

## 5-3 生体電磁環境における医学・生物学的研究への取組

### 5-3 *Development of Exposure Systems and Exposure Assessment for Studies on Biological Effect of Electromagnetic Fields*

和氣加奈子 花澤理宏 長岡智明 ポンパイブーン ポーンアノン  
河井寛記 渡辺聡一

WAKE Kanako, HANAZAWA Masahiro, NAGAOKA Tomoaki, PONGPAIBOOL Pornanong, KAWAI Hiroki, and WATANABE Soichi

#### 要旨

電磁界ばく露の生体影響を調べるため、ラットの頭部局所ばく露、家兎眼ばく露、人感受性実験、ミリ波温熱知覚実験及び疫学研究等様々な研究が行われている。これらの研究に対するばく露装置の開発やばく露評価結果をまとめた。

There have been several biological studies to test possibilities of biological effects of electromagnetic fields. In this paper, development of exposure systems and exposure assessment for the studies on biological effects of electromagnetic field are introduced.

#### [キーワード]

電磁界, SAR, ばく露, 生体影響

Electromagnetic field, SAR, Exposure, Biological effect

## 1 まえがき

近年、電磁界にさらされることによる生体影響に関心が高まっている。そのため様々な研究が行われている。世界保健機関(WHO)は電磁界ばく露の生体影響を調べるために国際電磁界プロジェクトを発足させ、必要とされる研究課題の提言等を行っている[1]。我が国でも総務省が生体電磁環境研究推進委員会を設け、種々な研究の推進を行っている[2]。

生物ばく露実験を行うためには、所望のばく露を実現するためのばく露装置の開発や実際のばく露を高精度に定量化するためのばく露評価が必須である。生体 EMC グループでは、総務省生体電磁環境研究推進委員会が推進されている研究に対して、ばく露装置の開発及びばく露評価といった工学的な観点で参加している。本報告では、電磁界の生体影響を調べるための取組を紹介する。

## 2 ラットの頭部ばく露実験

ラットは様々な化学物質等の安全性評価試験でしばしば用いられる実験動物である。これまでに、人が携帯電話を使用する場合を模擬したラット脳への電磁界の局所ばく露実験が幾つか行われている。しかし、ラットは人と比べて体長が短く携帯電話等で用いられるマイクロ波帯の波長と同程度なため、脳への局所的なばく露は難しいことが知られている。ばく露の局所化の度合いは、比吸収率(Specific Absorption Rate: SAR)を用い、脳などの標的組織で平均された SAR 値と全身平均 SAR の比によって示されることが多い。すなわち、この比が大きいほど局所的なばく露が実現できていると判断できる。

### 2.1 モノポールアンテナを用いた装置

図 1(a)に示すラット頭部ばく露装置は、小さ

なばく露暗箱と 1/4 波長モノポールアンテナで構成される [3]。アンテナには 1.5 GHz 帯の日本独自の携帯電話通信システムである Personal Digital Cellular (PDC) 方式の信号が供給される。複数のラットをプラスチックホルダーに固定し、頭部がアンテナに向くように放射状に配置することで頭部への局所的なばく露を実現している。このタイプのばく露装置を用いて血液脳関門の透過性への影響 [4]、学習への影響 [5]、免疫系及びホルモン分泌への影響 [6] [7]、脳微小循環動態への影響 [8] [9] 等が調べられた。その結果、いずれも現行の防護指針レベルのばく露において明らかな影響は観察されなかった。

この装置を用いてばく露されたラット内の SAR は当初、麻酔により筋肉が弛緩した平坦な形状の数値ラットモデルを用いて評価された。実際の動物実験では無麻酔の状態であり、平坦でない形状をしているため、実際のばく露時と同じ形状のラットの CT 画像を取得し、それを基に作製したラットモデルを用いた SAR 評価も行われている。配置した動物数やアンテナとの位置関係は実験により異なる。図 1 (b) にラット内の SAR 分布計算例、図 1 (c) に各実験条件におけるアンテナ入力 1W の場合の脳平均 SAR を示す。グラ

ドとラットの距離はほとんどの場合 21 mm で、case3 のみ 9 mm に設定されている。図 1 (d) に脳への局所ばく露の指標となる脳平均 SAR と全身平均 SAR の比を示す。脳平均 SAR と全身平均 SAR の比は 3.5–6.5 の範囲であった。

上述のばく露装置では、標的組織である脳だけでなく顎部分でも比較的強い SAR が確認された。そこで、アンテナ給電部を底面から天井部分へ変更し、ラットの配置も天井付近とすることで、給電部を標的組織である脳に近づけ脳への局所ばく露の改善を図った [10]。図 2 (a) に改良したばく露装置を示す。この装置は、数百匹のラット頭部に 1.5 GHz 帯 PDC 信号を 2 年間ばく露し脳腫瘍発生への影響を調べる長期大規模ばく露実験に用いられた [11]。

2 年の実験期間にラットは 100 g 以下から 400 g 以上に体重が増加し、体型も変化する。そこで 2 年間、所望の脳平均 SAR で安定したばく露を行うため、三つの異なる大きさのラットモデル (126, 263, 359 g) を作成し、それらを用いて様々なサイズのラットの SAR 評価を行った。図 2 (b) にアンテナ入力電力を 1W と固定したときの脳平均 SAR と全身平均 SAR を示す。脳平均 SAR と全身平均 SAR の比は 2.7–7.0 と計算され

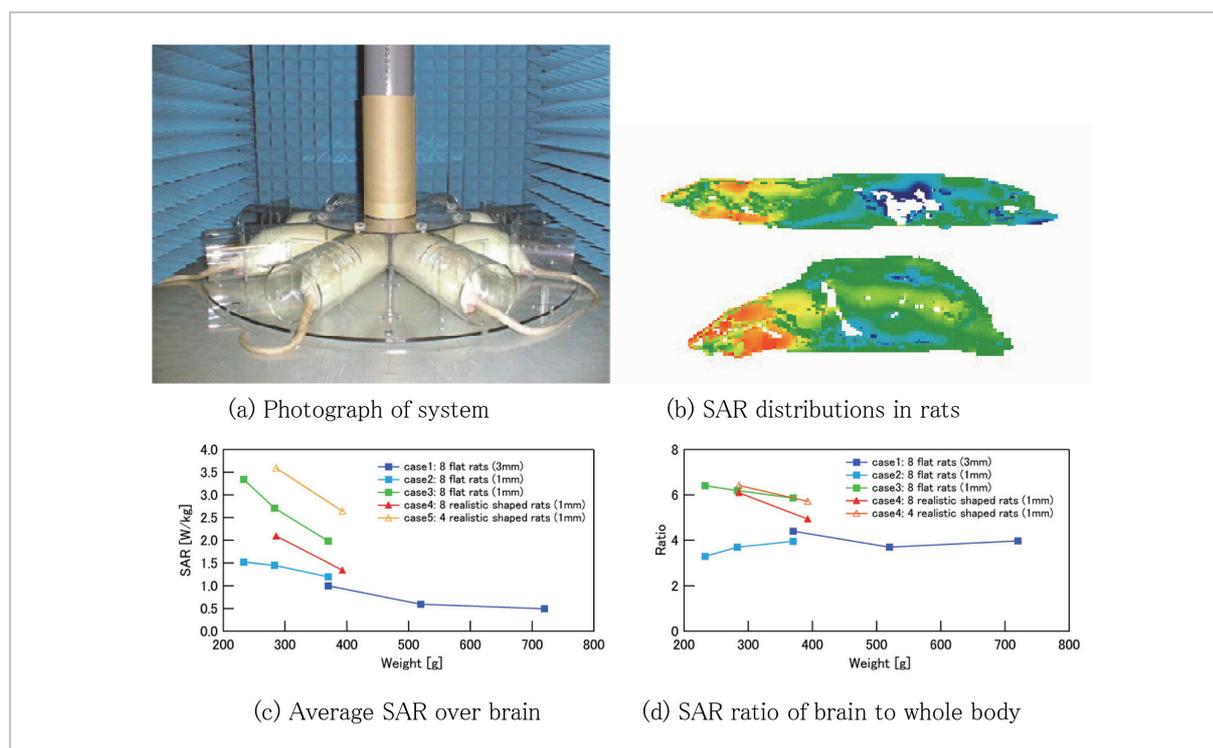


図 1 1/4 波長モノポールアンテナを用いたばく露システム

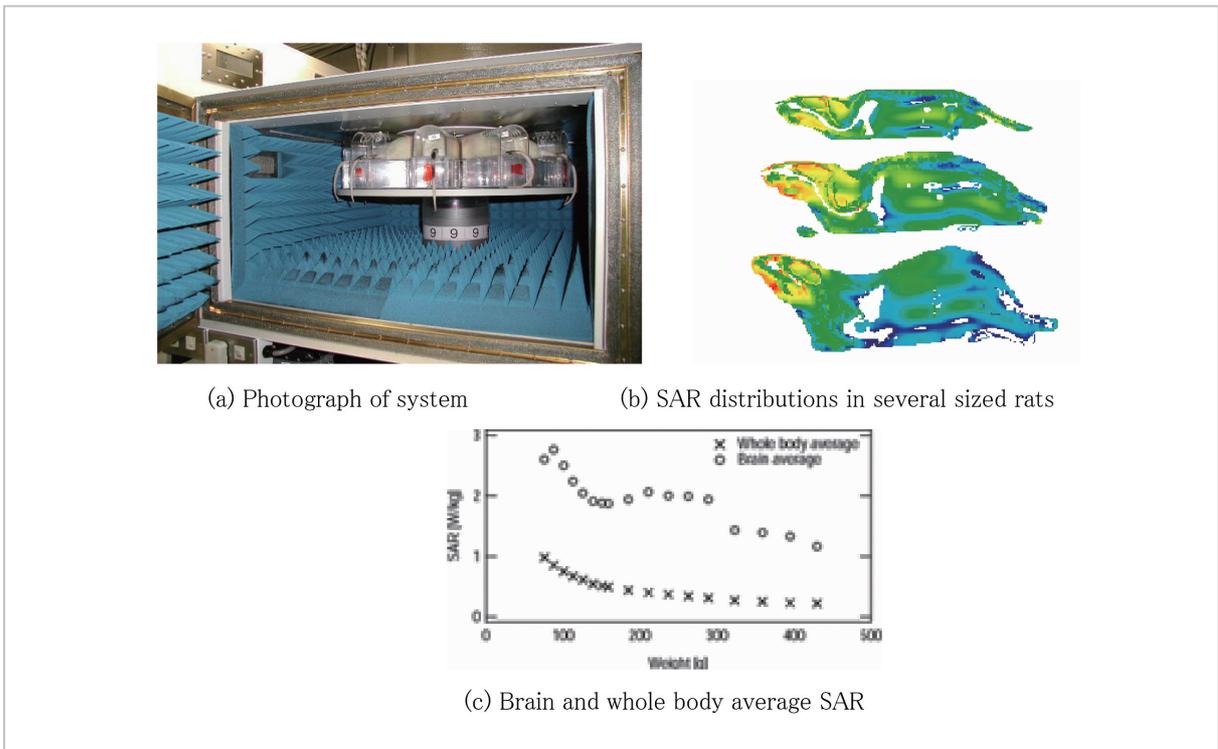


図2 長期大規模動物実験用ばく露システム

た。この脳腫瘍発がん試験では合計 300 匹のラットに毎日 90 分ばく露を行うため、同じばく露装置を 10 台用意し同時に 100 匹のばく露を可能とした。各アンテナ入力電力は Personal Computer (PC) を用いて制御及び記録された。同様のばく露装置の開発及び生物実験が 2 GHz 帯 Wideband Code Division Multiple Access (W-CDMA) 信号を用いても行われている [12]。

## 2.2 ループアンテナを用いた装置

人が携帯電話を使用している際の局所的なばく露を実験動物で模擬する場合、前節で述べたばく露装置では頭部への局所ばく露が必ずしも十分ではなく、より頭部への局所的なばく露が必要とされる。そこで我々は、より局所的なばく露を可能とするループアンテナを用いたばく露装置を開発した [13] - [15]。

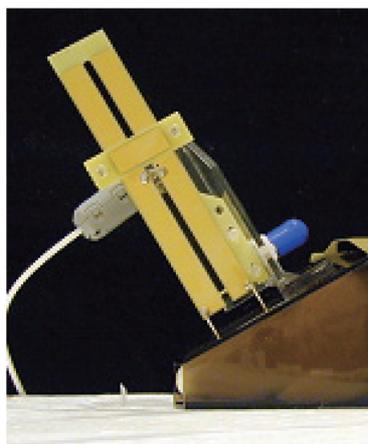
図 3(a) 及び (b) にループアンテナを用いたばく露システム例を示す。ループアンテナを用いたばく露装置では、個々のラットにそれぞれアンテナが必要なため、数 100 匹の実験動物を使用する大規模な実験には向かないというデメリットがあるものの、SAR の局所性が以前のものに比べて改

善されている。図 3(b) に示す 8 の字ループアンテナシステムでは、アンテナの隙間からラット頭部に装着されたクラニアルウィンドウを通して生体影響観察を随時行うことが可能であり、これまで調べることのできなかつたばく露時のみにあるかもしれない可逆的な生体影響の観察も可能となっている [16]。本ばく露装置でばく露した際の 4, 8, 12 週齢のラットにおける SAR 分布計算例を図 3(c) に示す。観察領域であるクラニアルウィンドウ直下の脳を標的組織とした場合、標的組織と全身の SAR の比は 30 以上と計算された。同様のばく露装置は幼児期での生体影響評価のために、1, 2, 3 週齢のラットに対しても用いられる予定である。

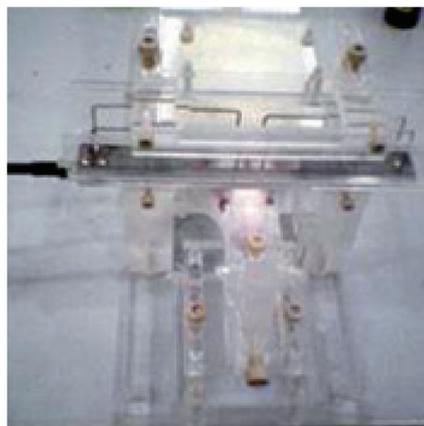
## 3 家兎の眼球ばく露実験

眼球は血流がないことと体表に位置していることから、電磁界ばく露の影響を受けやすい器官といわれている。そこでマイクロ波及びミリ波ばく露による家兎眼への影響が調べられている [17][18]。

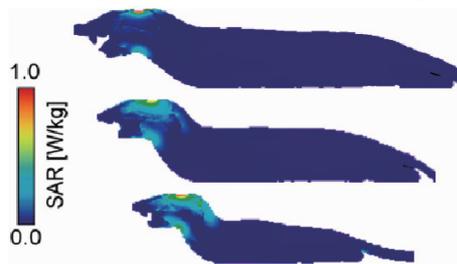
図 4(a) に家兎眼に 2.45 GHz のマイクロ波をばく露するための装置を示す [19]。内部に低損失の



(a) Loop antenna with matching plate



(b) 8-shaped loop antenna



(c) SAR distributions in rats

図3 ループアンテナを用いたばく露システム

誘電体を充填することで小型化した同軸導波管変換器をアンテナとして用いた。本装置では信号発生器を切り替えることで、連続波及びパルス波を発生させることが可能である。X線CT画像を基に開発された家兎数値モデルを用いた解析により、 $300 \text{ mW/cm}^2$  の入射電界強度のばく露を行った場合のばく露眼平均 SAR は  $100 \text{ W/kg}$  と計算された。ばく露眼平均 SAR と全身平均 SAR の比は 60 であった。

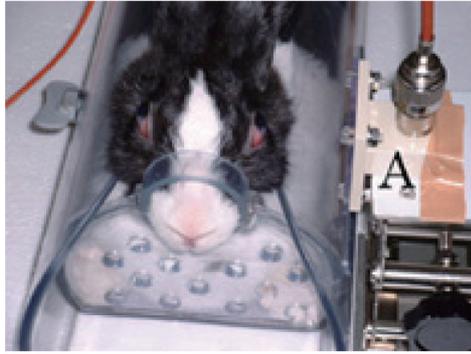
図 4 (b) に家兎眼に 60 GHz のミリ波をばく露するための装置を示す。本装置ではレンズアンテナを用いることで眼球部分にのみミリ波が照射される [20]。2 種類のレンズアンテナを使い分けることで、半径 6, 10 mm という二つの照射面積での実験が可能である。

## 4 ボランティア実験

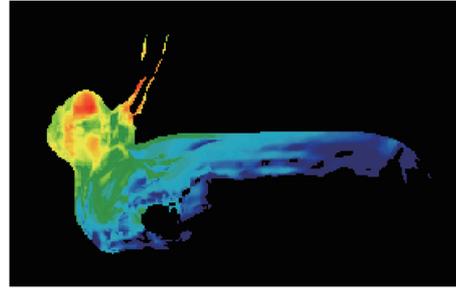
### 4.1 感受性実験のためのばく露装置

携帯電話の基地局や端末から発射される電磁界

は電波防護指針を越えることはない。しかし、この程度の防護指針値を下回る電磁界の存在を感じ、健康障害を訴える電磁界過敏症 (Electromagnetic Hypersensitivity, EHS) についての近年研究が進められている。TNO (Netherlands Organization for Applied Scientific Research) では、過敏症の症状を申告したグループと一般的な健常者にある特定の電磁界ばく露を行い、心理学的手法による反応時間テスト、認知テスト及び精神的な安寧 (あんねい) の状態に関して有意な差を一部報告している [21]。これを受けて日本でも、W-CDMA 方式の電磁界ばく露が及ぼす影響を心理学的及び生理学的に検討し、人が電波防護指針値以下の低レベル電磁界を感じるかどうかについて、客観的な証拠を収集することを目的とした感受性実験が進行中である [22]。我々は感受性実験のためのばく露装置の開発を行った [23]。図 5 にばく露システムの概要を示す。本ばく露システムは、人体に W-CDMA 方式の携帯電話基地局からの電磁界を照射するためのも



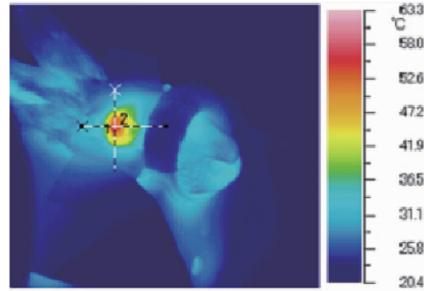
(a) Microwave exposure system



(b) SAR distribution at the surface



(c) Millimeter-wave exposure system



(d) Temperature distribution at the surface

図4 家兎眼ばく露システム

のであり、ばく露量の精密な制御及び過剰なばく露を防止するための安全設計が必要とされる。ばく露は専用のシールドルーム内で行い、信号の制御は別室で行う。被験者は3 mの距離に配置されたダブルリッジガイドホーンアンテナから放射される電磁界にさらされる。アンテナ入力電力やシールドルーム内の電界強度はモニターされ、所望のばく露になるようにフィードバックがかけられる。また本システムでは、実験の安全な遂行のため、専用のソフトウェア上であらかじめ設定し

た上限値を超える場合には警告及びばく露の自動的な終了等の安全装置を備えている。

#### 4.2 ミリ波の温熱知覚実験

ミリ波帯の利用は、ITS や近距離大容量データ伝送等に幅広く拡大していくことが予想されている[24]。ミリ波帯では温熱知覚が電波防護指針の根拠として用いられている。しかし、温熱知覚の実験データは遠赤外線とマイクロ波帯で主に得られており、肝心のミリ波帯における実験データが必ずしも十分でないため、ミリ波帯電波にさらされた人体における温熱知覚の閾値を評価する実験が行われている[25]。図6に温熱知覚実験のためのばく露システムを示す。60 GHz帯ミリ波発信器(3W級)を使用して、被験者の背中・前腕・上腕の各部位にミリ波を照射する。入射電力密度・照射面積・照射時間等による温熱知覚閾値との関係が調べられている。

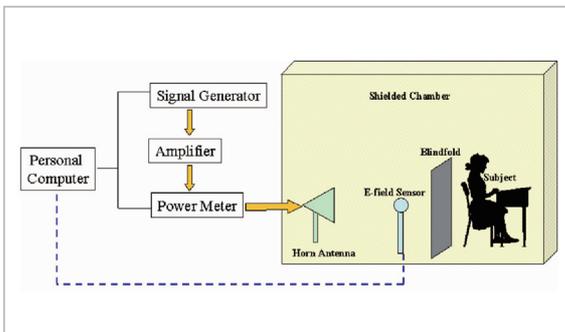


図5 感受性実験のためのばく露システム



Millimeter-wave Incidence

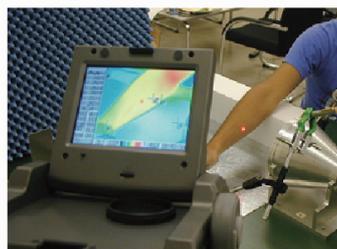


図6 温熱知覚実験のためのばく露システム

## 5 疫学研究

世界保健機関 (WHO) の諮問機関である国際癌研究機構 (IARC) の主導により世界 13 개국共同で携帯電話の使用と脳腫瘍の関係を調べる疫学研究 (International Case Control Study of Tumors of the Brain and Salivary Glands、INTERPHONE Study) が進められており、日本もこれに参加している。これらの疫学研究では、ばく露の指標として携帯電話の使用の有無や使用時間だけでなく、SAR が用いられている。携帯電話からの電波ばく露により頭部に生じる SAR が脳腫瘍の発生と関連付けられる生物学的な根拠はないが、SAR は電波の非熱作用を検証するための生物実験等でもしばしば用いられているためである。さらに、脳腫瘍との関係を調べるに当たっては、脳腫瘍が発生した部位での SAR が重要となる。

携帯電話によるばく露は、様々な要因に左右される。例えば、ばく露時間 (使用時間)、パワーや波形などのシステムの違い、頭部内での SAR の空間分布、携帯端末による SAR 分布の違いなどがあげられる。我々はこれまで、携帯電話端末か

らの出力レベルを逐次記憶する専用端末を用いた様々な条件下での携帯電話端末のパワーレベル特性評価、頭部内での SAR 分布を用いた端末の分類、携帯電話適合性試験等による限られた領域の SAR データより現実的な人体頭部モデル内 3 次元 SAR 分布の推定方法を検討した [26] - [28]。図 7 (a) に専用端末を用いた通話時のパワーレベル測定例、図 7 (b) に端末の SAR 分布に関する特徴を用いて主成分分析を行った際の主成分得点分布図を示す。また、図 7 (c) に適合性試験による限られた領域の SAR データより推定した人体頭部モデル内 SAR 分布図を示す。

## 6 まとめ

電磁界の生体影響を調べるために総務省生体電磁環境研究推進委員会 [2] で推進されている研究のためのばく露装置の開発及びばく露評価例を幾つか紹介した。生体 EMC グループでは生体電磁環境における医学・生物学的研究への取組を通して、電波防護指針の妥当性の確認及びその根拠となる知見の収集に努めている。

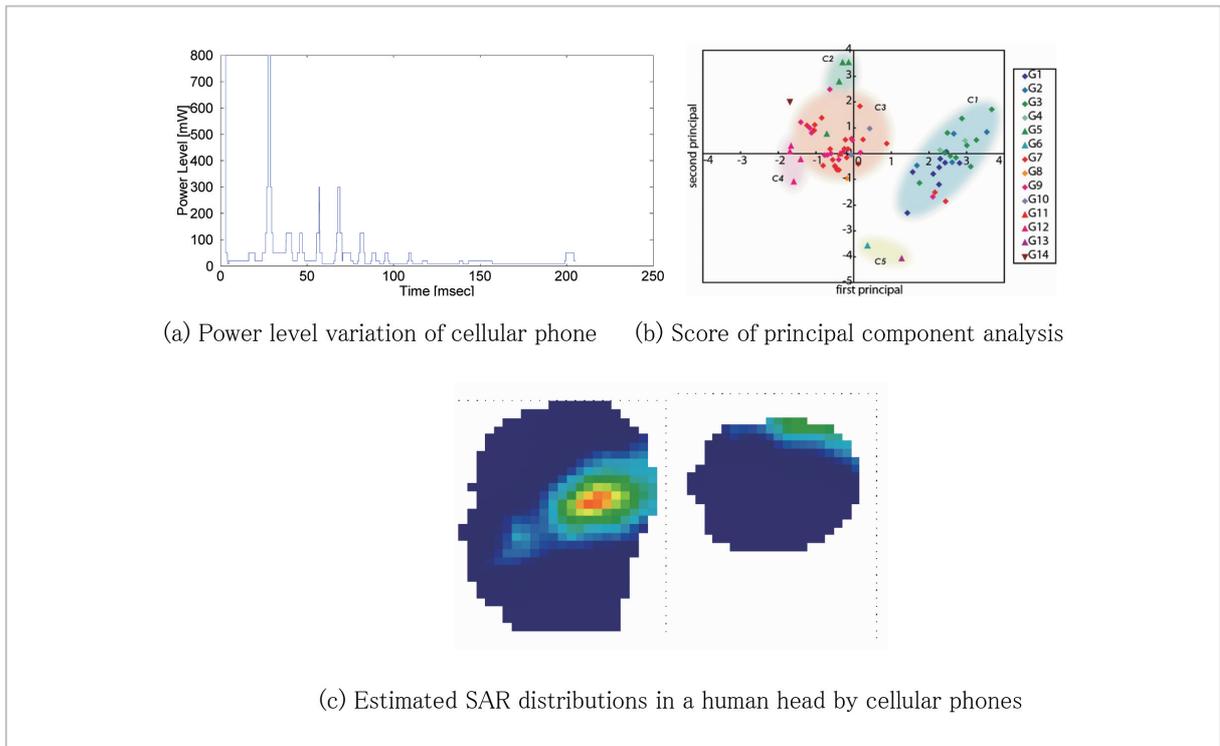


図7 疫学研究のためのばく露評価

参考文献

- 1 <http://spinspace.com/biophysics/wfoemf.htm>.
- 2 <http://www.tele.soumu.go.jp/j/ele/body/comm/index.htm>
- 3 S.Watanabe et al., "A microwave exposure setup for the heads of Sprague-Dawley rats", XXXVIth General Assembly of the International Union of Radio Science, p.863, 1999.
- 4 G.Tsurita et al., "Biological and Morphological effects on the brain after exposure of rats to a 1439 MHz TDMA field", Bioelectromagnetics, Vol.21, pp.364-371, 2000.
- 5 H.Yamaguchi et al., "1439 MHz pulsed TDMA fields affect performance of rats in a T-maze task only when body temperature is elevated", Bioelectromagnetics, Vol.24, pp.223-230, 2003.
- 6 K.Hata et al., "Short term exposure to 1439 MHz pulsed TDMA fields dose not alter melatonin synthesis in Rats", Bioelectromagnetics, Vol.26, pp.49-53, 2005.
- 7 H.Yamashita et al., "Short-term exposure to 1439-MHz TDMA signal dose not have the estrogen-like activity in rats", 27th Annual Meeting of Bioelectromagnetics, pp.178-179, 2005.
- 8 H.Masuda et al., "Acute effects of local exposure to radio-frequency electromagnetic fields on the cerebral microcirculation in rats", 23rd Annual Meeting of Bioelectromagnetics, pp.139-140, 2001.
- 9 H.Masuda et al., "Sub-chronic effects of local exposure to radio-frequency electromagnetic fields on the cerebral microcirculation in rats", 24th Annual Meeting of Bioelectromagnetics, pp.30-31, 2002.

- 10 S.Watanabe et al., "Microwave exposure setup for a long-term in vivo study", Proc. of 2000 International Symposium on Antennas and Propagation, Vol.1, pp.225-228, 2000.
- 11 T.Shirai et al., "Chronics exposure to a 1.439 GH electromagnetic field used for cellular phones dose not promote n-ethylNitrosourea induced central nervous system tumors in F344 rats", Bioelectromagnetics, Vol.26, pp.59-68, 2005.
- 12 T.Shirai et al., "Review of Japanese in vivo studies on brain tumor carcinogenesis of cellular phones", 27th Annual Meeting of Bioelectromagnetics, p.507, 2005.
- 13 K.Wake et al., "Small loop antennas for localized head exposure setups of rats", AP-RASC, p.275, 2001.
- 14 H.Watanabe et al., "Dosimetry of rat-head SAR caused by a high-performance 8-shaped loop antenna", 26th Annual Meeting of Bioelectromagnetics, pp. 52-53, 2004.
- 15 H.Watanabe et al., "Dosimetry of rat-head SAR caused by a high-performance 8-shaped applicator", Proc. ISAP'04, pp.801-804, 2004.
- 16 H.Masuda et al., "Real-time measurement of brain microcirculation during RF-EMF exposure using an 8-shaped loop antenna", 27th Annual Meeting of Bioelectromagnetics, pp.170-171, 2005.
- 17 M.Kojima et al., "Influence of anesthesia on ocular effects and temperature in rabbit eyes exposed to microwaves", Bioelectromagnetics, Vol.25, pp.228-233, 2004.
- 18 M.Kojima et al., "Experimental setup to investigate ocular changes induced by millimeter-wave exposure", 27th Annual Meeting of Bioelectromagnetics, pp.433-434, 2005.
- 19 K.Wake et al., "Localized exposure system of 2.45 GHz microwave to the rabbit eye", XXVIIth General Assembly of International Union of Radio Science, KA.P.6, 2002.
- 20 M.Hanazawa et al., "Antenna measurement for millimeter-wave exposure setup", 27th Annual Meeting of Bioelectromagnetics, pp.266-268, 2005.
- 21 A.P.M.Zwamborn et al., "Effects of grobal communication system radio-frequency fields on well being and cognitive functions of human subjects with and without subjective complaints", FEL-03-C148, TNO Physics and Electronic Laboratory, 2003.
- 22 Y.Ugawa et al., "Studies on hypersensitivity to non-thermal radiofrequency electromagnetic field in Japan", 27th Annual Meeting of Bioelectromagnetics, pp.24-25, 2005.
- 23 K.Wake et al., "System of Human Exposure to Radio-Frequency Fields of Cellular Base-Station for Studies on Electromagnetic Hypersensitivity in Japan", 27th Annual Meeting of Bioelectromagnetics, pp.308-309, 2005.
- 24 [http://www.soumu.go.jp/joho\\_tsusin/pressrelease/japanese/housou/000421j703.html](http://www.soumu.go.jp/joho_tsusin/pressrelease/japanese/housou/000421j703.html)
- 25 T.Konno et al., "A study of warmth sensation produced by millimeter wave expsure", XXVIIIth General Assembly of International Union of Radio Science, K01.3, 2005.
- 26 和氣ほか, "携帯電話端末のパワーレベル評価—Variation of power level of cellular phone—", 電子情報通信学会総合大会, p363, 2005.
- 27 K.Wake et al., "Statistical analysis of SAR distributions in human head nearby cellular phone devices", 27th Annual Meeting of the Bioelectromagnetics Society, p.227, 2003.
- 28 K.Wake et al., "Estimation of 3D SAR distributions from mobile phone compliance testing data for the local exposure assessment in epidemiological study", XXVIIIth General Assembly of International Union of Radio Science, KAE.5, 2005.



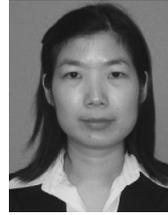
わけか なこ  
**和氣加奈子**  
無線通信部門生体 EMC グループ主任  
研究員 博士 (工学)  
生体電磁環境



はなざわまさひろ  
**花澤理宏**  
無線通信部門生体 EMC グループ専攻  
研究員 博士 (工学)  
ばく露装置開発、誘電率測定



ながおかともあき  
**長岡智明**  
無線通信部門生体 EMC グループ専攻  
研究員 博士 (医科学)  
数値モデルの高精度・高機能化、医用  
画像解析



**ボンパイブーン ポンアノン**  
無線通信部門生体 EMC グループ専攻  
研究員 博士 (工学)  
数値計算を用いた電波曝露評価技術



かわいひろき  
**河井寛記**  
無線通信部門生体 EMC グループ専攻  
研究員 博士 (工学)  
生体 EMC



わたなべそういち  
**渡辺聡一**  
無線通信部門生体 EMC グループリー  
ダー 博士 (工学)  
生体電磁環境