関 (ILO), 国際通信連合 (ITU), 欧州委員会 (EC), 国際電気技術委員会 (IEC), 北大西洋条約機構 (NATO), 電子電気学会 (IEEE) が参加している。

事務局は WHO ジュネーブ本部にあり, その責任者は Dr. Mike Repacholi で, その配下に常勤職員として, Dr. Emilie van Deventer と私が, その他非常勤のセコンドとして英国 HPA の Dr. Rick Sounders, オランダ厚生省の Dr. Eric van Rongen, 米国 UCLA の Dr. Leeka Kheifets が必要に応じて参加している。

国際電磁界プロジェクトの詳細は, ホームページ <http://www.who.int/peh-emf/en/> で読める。ELF-EMF の健康影響については, WHO と ICNIRP の共催で 1997 年にイタリアボロニアで実施した国際セミナー報告書[3]が ICNIRP から出版された。これとは別に ICNIRP が 2003 年, 静電磁界と超低周波電磁界の生物学的影響と健康影響に関するモノグラフ[4]を出版した。このモノグラフが, 今般の ELF-EMF の健康リスク評価を行う際のたたき台となっている。

国際電磁界プロジェクトの中でも重要な健康リスク評価活動の 1 つとして, 1999 年 4 月, フランスのリヨンで国際がん研究機関 (IARC) による電磁界の発がんリスク評価に関する臨時諮問委員会が開催された。委員会では, IARC が, 2001 年に静電磁界および超低周波電磁界に対する発がん性評価を, 2003 年に無線周波電磁界に対する発がん性評価を実施し, WHO が 2002 年に静磁界および超低周波電磁界, 2004 年に無線周波電磁界に対する発がん以外の健康影響を評価し, 最終的には環境保健基準 (Environmental Health Criteria; EHC) を発刊予定することが提案され, 正式に IAC で承認された。しかし, 全体的に作業が遅れ気味で, 2002 年に予定されていた WHO による健康リスク評価が 2005 年 10 月にずれ込んでいる。無線周波電磁界に関する作業も当初の予定から数年は遅れ, IARC による発がん性評価が 2006 年, WHO による健康リスク評価が 2007 年になると予想される。無線周波電磁界の発がん性評価を行うには, IARC 指導の基で行っている携帯電話使用と頭部・頸部がん発生に関する国際的疫学研究 (13 カ国が参加) の結果を待つ必要がある。その取りまとめは遅れている。何事も計画通りには進まない。いずれにせよ, これらのリスク評価が WHO 国際電磁界プロジェクトで最も注目すべき作業であり, その結果は世界各国の電磁界対策に必ず大きな影響を与えることは間違いない。

ELF-EHC 作成のため, WHO は 2002 年 11 月から種々の作業部会を組織し, 先に述べた ICNIRP の 2003 年のモノグラフを参考に, 各作業部会によって EHC の原案が作成されている。なお, この ELF-EHC が対象とする周波数は, 300 Hz 以下ではなく中間周波の一部を含む 100 kHz であることを留意されたい。また, 静電磁界のリスク評価作業は 2004 年末に終え, 近々モノグラフ (EHC) が発刊される予

定である。

2006 年に発行される ELF-EHC の目次案は以下の通りである。

- 1 Summary and Recommendations for Further Study
- 2 Source, Measurements and Exposure
- 3 Internal Dosimetry
- 4 Biophysical Mechanisms
- 5 Neurobehavioural Responses
- 6 Neuroendocrine System
- 7 Neurodegenerative Disorders
- 8 Cardiovascular Disorders
- 9 Immune System and Haematology
- 10 Reproduction and Development
- 11 Cancer
- 12 Health Risk Assessment
- 13 Protective Measures

## 2・2 国際がん研究機関 (IARC)

IARC は 1969 年に発足, 当初は化合物の発がん性評価を行っていたが, その後はたばこ煙などの混合物や, 放射線などの曝露環境, さまざまな労働環境についても評価対象とした。発がん性のリスク評価基準は 1971 年に決められ, 現在の基準は 1995 年に作成されている。

IARC は WHO の下部組織であるが, これまで 900 に及ぶ化学物質, 混合物あるいは曝露環境の発がん性評価に広く使われており, 確立したプロセスを遵守しているという点で価値がある。IARC 方式は, ある作用因子のヒトに対する発がん性の評価という立場から疫学研究結果 (証拠) を重視している。基本的には疫学的証拠に基づいて評価が行われ, これらの証拠は「十分」「限定されている」「不十分」「なし」に分類される。また動物研究における証拠は「十分」「十分とは言えない」「限られている」「不十分」「なし」に分類される。IARC 方式の検討対象になるのは発がん性の疑いがある作用因子であることと, 評価プロセスそのものが保守的であるため, IARC による評価は発がん性の可能性を肯定する結果になる確率が高い。この方法では, 「動物における発がん性はない」という評価が認められるのはグループ 4 のみで, その場合でもヒトにおける発がん性の証拠が不十分であったことが示さなければならない。

IARC の判定基準は敢えて単純化しており, これまでの科学的な証拠 (発がん性) の確かさのみから判断が求められ, 定性的評価を行う。発がん性の強さやそのメカニズムは判定基準の範疇外である。さらには, その判定に伴う規制や立法といった作業は各国の行政府や国際機関に委ねている。

## 2・3 IARC による発がん性評価

上述の如く WHO の国際電磁界プロジェクトの一環として, 2001 年 6 月に静的電磁界および超低周波電磁界に対す

る発がん性評価を実施し、超低周波磁界に発がん性の可能性のある「2B」という結論を出した。

2005年までに、900の発がん性評価がIARCによって実施されている。評価結果は、グループ「1」、「2A」、「2B」、「3」、「4」の5段階に分類されている。グループ「1」（発がん性を示す）が95件、グループ「2A」（恐らく発がん性を示す：probably）が66件、グループ「2B」（発がん性を示す可能性がある：possibly）が241件、グループ「3」（発がん性について分類できない）が497件、グループ「4」（恐らく発がん性を示さない）が1件である。この中に、静電界、静磁界、超低周波電界（いずれも「3」）や超低周波磁界「2B」も含まれている。

この結果は、1998年の米国EMF-RAPID計画のNIEHS作業部会報告書[5]と類似しているが、1998年以降に蓄積された研究結果を踏まえて評価していること、WHOの正式機関が評価したことが重要である。

その詳細が2002年にIARCのMonograph 80巻[6]として刊行された。モノグラフの主要と思われる部分(第5章, Summary of Data Reported and Evaluation)では、

#### 評価

- ・小児白血病に関する超低周波磁界の発がん性について、ヒトの証拠は限定的である。
- ・他の全てのがんに関する超低周波磁界の発がん性について、ヒトの証拠は不十分である。
- ・静電界、静磁界、超低周波電界の発がん性について、ヒトの証拠は不十分である。
- ・超低周波磁界の発がん性について、実験動物の証拠は不十分である。
- ・実験動物の静電界、静磁界、超低周波磁界の発がん性に関連したデータは得られなかった。

#### 総合評価として

- ・超低周波磁界はヒトにとって発がん性があるかもしれない。(グループ「2B」)
- ・静電界、静磁界、超低周波電界はヒトにとっての発がん性に関して分類できない(グループ「3」)

としている。

WHOは、2005年10月にELF-EHCタスク会議を行い、がん以外の健康影響および上述のIARCの発がん性評価以降に実施された日本等の疫学研究や生物学的研究結果等を踏まえて、総合的な評価を行う予定である。

### 3. リスク評価

#### 3.1 リスクとハザード

リスク(risk)とは、経済学・統計学用語で、人間の活動や生存には不測事態による損失ないし災害はつきもので、この場合の不測事態とは、事前に確実にはその生起を予測できないような事象の生起を意味している。そのような不確実にしか予測できない事象の生起によって被る損失

もしくはその可能性(頻度)といった両面性を、リスクと呼んでいる。日本語に相当する言葉がない。

この場合、リスクには、

- ①複雑な自然のメカニズムに対する人知の限界と自然力に対する制御不可能性からくるもの(地震・集中豪雨等)
- ②生体、物質間の相互作用の在り方をはじめとして、事物の因果関係については、我々にとって科学的になお未知部分があるためにおこるもの(新薬の副作用等)
- ③人間的ミス、誤操作等によっておこるもの(医療過誤、パイロットの誤動作による航空事故等)
- ④市場価格、一般大衆の反応といった、人間行動をとりまく社会的環境条件の将来動向を完全には予測しえないことからくるもの(大規模設備投資の失敗等)の諸タイプがある。電磁界の健康リスクは②に該当する。

人間の行動にも常にリスクが存在している。横断歩道を渡っていても自動車事故に巻き込まれるが、その確立はかなり低い。一方、一般道路を時速100kmで自動車を高速運転すれば事故になる確立はかなり高くなる。この場合、自動車を障害性(ハザード; hazard)、自動車を運転することがリスクで、高速運転はハイリスクになる。リスクを避けるには自動車というハザードがあっても運転しなければリスクに繋がらない。電磁界にハザードがあると仮説した場合、電磁界の発生源がハザードで、電磁界曝露がリスクであり、その程度は曝露レベルに依存することになる。

#### 3.2 発がん性物質の健康リスク

大気汚染物質を含め、食品添加物や残留農薬などの発がん性のない化学物質にはこれ以下であればまず安全であるという閾値の存在があることを前提にしている。これを基に一日摂取許容量(acceptable daily intake; ADI)や一日耐容摂取量(tolerable daily intake; TDI)が使用されている。この値は、疫学研究や動物実験で有害性を示さない最大無毒性量(no observed adverse effect level; NOAEL)から、これに安全係数として種差で10分の1と個体差で10分の1を掛け合わせた100分の1を適用している。

一方、発がん性物質や因子やその可能性が疑われる物質や因子には閾値という概念は存在しない。極微量でのその曝露量に見合った影響があると考えられている。従って理論的にはその曝露をゼロにすべきであるが、多くの場合現代生活には不可欠に近い環境因子であることが多い。もし電磁界曝露が発がんの可能性があったとしたら、正にその範疇に入る。我々は電気の利用を中止することはできないのである。そこで電磁界曝露による健康リスクを定量的評価する必要が生じる。この場合、リスクがある一定の確立以下であれば、実質的に安全であると見なし得る曝露量

(実質的安全量, virtual safe dose; VSD) という概念を導入されている。

どの程度の確立であれば実質的安全であるかという判断は、科学の領域ではなく、行政的判断領域である。もちろん国民性も反映するであろう。欧米では生涯の発がんリスクが  $10^{-6} \sim 10^{-5}$  以下を VSD と見なす場合が多い。例えば電磁界曝露の生涯の発がんリスクが  $10^{-6}$  である仮定した場合、ある人間が生涯電磁界曝露を受けた時に発がんする確立が 1,000,000 分の 1、つまり 100 万人に 1 人であることを意味している。これを日本の人口 1 億 2 千 770 万人と平均寿命 80 歳を適用すると、 $1.277 \times 10^8 \times 10^{-6} / 80 = 1.596$  となり、電磁界曝露による 1 年間の過剰発がん患者数は 1.6 人となる。電磁界曝露の生涯の発がんリスクが  $10^{-5}$  である仮定した場合は 16 人となる。これを「高い」あるいは「低い」と判断するか行政的判断が求められることになる。後述するが、米国の EMF-RAPID 計画の最終報告書の試算によれば電磁界曝露による小児白血病の過剰リスクは年間 100 万人あたり 2～6 人の症例増加としている。

2001 年 6 月に IARC が超低周波磁界を「2B」と判定した根拠となる、Ahlbom のプール分析結果[7]を基に、我が国におけるリスクを推定してみると、小児 10 万人あたり年間 3～4 ケース程度で、15 歳未満人口は全国では 2 千万人で、 $0.4 \mu\text{T}$  ( $4 \text{ mG}$ ) 以上の人口を 1%とした場合の人口は、20 万人となる。Ahlbom のプール分析による  $0.4 \mu\text{T}$  ( $4 \text{ mG}$ ) 以上の小児白血病罹患リスクが 2.00 なので、年間の推定過剰リスクは、6～8 人と試算される。この試算はあくまでも超低周波磁界の居住環境曝露と小児白血病発生の関連性が正しいとし、且つ全ての小児白血病が超低周波磁界の居住環境曝露に起因しているとした場合である。しかし、米国の EMF-RAPID 計画の最終報告書の試算では平均で 5%から 15%の小児白血病が ELF-EMF 曝露によって発生すると算出している。なお、試算で  $0.4 \mu\text{T}$  ( $4 \text{ mG}$ ) 以上の人口を 1%としたのは、兜らの報告[8]に基づく。こうした過剰リスク情報についてどのようにコミュニケーションするか、リスクの特性を示す情報を整理する必要がある。

### 3.3 リスク評価

リスク評価には、定性的リスク評価と定量的リスク評価があり、その概念と手順は、

- ①有害性の同定 (hazard identification) : 最も基本的な部分であり、ある環境因子がヒトへの発がん性の有無を判定する。これまで科学的な知見として疫学研究と動物実験研究の成績がレビューされる。一般に、人での影響を示す疫学的知見がある場合には、それを重視しつつ、さらに動物実験によって影響のメカニズムを参考としている。定性的リスク評価であり、米国の EMF-RAPID 計画の NIEHS 作業部会は商用周波磁界を IARC 方式により「2B」と判定し

た。2001 年 WHO 国際電磁界プロジェクトの一環として実施された、IARC の評価でも同様の判定を下した。

- ②量・反応関係 (dose-response relationship) : 電磁界曝露と生体反応との定量的な関係を明らかにする。一部の疫学研究では量・反応関係を示唆する傾向があるものの、ほとんどの疫学結果はこれを否定している。
- ③曝露評価 (exposure assessment) : 人々がどの程度電磁界に曝露されているか評価する。米国では EMF-RAPID 計画の工学研究プログラムでほとんどの国民は時間平均  $0.1 \sim 0.2 \mu\text{T}$  で、 $0.4 \mu\text{T}$  以上は 1%程度であり、量・反応関係を疫学研究で求める際の大きな障害となっている。英国でも同様で 0.4%である。日本で大規模な疫学研究の兜らの報告では、欧米に比べて高曝露である思われていたものの、それ程高くなく 1%である。
- ④リスクの推定 (risk characterization) : ①～③の結果からヒトに対する健康影響の種類やその程度を明らかにすると共に、健康影響 (発がん) の発生確率を推定する。

②以降は定量的リスク評価であるが、現段階では未完成の状況である。米国の EMF-RAPID 計画最終報告書[9]では、「仮に」と断った上でリスク推定を試みているに過ぎない。そのリスク評価試算を紹介する。「いくつかのグループは、ELF-EMF が病気を引き起こすという未証明の仮説に基づいて、総人口における小児白血病のリスク推定を試みている。もしこの仮説が正しいとすれば、信頼区間は 0%を含み、一般に平均で 5%から 15%の小児白血病が ELF-EMF 曝露によって発生するという算出結果が示唆される。この仮説に基づき、最新のデータといくつかの異なる分析方法を用いて我々自身が評価したところ、これらの値とは異ならなかった。米国において 15 歳以下で白血病を患うリスクは約 0.05% (5/1 万人) である。この値から ELF-EMF による小児白血病の生涯リスクは、10 万人に 2.5～7.5 人である。年ベースでは、この条件付きリスクは生涯リスクに比べて約 15 倍小さく、年間 100 万人あたり 2～6 人の症例増加となる。」としている。

先に述べた Ahlbom のプール分析結果を踏まえたリスク評価は、その試みの一例である。

電磁界リスクはダイオキシンや環境ホルモンと同様の一国だけで解決できない環境リスクであり、最終的には国際的な合意形成が必要である。そういう意味でも WHO の国際電磁界プロジェクトは重要といえる。WHO による健康リスク評価作業で、「2B」の判定をどう位置づけるか、その動向が注目されている。

- 3.4 電磁界の健康リスク評価への理論形成と予防原則  
リスク分析は 3 つの主要な要素を含んでいる。すなわ

ち、リスク評価、リスク管理、リスクコミュニケーションである。リスク評価を実施するためには、ハザードの同定、曝露量と反応関係、曝露量評価が不可欠である。しかし、これまでに述べた如く、ハザードの同定は、IARCによる発がん性評価で電磁界曝露と小児白血病発生との関連性を示唆する疫学研究のプール分析から「2B」としたものの、量・反応関係は認められず、曝露量も何を指標にして評価するか議論が多い。よって、健康リスク評価への理論形成は極めて困難である。そこに、予防原則という概念の導入がWHOでも検討されてきた。予防原則は、リスク管理での選択肢の1つである。計測されたリスクと一般人が認知するリスクの両方を視野に入れた主として政策立案者のためのツールであるが、これが電磁界の健康リスク管理の選択肢に位置づけされると、産業界にも大きな影響を与える。

予防原則のもととなる国際的な概念は、1992年のリオ宣言原則15における「予防的アプローチ; precautionary approach」[10]と言える。そこでは「環境を保護するため、各国はそれぞれの能力に応じて予防的アプローチを広く講じなければならない。重大または不可逆の損害が生じる恐れがある場合には、十分な科学的確実性がないことを理由に、コスト対影響に優れた方策を講じて環境悪化を防止することを引き延ばしてはならない」との環境政策における「予防」の考え方を示している。

なお、予防原則に関する明確な定義は、団体や論者により異なり、「予防的アプローチ」と具体的に如何なる点が異なるかについての定説はない。2001年5月にWHOの欧州地域事務局が開催して「予防的政策および健康の保護：その原則と適用」と題するワークショップ報告書でも、定義が明確でないこと。“Precautionary principle”, “precautionary measures”, “prudent avoidance”, “precautionary approach”等々、似たような概念が整理されておらず、また国によって受けとめられ方が違うことからさまざまな問題点を指摘している。欧州環境機関は2004年「予防原則とは、科学的な複雑性、不確実性、無知が存在しており、健康や環境にとって重大または不可逆の脅威が生じる可能性を回避または低減するためには、確固たる危険の証拠が得られる前に方策を講じる必要が存在する場合において、適切なレベルの科学的証拠を利用すると共に、方策および何もしないことの双方について想定しえる利害を考慮した上で公共政策方策を講じるためのフレームワーク、手順、政策ツールを提供するものである」としている。

WHOは、2003年2月24日～26日ルクセンブルグで電磁界の健康リスクに対する予防原則適用の適否を検討するワークショップを開催した。背景には、科学者が認知する疫学研究で示唆される電磁界の健康リスクと、一般人のそれとの間に相当な差がある事から、公衆の電磁界の健康リスクに懸念が拡大している事、電磁界の健康リスクに科学

的にも不確実性が存在する事、全世界の人々が電磁界に曝露されている事などが考えられる。ワークショップ報告書では、①予防原則について共通の枠組みに到達すること。②この枠組みを、電磁界への曝露による人の健康影響に適用すること。特に、ELFとRF電磁界についての2つのケーススタディを展開すること。③ELFとRF電磁界へのリスク管理アプローチを勧告することであった。

しかし、その後予防原則という言葉が独り歩きするのを避ける意味から、2005年7月に開催された同様の会議では、予防的政策 (precautionary policy) という言葉の使用を止め、公衆衛生政策 (public health policy) とした。

予防原則を導入することがすぐに電磁界曝露の低減政策の提唱に連結するように受け取られるが、WHOの目標は予防原則に基づく意思決定のための枠組みを構築することであり、費用・便益分析の結果としての公衆衛生政策は、必ずしも更なる規制になるとは限らず、何もしないことも予防原則における1つの選択肢であることを念頭に入れる必要がある。先に示したELF-EHCの13章のProtective Measuresに関して、個人的見解であるが、ELFのケーススタディから導かれる公衆衛生政策として、疫学研究結果で示唆される $0.4 \mu\text{T}$ を提唱するような結論には至らないと思われる。

## 文 献

1. The Electric and Magnetic Fields (EMF) Research and Public Information Dissemination (RAPID) Program, <<http://www.niehs.nih.gov/emfrapid/home.htm>> [accessed August 2, 2005].
2. The WHO International EMF Project, <<http://www.who.int/peh-emf/en/>> [accessed August 2, 2005].
3. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Biological Effects of Static and ELF Electric and Magnetic Fields. ICNIRP, Munich, Germany, ISBN 3-9804789-03-9, 1997.
4. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Exposure to Static and Low Frequency Electromagnetic Fields, Biological Effects and Health Consequences (0-100 kHz). ICNIRP, Munich, Germany, ISBN 3-934994-03-2, 2003.
5. Poitier CJ, et al. eds, Assessment of Health Effects from Exposure to Power-line Frequency Electric and Magnetic Fields—NIHESH Working Group Report. NIH Publication No.98-3981. Research Triangle Park: National Institute of Environmental Health Sciences, 1998.
6. International Agency for Research on Cancer: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields. IARC Monograph on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 80. Lyon International Agency for Research on Cancer, 2002.
7. Ahlbom A, Day N, Feychting M, Roman E, Skinner J, Dockerty J, Linet M, McBride M, Michaelis J, Olsen JH, Tynes T, Verkasalo PK: A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia. Br J Cancer. 83: 692-698, 2000.
8. Kabuto M, et al.: A Japanese case-control study of child-

hood leukaemia and residential power-frequency magnetic fields. Int J Cancer. 2005 (in press).

9. Olden K: National Institute of Environmental Health Sciences Report on health effects from exposure to power-line frequency electric and magnetic fields. NIH Publication No.99-4493. Research Triangle Park: National Institute of Environmental Health Sciences, 1999.
10. Rio Declaration on Environment and Development (Principle 15), The United Nations Conference on Environment and Development, at Rio de Janeiro, 1992.

大久保 千代次 (オオクボ チヨジ)

1968年東京薬科大学卒業。2005年3月国立保健医療科学院(旧国立公衆衛生院)生活環境部長を定年退職,4月よりWHO勤務。専門は公衆衛生学および微小循環学。研究テーマは嘗ては喫煙の生理的・病態生理的影響,現在は電磁界の生体影響と健康リスク。



所属学会:日本微小循環学会,日本バイオレオロジー学会等。1996年よりWHO国際電磁界プロジェクト国際諮問委員会日本政府代表委員。

## 携帯電話の生体安全性

多氣 昌生\*・渡辺 聡一\*\*・和氣加奈子\*\*

### Biological Effects and Safety of Exposures to Radiofrequency Electromagnetic Fields from Mobile Communications

Masao TAKI,\* Soichi WATANABE,\*\* Kanako WAKE\*\*

#### 1. はじめに

携帯電話をはじめとする無線通信が日常生活に欠かせない身近な存在となった。これにともない、生活環境で常時電波に曝されることによる健康への悪影響の可能性に対する関心が高まっている。

高周波電磁界の生体作用については古くから研究され、曝露による健康影響を防ぐための防護指針が示されている[1-3]。また、この防護指針にしたがって、職場や一般環境における人体曝露が規制されている。一方、微弱なマイクロ波が健康に悪影響をおよぼすかもしれないという不安を抱く人々があり、防護指針で許容されているレベル以下の曝露でも、健康に悪影響があるのではないか、という懐疑的な意見が根強く存在している。

本稿では、携帯電話の電波による健康影響について、研究体制と研究手法の進歩により信頼性の高くなった最近の研究の動向について紹介する。

#### 2. 携帯電話のシステム

第一世代の携帯電話はFM変調によるアナログ方式であった。周波数は800 MHz帯または900 MHz帯が主で、多くは0.6 Wの出力であった。FM変調された連続波であり、平均電力はピーク電力に等しい。現在、わが国ではデジタル方式に完全に移行しており、アナログ方式は使われていない。

わが国では1993年に第2世代の携帯電話としてPDC (personal digital cellular) 規格のデジタル方式が導入された。1994年春に、それまでの保証金を預託して端末をレ

ンタルする方式を改め、端末売り切り方式が採用されたのを契機に、わが国の携帯電話の契約数が飛躍的に増加した。また、800 MHz帯の他に、1.5 GHz帯の利用が始まった。

PDC規格では、時分割多元接続(TDMA)を用いており、1つのチャンネルに対し、3スロットの通話信号を時分割で伝送する。持続時間6.7 msのパルス波を50 Hzで繰り返す波形である。したがって、平均電力はピーク電力の1/3となる。端末のピーク電力は、最大で0.8 Wである。基地局との通信状態に応じて、6レベルの電力制御が行われ、最小のピーク電力は8 mWである。通話が混み合う場合には、送信パルスの間隔をさらに2倍として、1つの周波数チャンネルを6つの通話信号が共用するハーフレートとなる。

欧州では、第2世代のGSM規格のシステムが広く使われている。GSM規格は、フレーム周波数217 Hzで、8スロットの通話を伝送するTDMA方式である。800 MHz帯のGSM携帯電話の最大のピーク電力は2 Wで、電力制御により最小では2 mWとなる。平均電力はピーク電力の1/8である。GSM規格は世界中の多くの国に導入されている。欧州のシステムでは、800 MHz帯が主であるが、1,800 MHz帯も用いられ、通話の混雑に応じて基地局により切り替えられる。

米国では第2世代として、IS54並びにIS136規格で規定されたTDMA方式が普及した。わが国のPDC規格と同様に、フレーム周波数50 Hz、チャンネル当りのスロット数は3である。米国では、第2世代として符号分割多元接続(CDMA)方式(IS95規格)も導入されている。第2世代のCDMA方式は韓国でも広く使用され、また、わが国でも一部のオペレータが採用している。

最近では、第3世代の携帯電話の導入が各国で進んでいる。第2世代までと比べて国際標準化が進んでいるが、それでも異なる方式がある。いずれもCDMA方式に分類される。周波数は2 GHz帯が使われる。CDMA方式では、

\* 首都大学東京

Tokyo Metropolitan University

\*\* 情報通信研究機構

National Institute of Information and Communications Technology

波形が広帯域の疑似ランダム波形であり、ほぼ連続波となる。但し、欧州で用いられている UMTS TDD では、同じ周波数をアップリンクとダウンリンクが時分割で用いるので、断続した波形となる。一般に、基地局からのダウンリンクの電波は、複数の周波数チャネルの電波が同時に放射されるので、端末からのアップリンクの波形とは異なる。

携帯電話による電波の波形はこのようにさまざまである。生体影響が熱作用だけであれば、周波数による吸収特性の違いを考慮すれば、波形による違いを考慮する必要がなく、実効値だけが問題となる。一方、非熱的な生体作用があるかもしれないと仮定する場合、波形の違いも無視できないことに注意が必要である。

### 3. 曝露の実態と防護指針

携帯電話で用いられる電波による人体曝露は、端末からの曝露と基地局からの曝露に大別される。

携帯電話端末からの曝露は、電力の総量は小さいが、側頭部に集中する局所曝露である。局所での電力吸収は局所 SAR で定量される。SAR (specific absorption rate) は、単位質量の組織での吸収電力であり、比吸収率とも呼ばれる。公衆に対する防護指針では、10 g の組織で平均した局所 SAR を 2 W/kg 以下とするように制限している [1, 3]。わが国を含め、多くの国では携帯電話端末による頭部の局所 SAR が防護指針値以下となるように規制されている。

基地局からの電波は、遠方から全身を曝露する。全身曝露の場合、全身平均 SAR が熱作用の指標であるが、電力密度も比較的良好な指標になる。わが国の公衆に適用される防護指針値は、800 MHz において 0.53 mW/cm<sup>2</sup> であり、1.5 GHz 以上では 1 mW/cm<sup>2</sup> である [2]。これは、全身平均 SAR が 0.08 W/kg を超えない条件に相当する。基地局には複数の送信装置が設置されるが、アンテナからの出力は合計で数 10 W 以下である。これは、放送施設に比べると非常に小さい。アンテナには指向性があり、地上における電力密度は、公衆に対する防護指針の 1,000 分の 1 以下である。また、アンテナの正面でも数 m 離れば、防護指針値以下となる。

このように、携帯電話端末による SAR の値は、日常経験する曝露としてはかなり大きなものであるが、防護指針による規制の範囲内である。基地局からの曝露は非常に小さい。

### 4. 電磁界ドシメトリ

#### 4.1 意義

電磁界の生体影響を正しく評価するためには、作用部位での電界、磁界、発熱量、温度などの条件を正確に知る必要がある。このための評価を電磁界ドシメトリという。ドシメトリとは、放射線の線量や薬剤の投与量を表す "dose" と、測定法をあらわす "-metry" からなる用語である。

高周波電磁界と生体 (個体および細胞試料など) のカップリングは複雑であり、電磁気学的に正しく評価しなければ誤った実験結果を導く危険がある。実際に、曝露条件の統制が不十分な実験で再現性に疑問の残る事例は多い。このため、電磁界ドシメトリの重要性への認識が高まっている。高周波電磁界の生体作用では熱作用が支配的であるため、発熱量に相当する SAR の大きさや分布が評価対象となる。

人体は損失のある誘電体であり、電磁界中に置かれると複雑な散乱電磁界が生じる。特に入射電磁界の波長が人体各部の大きさと同程度であると、共振現象など、複雑な散乱が生じる。また、人体各部の SAR は、生体組織の電気的性質の不均質と、散乱波の干渉により非常に複雑に分布する。さらに、携帯電話端末使用時のように波源と人体が近接する場合は、人体と波源の電磁気的な結合 (放射インピーダンスの変化) も考慮しなければならない。

#### 4.2 方法

電磁界ドシメトリには理論的並びに実験的なさまざまなアプローチがある。高周波電磁界ドシメトリのための電磁界解析では、Maxwell の方程式を厳密に解く必要がある。1970 年代に初めて人体の共振が議論された頃のアプローチは解析的な方法であった。しかし、人体のように極端に偏長な散乱体を解析的な方法で扱うには限界があり、コンピュータの高速・大容量化とともに、数値的な方法が積極的に用いられるようになった。

時間領域の数値解析法である、有限差分時間領域 (finite-difference time-domain; FDTD) 法 [4] は、高周波の電磁界ドシメトリに特に有効な数値解析法として、90 年代以降に広く使用されるようになった。FDTD 法では、マクスウェルの方程式の微分形を差分化することで、計算領域中の電磁界を逐次的に計算する。要素数に対する計算量の増加が線形のため、多くの要素数を扱えること、任意形状の不均一モデルを利用できることが利点である。このことから、最近ではミリメートルオーダの空間分解能を有する解剖学的構造を考慮した全身人体モデル [5] にも適用されている。このようなモデルをボクセルモデルと呼ぶ。任意姿勢に変

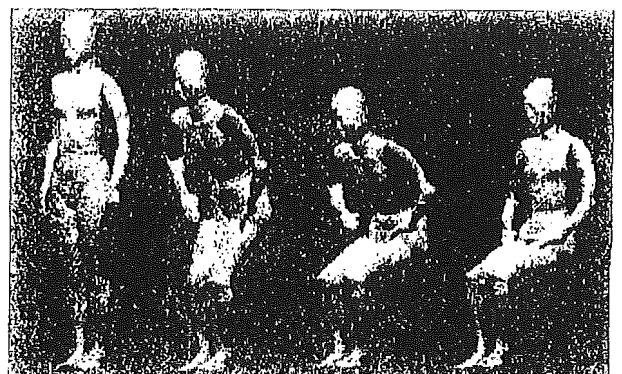


図 1 任意姿勢数値人体モデル (女性) [6]



形する機能（図1）など、ボクセルモデルの高機能化についての研究も進められている[6].

実験的にSARを測定する方法としては、挿入プローブを用いて測定した散乱体内部の電界強度の大きさからSARを推定する方法[7]と、吸収電力による発熱を温度上昇から測定してSARを推定する方法[8]が主に用いられる。いずれの方法も、散乱体内部での測定が必要であり、実際の生体を対象にすることはできない。このため、電気定数を生体と等価になるように調製した電磁ファントムが用いられる。

4.3 携帯電話のドシメトリ

携帯電話の生体影響を考察するためには、どの部位にど

の程度の曝露が生じるかを定量的に知る必要がある。図2は、人体頭部の数値モデルを用いて、FDTD法により携帯電話使用時の頭部内のSAR分布を計算した例である。表皮効果のために、周波数が高いほどSARが表面付近に集中する。図3は、防護指針の定義による最大局所SARに対して脳組織に生じるSARがどの程度の大きさになるかを数値計算から推定した結果である。脳組織で最大局所SARの10%以上の体積が占める割合は、900 MHzで7%、1.5 GHzで2%、2 GHzで1%である[9]。すなわち、脳組織におけるSARはアンテナ近傍の一部分を除いて非常に小さいことがわかる。細胞・動物実験の曝露条件の設定や、疫学研究を進める上で、このような定量的な理解が重要で

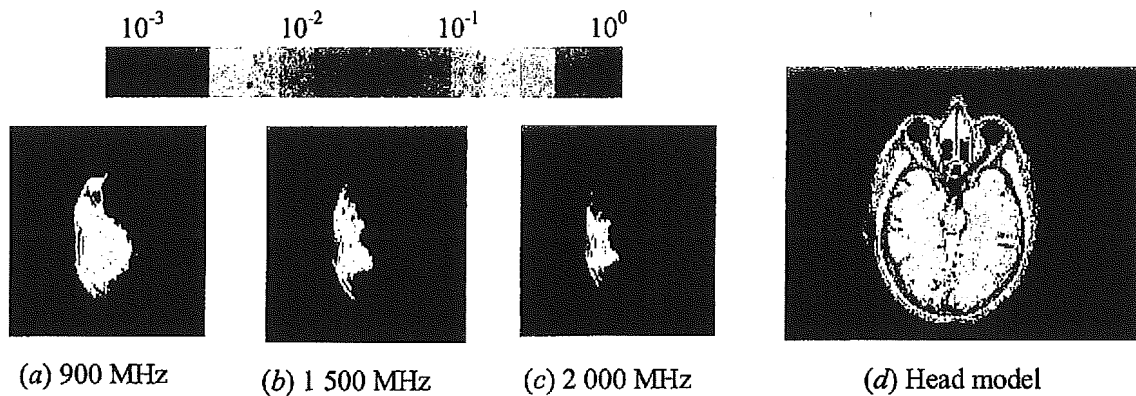


図2 携帯電話による頭部内SARの分布

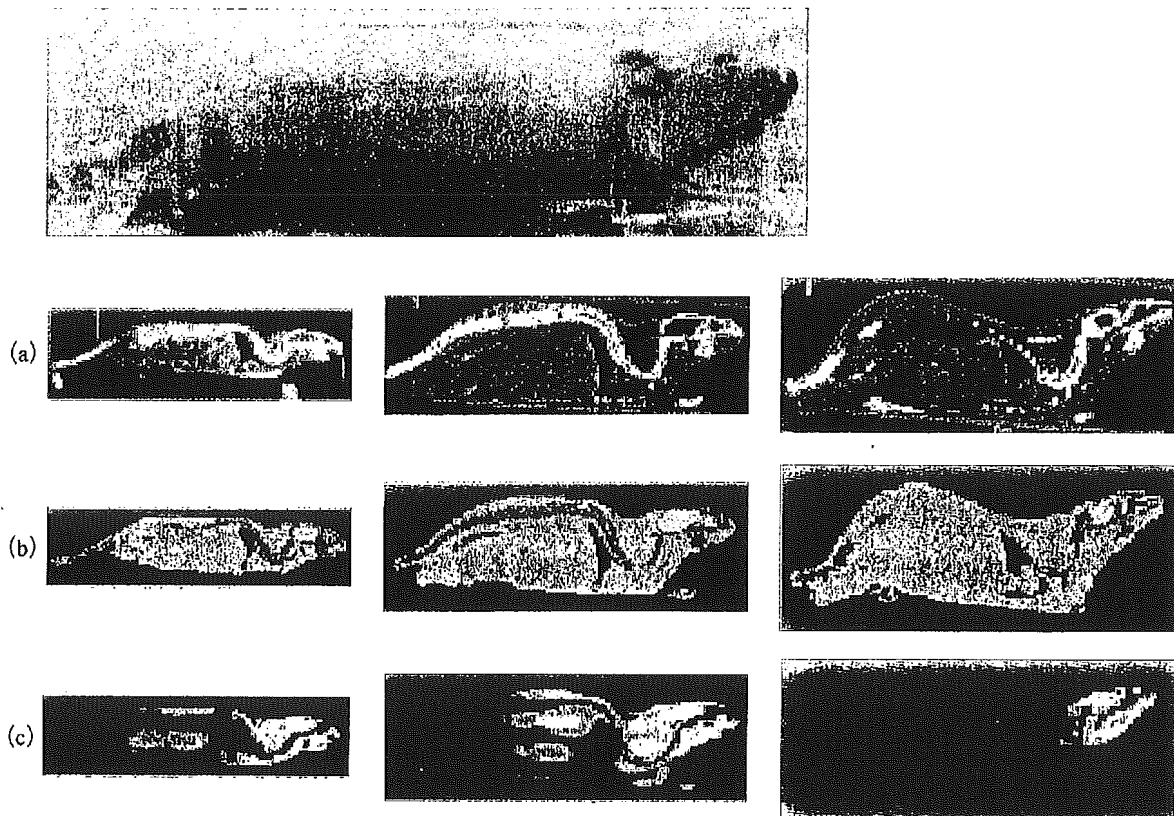


図4 脳腫瘍についての長期曝露実験用曝露装置と数値電磁界ドシメトリの例  
(a) X線CT画像, (b) 数値モデル, (c) SAR分布の数値計算結果.

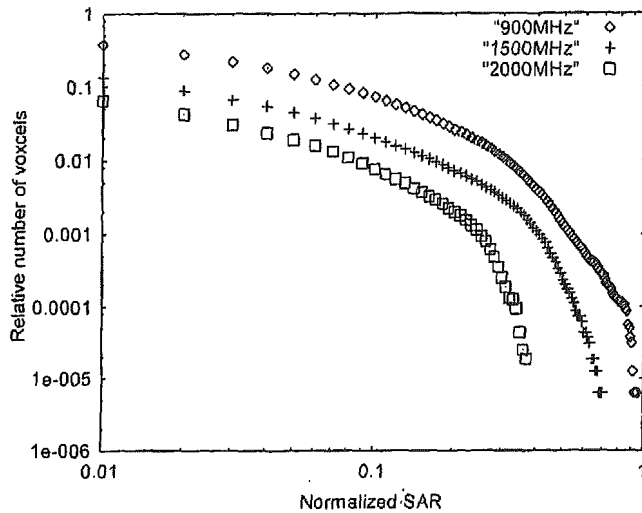


図3 相対 SAR 値 (最大 SAR で正規化) に対する脳組織内の累積ボクセル数

ある。

ドシメトリは実験用の曝露装置の設計・評価でも欠かせない[10]。図4は、名古屋市立大学で実施したラットの脳腫瘍に関する長期曝露実験[11]に使用した曝露装置とドシメトリの一例である。長期曝露実験では実験動物の大きさが成長ともななって変化する、成長段階の異なるラットを用いて X 線 CT 画像から数値モデルを構築し、数値的に SAR を推定する。人体頭部は携帯電話によって極めてわずかの部分しか曝露されないが、実験動物はアンテナに比べて十分に大きいとはいえないため、比較的広い範囲が曝露される。このような違いを定量的に把握する必要がある。また、このような考察を通して人体の曝露条件に近い曝露方法を工夫することが必要である。

## 5. 生体影響に関する最近の研究動向

初期の研究では、曝露の有無による実験動物の反応の違いを観察する程度であり、また実験の曝露条件の統制は十分でなかった。1970年代後半から、電磁界ドシメトリの重要性が認識されるようになった。しかし、1980年代までは、一部の研究を除いて、曝露条件の統制などの品質に問題があって、再現性のない実験報告が少なくなかった。

1990年代以降、電磁界ドシメトリの技術が進歩し、実験の曝露条件が高精度に評価されるようになった。これによって実験の品質が向上した。特に1996年に世界保健機関(WHO)が国際電磁界プロジェクトを組織し、実験の品質に対して厳格な評価を行うようになってから、その進歩が著しい。また、WHOのプロジェクトでは、それまでは重視されていなかった再現実験の価値を高く評価しているため、実験の品質管理がさらに向上した。この10年間に実施された研究の多くは、医学生物学と工学の密接な協力、曝露評価の徹底、再現実験の重視というアプローチによって、それ以前の研究に比べて格段に信頼性が高まってい

る。

わが国でも、1997年に郵政省が生体電磁環境研究推進委員会(委員長 上野照剛東大教授)を設置し、医学分野と工学分野の密接な協力体制のもとで、WHOのプロジェクトをはじめとする国際プログラムと協調しながら優先度の高い研究を計画的に実施している。次節以降で述べる最近のわが国での研究は、いずれもこの研究プログラムのもとで実施された研究である。

携帯電話の生体安全性の確認を目的とした研究では、多くの研究資金が投入され、大規模な疫学研究や長期発がん性試験などを含む多数の研究が行われている。以下では、これらの研究を中心に、最近の動向を述べる。

## 6. 細胞・動物実験

### 6.1 発がん性

健康影響が問題視される時に、発がんリスクとの関連に最も関心が集まる。1997年にRepacholiらが、携帯電話で用いられる電波(900 MHz)をリンパ腫の実験モデルであるトランスジェニックマウス(E $\mu$ -Pim1)に18カ月間慢性曝露することにより、リンパ腫の発症が2.4倍に増加することを報告した[12]。RepacholiはWHOによる国際電磁界プロジェクトの責任者であり、この研究報告は、電波による発がん性(プロモーション)を示唆した唯一の信頼性の高い研究として注目された。しかし、注意深く実施された実験であっても、曝露評価の精度、実験終了時に生存動物の検査を行わなかったこと、実験動物の選定の適否と観察期間の妥当性など、いくつかの問題点が指摘された。このため、オーストラリアと欧州(イタリア)で実験方法を改善した再現実験が実施された。

Repacholiらの実験では、無拘束のマウスをケージ内で曝露したため、実験動物の全身平均SARが0.008~4.2 W/kgの範囲で不確定であった。これに対しオーストラリアでの再現実験では、曝露時にマウスをシリンダ内に固定することによって曝露を一定に保った。また、曝露レベルを4レベル(0.25, 1, 2, 4 W/kg, 各群120匹)とし、トランスジェニックマウスの他に正常動物も試験に加えた。このようにして実施された実験の結果、曝露によるリンパ腫の増加は再現しなかった[13]。一方、欧州での再現実験はイタリアで行われたが、2005年夏現在、結果は未公表である。

携帯電話機の使用による脳腫瘍への影響を直接のターゲットとした大規模な研究として、Adeyらによる2つの研究がある。これらの研究は2年間の長期曝露実験であり、自然発生およびENU(N-ethylnitrosourea)でイニシエートされた脳腫瘍の発症を観察している。最初の実験では、米国のIS54規格のTDMA波形(837 MHz)が用いられた[14]。頭部への曝露は22カ月間(2時間/日、7.5分オン・7.5分オフ、4日/週)続けられた。脳でのSARはラット

の成長とともに変化し、0.7～1.6 W/kg、全身平均 SAR は 0.2～0.7 W/kg であった。実験動物数は 4 群で計 236 匹であった。実験の結果、自然発生の脳腫瘍も、ENU で誘発された脳腫瘍も曝露によって増加しなかった。他方は 837 MHz のアナログ変調方式の波形が用いられた[15]。対象としたラット数は 6 群で計 520 匹であった。実験結果では曝露群と偽曝露群で脳腫瘍発生数に差が見られなかった。

わが国でも発がん性についての動物実験が行われた。初期の研究として、ジエチルニトロソアミン (DEN) で誘導したラット肝中期発がん性試験 (曝露期間 6 週間) が実施された[16, 17]。曝露期間が短い、この実験では曝露開始から 1 週後に 2/3 肝切除を行うことと、腫瘍マーカーの使用により、発がん性の検出感度を高めている。実験は、800 MHz 帯と 1.5 GHz 帯の PDC 規格の波形を用い、2 W/kg (肝臓での平均 SAR) を週 5 日、90 分間曝露した。2 つの周波数帯で独立に実験が行われたが、いずれの実験でも、曝露による肝臓癌の促進は見られなかった。

脳腫瘍の促進についての長期曝露実験も行われた[11]。実験方法は Adey らの研究とほぼ同じであり、日本で使用されている 1.5 GHz 帯 (1.439 GHz) の PDC 規格の電波を用いた。曝露装置は図 4 の装置である。この実験では、計 500 匹の F344 ラットが用いられた。各群は雌雄各 50 匹であり、無処置対照群、ENU 処置のみの群、ENU 処置に加えて、偽曝露、低レベル曝露および高レベル曝露の電磁界照射を施す群とした。低レベル照射は脳平均 SAR が 0.67 W/kg で、高レベル照射は脳平均 SAR が 2.0 W/kg であった。SAR の値は時間平均値で、ピーク値はそれぞれの 3 倍である。出生 5 週目から 90 分間/日、週 5 日の曝露を 104 週間継続した。実験の結果、体重、食餌摂取、生存率に群間で差が見られなかった。脳腫瘍および脊髄腫瘍の発症に差はなく、また腫瘍の種類にも差がなかった。

発がん性に関する動物実験は他にも数多く行われた。Elder は、中・長期曝露による発がん性に関する動物実験の査読付き論文 30 報を精査した[18]。ほとんどが携帯電話からの電波を模擬した波形を用い、曝露の強さは 0.25 W/kg から 4 W/kg の範囲である。Repacholi らの報告の後 (1998 年以降) に刊行された論文は 21 報であり、内 10 報が 18～24 カ月の長期曝露実験である。自然発がんへの影響に関する長期曝露実験 6 報、Repacholi らの実験と類似の遺伝的な修飾を受けた実験動物を用いた長期曝露実験 3 報、化学物質で誘導されたがんの促進作用についての長期曝露実験 7 報を含め、いずれの結果も発がん促進への影響を認めていない。これらの結果を総合すると、動物実験からは発がんリスクは示唆されないといえる。

## 6.2 遺伝毒性

動物実験で発がん性試験を実施することは時間、費用の点で容易ではない。また、発がんの初期過程として、遺伝子レベルの傷害性の有無が評価されていることが必要であ

る。このため、DNA 鎖の切断や染色体への影響あるいはその代用指標としての小核形成などが調べられてきた。多くの研究があるが、影響が示唆されても結局は再現しない、という経過をたどっている。その典型的な事例を以下に紹介する。

Lai と Singh は、マイクロ波曝露がラット脳細胞の DNA の 1 本鎖切断および 2 本鎖切断を増加させることを報告した[19, 20]。実験では、in vivo で SD ラットを 2.45 GHz の連続波またはパルス波に曝露し、脳組織から標本を採取した。DNA 鎖切断はアルカリコメットアッセイ法で評価された。SAR は全身平均値で 0.6 W/kg で、脳では 0.5～2 W/kg と推定されている。

Tice らは、ヒトの白血球およびリンパ球を 837 MHz の FM 変調波、TDMA 波、CDMA 波などの携帯電話で使用される波形に 1～10 W/kg で曝露した。その結果、コメットアッセイ法による DNA 鎖の切断は見いださなかったが、10 W/kg の強度で 24 時間曝露した時に、全ての波形で小核の形成を認めた。5 W/kg、24 時間曝露では、一部の波形でのみ小核の形成が見られた。曝露時間が 3 時間の時はいずれの波形、曝露強度でも小核形成は見られなかった[21]。その後、d'Ambrosio さんも GSM で使われる信号波形を用いて、5 W/kg の曝露によりヒトリンパ球で小核形成が見られたことを報告した[22]。

DNA 鎖切断と、小核形成を示唆するこれらの報告は、携帯電話端末で生じる程度のマイクロ波曝露による遺伝毒性を示唆する結果として非常に注目され、多くの研究グループが再現実験を試みた。

Malyapa らは、一連の in vitro 実験 (最大で 1.7 W/kg、24 時間曝露) で、コメットアッセイ法による DNA 鎖切断が見られなかったことを報告した[23]。また Lai らの実験をできるだけ忠実に再現する実験も試みたが、影響は再現しなかった[24]。

McNamee らは、ヒト白血球を一定温度に保った条件で 1.9 GHz の連続波に 0, 0.1, 0.26, 0.92, 2.4, 10 W/kg で 2 時間曝露し遺伝毒性を調べた。コメットアッセイ法では DNA 鎖切断が検出されず、小核形成頻度にも曝露による差が見られなかった[25]。曝露時間を 24 時間とした実験でも、やはり曝露による差は見られなかった[26]。

Lagroye らは、2.45 GHz のパルスマイクロ波を SD ラットに照射し、コメットアッセイ法により DNA 鎖切断を評価した。SAR は 1.2 W/kg である。これらは Lai らが DNA 鎖切断の存在を報告した時の条件と類似である。この実験でも DNA の切断は見られなかった[27]。

わが国でも、宮越ら (2003) がヒトの脳腫瘍由来の MO54 細胞を用いて in vitro でコメットアッセイ法による DNA 鎖切断を調べた。周波数 2.45 GHz の連続波で、13, 25, 39, 50, 78, 100 W/kg で曝露したが、最大の SAR でも DNA 鎖の切断は見られなかった[28]。Koyama らは (CHO)-K1

細胞を用いて、2.45 GHz, 18 時間のマイクロ波照射による小核形成頻度を調べた[29]. 曝露強度は、前述の実験と共通である。SAR が 50 W/kg までの曝露では、小核形成頻度は偽曝露群と有意差がなかった。これに対し、78 W/kg および 100 W/kg では小核形成頻度が増加した。一方、39 °C の高温環境で 18 時間培養した時にも小核形成頻度は増加した。78 および 100 W/kg では 39 °C 程度までの温度上昇があった。これらの結果から、携帯電話で生じる SAR の 25 倍以上に相当する 50 W/kg でも小核形成の増加はなく、39 °C 程度まで温度が上昇すると小核形成の増加が見られることが示された。

これらの一連の研究報告から、著しい温度上昇がなければ、細胞レベルでの遺伝毒性を示唆する研究結果は再現しない可能性が高いことが示される。

### 6.3 血液脳関門

血液脳関門 (blood-brain barrier, BBB) は、脳組織に必要な物質のみを選択的に透過させる機能であり、この機能により、脳神経近傍の環境が一定に保たれている。強いマイクロ波によって温度が上昇すると血液脳関門の透過性が高まることが知られている。

Salford らは、温度上昇のない弱い電波の照射でも血液脳関門の透過性が高くなることを報告した[30]. 携帯電話の使用により血液脳関門の透過性が高まれば、頭痛などの症状や他の疾患の原因となる恐れがあるため、この結果が注目された。

Fritze らは、GSM 規格の波形をラットの頭部に照射した実験から、脳での SAR が 3.5 W/kg 以下では影響がなく、Salford らの報告が再現しないことを報告した。但し、7.5 W/kg を超えるとやや影響が見られるとした[31]. この値は、局所 SAR についての一般公衆の指針値よりは高いが、管理環境 (職業曝露) の指針値より低い。このため、わが国でもさらに研究がなされた。その結果、温度上昇に留意すれば 7.5 W/kg でも影響が見られないことが示された[32].

Salford らはその後、0.02 および 0.2 W/kg という携帯電話で生じるより小さな SAR で血液脳関門をアルブミンが透過することを報告し、さらに、神経細胞の損傷を示す「ダークニューロン」の頻度が曝露の大きさに依存して増えると報告した[33]. 他にも、査読された論文は未刊行であるが、ボルドー大学のグループが類似の結果[34]を報告した例があり、また、核磁気共鳴装置の磁界曝露の影響によって血液脳関門の透過性が増加したという報告もある[35]. 血液脳関門への影響は、携帯電話機による健康リスクを評価する上で重要な問題であるとの認識から、2003 年 11 月にこの問題を集中的に扱うワークショップが開催された。主催した欧州の研究プログラム COST281 では、その時の記録を公開している (<http://www.cost281.org/>)。Leszczynski らは、ヒト内皮細胞を *in vitro* で携帯電話の

曝露と同程度の強さで曝露し、熱ショックタンパク 27 の発現を報告している。著者らはこのタンパクの発現が血液脳関門の透過性の増加に結びつく可能性を指摘している[36]. しかし、最近の Miyakoshi らの報告では、この現象は再現されていない[37].

### 6.4 学習

学習への影響については、Lai らが DNA 鎖切断の時と同条件のマイクロ波曝露によってラットの放射状迷路学習の能力を低下させること[38], また水中迷路学習での学習能力が低下すること[39]を報告して注目されたが、その後の研究は影響を再現していない。

Dubreuil らは、ラットの頭部局所曝露が空間学習および非空間学習に及ぼす影響を調べた[40]. 周波数 2.45 GHz の GSM 規格の波形を用い、頭部における SAR が 1 W/kg および 3.5 W/kg となる強さで、45 分間局所曝露した。空間学習は放射状迷路学習で、非空間学習は物体認識タスクを組み込んだ。その結果、これらの学習能力に影響は見られなかった。Cobb らは、円形導波管内で、Lai らと同じ 2  $\mu$ s のパルス幅で、パルス頻度 500 pps の 2.45 GHz のマイクロ波をラットに照射し、12 本の放射状迷路を用いた学習実験を行ったが、この研究でも影響は見られなかった[41].

わが国でも Yamaguchi らが 1,439 MHz の PDC 規格のマイクロ波をモノポールアンテナにより頭部に集中して曝露し、T 型迷路テストでの学習への影響を調べた。脳での平均 SAR は 7.5 W/kg (全身平均 SAR = 1.7 W/kg), および 25 W/kg (同, 5.7 W/kg) で 1 回 45 分間の曝露を 4 日間行った。25 W/kg の場合は学習が低下したが、明らかに熱の影響であった。7.5 W/kg およびそれ以下では、学習に影響がなかった[42]. これらの結果は、学習への影響についての Lai らの報告が再現しないことを示している。

## 7. ボランティア実験

### 7.1 不定愁訴と「電磁波過敏症」

携帯電話の使用にともなう頭痛や不眠、記憶力の低下など、さまざまな症状の訴えがある。こうした症状の原因が、携帯電話の電波による直接的な生体作用によるものかどうかを明らかにするため、ボランティアを被験者とした研究が行われている。

携帯電話に対して過敏症状を訴えるボランティア 20 名に、欧州のアナログ、およびデジタル (GSM) 方式の電波による電波を照射または偽照射して、曝露と症状の関連性の調査が行われた[43]. 被験者からはさまざまな主観的訴えがあった。しかし、症状の発生は照射の有無に無関係であった。また、照射と偽照射の違いを言い当てたものはいなかった。この研究報告は、携帯電話による電磁波過敏症が電磁波によるものではなく、電磁波に対する不安感に起因する主観的なものであることを強く示唆している。