

## 特集「電磁場の健康影響 — 最近の動向」

(臨床環境21: 161~170, 2012)

**総 説****ヒトの中樞神経への影響：  
人での携帯電話による電磁場曝露実験より**

宇 川 義 一

福島県立医大神経内科

**The influence of mobile phone use on the human nervous system: EMF exposure experiments in humans**

Yoshikazu Ugawa

Department of Neurology, Faculty of Medicine, Fukushima Medical University

**要約**

我々がこれまで行って、携帯電話または基地局アンテナを模倣した曝露装置での電磁場曝露のヒトの中樞神経に対する影響の実験結果をまとめて概説した。

聴覚脳幹誘発電位、体性感覚誘発電位、運動誘発電位とも、一発刺激の反応も2連発刺激でのGABA作動性抑制性介在ニューロン機能の評価も影響を受けなかった。上肢の反応時間タスク、何種類かのサッカーボール運動も影響されなかった。

いわゆる電磁場過敏症に関しては、アンケート調査を施行したところ、日本では男女とも一般人口の約1.2%が自分は携帯電話からの電磁場で健康被害を被っていると考えていた。この過敏症群とコントロールの群を対象に、3種類の電磁場曝露と騒音曝露の4種類の曝露実験を試行し、自律神経反応・上肢反応時間タスク・電磁波を感じたかの質問・気分に関する質問を施行した。騒音は有意に不快感を誘発、電磁場は誘発しなかった。

睡眠脳波による睡眠構築に関しても、3時間の電磁場曝露が影響する証拠はなかった。

《キーワード》 携帯電話、電磁場、ヒト中樞神経、誘発電位、睡眠

**Abstract**

I will briefly summarize our experiments on the effects of electromagnetic fields (EMF) from mobile phones on the human central nervous system.

The auditory brainstem response (ABR), somatosensory evoked potential (AEP) and motor evoked potential (MEP) were all unaffected by EMF exposure for 30 minutes. The EMF had no influence on the GABAergic cortical inhibitory function studied with a paired stimulation technique of those evoked potentials.

別刷請求宛先：宇川義一

〒960-1295 福島市光が丘一番地 福島県立医科大学医学部神経内科学講座

Reprint Requests to Yoshikazu Ugawa, Department of Neurology, Faculty of Medicine, Fukushima Medical University, 1 Hikarigaoka, Fukushima 960-1295, Japan

We used our specially developed cued-choice reaction time task in the EMF experiments. In this task, participants followed the instructions of which target they should press and which hand they should use. Even in such a complicated task, performance was not affected by EMFs from a mobile phone.

Several kinds of saccade tasks, such as a visually guided saccade, a memory guided saccade and an anti-saccade, were all unaffected by mobile phone use for 30 minutes.

The so-called EMF hypersensitivity was also studied in our project. The questionnaire results showed that 1.2% of the Japanese population had some mobile phone related symptoms. We conducted the following four different kinds of exposure tests on the hypersensitive and control subjects: continuous EMF exposure, intermittent EMF exposure, sham exposure and stressful sound exposure. We recorded some autonomic parameters during the exposures, performed a reaction time experiment and administered a questionnaire about the level of discomfort and EMF detection. No objective parameters were influenced by mobile phone exposure. Both groups of subjects reported significantly more discomfort in the sound exposure condition. The EMF exposure detection rate was no different between the two groups.

The three hours of EMF exposure from mobile phones did not affect the sleep configuration studied by sleep EEGs.

---

《Key words》 Mobile phone, EMF (electro-magnetic field), human central nervous system, evoked potentials, sleep

---

## I. はじめに

電磁場の健康影響という特集の中で、人の中枢神経に対する影響についての記述を依頼されたが、私は神経内科の臨床が本業で、電磁場に関しては携帯電話の人の脳に対する影響に関する研究のみを行ったので、電磁場全般について論じる事はできない。そこで、私のやってきた研究の人に対する携帯電話の研究についてのみ、本項ではまとめさせていただく。これら述べるすべての研究に関して、限界があることを説明してから、個々の研究に関して概説する。私自身これらの限界を承知の上、先行研究で携帯電話により何らかの変化があるという報告があることについて、結果の確認のために追試を行った研究である。

携帯電話を使用していて、何らかの健康影響が出るか出ないかを科学的に確実に証明するのは、なかなか難しい。特に、曝露実験ではその要素が多い。その理由の一つは、細菌に感染するとほぼ誰でも熱を出し咳が出るという様な因果関係が携帯電話の影響で出る事はないし、出る所見が客観的に大きな差として出るものでもない。従って、サンプル数の要素が一つ問題となる。科学的に有意な所見を出すためには、十万・百万人単位の数の人の両群比較の様な実験が必要かもしれない。

それだけの人数の曝露実験を組むことは無理で、サンプル数はずっと少ない。これが第一の限界である。ただし、先行研究では我々の研究と同様な10-20人程度のサンプル数で統計的有意差をだしている報告があったために、我々も同数でこれまでの実験を施行した。もう一つの限界は、曝露時間の問題である。曝露実験は急性曝露の影響を見ているだけで、携帯電話を3年、5年使っていたら何らかの所見を呈するかを実験しているわけではない。すなわち、慢性曝露に関して結論を出すことは出来ない。このほかにも、多くの限界がある中での急性曝露実験の結果であることを、先ずおことわりしておく。その上でも、多くの方の心配、先行研究での結果などを考えて、必要な研究と判断して、これまで研究を続けてきた。

一つ一つの研究の紹介に入る前に、もう一点電磁場の曝露装置に関して記述する。携帯電話の端末、携帯電話の基地局アンテナを模倣した装置を作成した。どちらも、刺激装置のオペレータ以外は、刺激をしているのかしていないのか、どのタイプの刺激をしているのかに関して知ることができない条件で実験を施行した。そして、実験全体が終了した後で刺激条件をオープンにして、刺激条件による結果の差異を統計的に検証する手法で



実験を行った。ダブルブラインドが保たれている実験である。曝露した電磁場の強度は、端末については現在使用されている携帯端末で最大出力が出ている電磁場を持続的に出力する設定とした。アンテナについても、アンテナ1m近くまで近づいた時に浴びる電磁場と同様な強度の電磁場が出る条件とした。多くの実験は30分間電磁波を持続的に受ける実刺激条件と、電磁場は出ないが後はすべて同じで見分けがつかないシャム刺激条件の両者を施行した。一部の実験は他のパターンの刺激も行った。

さらに、実験のすべてが東京大学研究倫理委員会、福島県立医大倫理委員会の承認を得て、被験者にインフォームドコンセントを得てから施行されている。

以下、いくつかの個々の研究に関して概説する。

## II. 誘発電位に対する影響

人の脳の反応を客観的にとらえるものとして、よく知られているのは脳波であろう。脳波に対する携帯電話の影響は、睡眠時の脳波として解析されている。この点に関しては、睡眠に対する影響の項で触れることにする。もう一つ、神経内科臨床で用いられている客観的に脳の機能を評価する方法として、誘発電位がある。これは、体の外から刺激を入れた時に脳波として起きた脳の反応を客観的に評価するものである。手を触られたとしても脳波記録でその事象を検出できるわけではない。一回の脳波記録を見ても検出できないとしても小さい反応を、刺激の時点を起点に加算することにより、背景から際立った反応としてその小さい反応をとらえるのが、誘発電位である。刺激するインプットにより視覚誘発電位・体性感覚誘発電位・聴覚誘発電位などがある。人の脳はある程度機能分化していて、局所により脳の機能が分かれている。図1に示すように、視覚情報・体性感覚情報・聴覚情報などを処理する部位、運動を司る部位、判断・思考などを行う部位などに分かれている。これに応じて、誘発電位が大きく記録できる部位が刺激の種類により異なっていて、そ

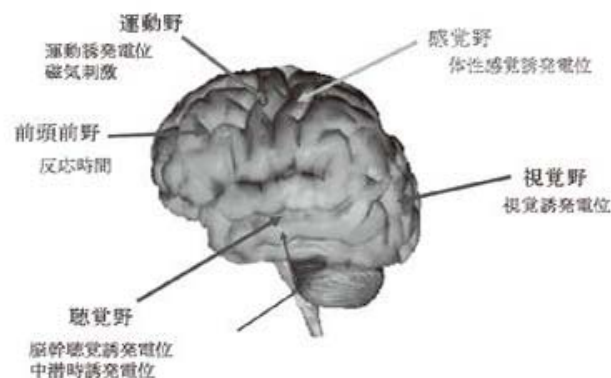


図1 脳の機能局在と人で解析できる方法。

の部位は図1と一致している。以下に、いくつかの誘発電位に対する携帯電話と同じ電磁場曝露の影響について延べる。

### 1. 聴覚誘発電位

音を聞いた時に脳に起きる反応を加算したものである。この反応をまず解析対象とした理由は、影響を受けると言う報告があった<sup>1)</sup>だけでなく、携帯電話端末が発生する電磁場は、聴神経から脳幹を一番強く曝露していると言う電磁場の曝露量に関するシュミレーションの結果があったからである。聴性脳幹誘発電位と中潜時反応など、いくつかの種類がある。聴性脳幹誘発電位 (ABR) は、音を聞いてから10ms以内に5つの反応が見られ (図2)、聴神経から中脳までの脳幹のレベルで起きている現象である。中潜時反応 (MLR) は一



図2 ABR (聴性脳幹誘発電位) 二発刺激：実際の波形。

図中のIとVは、それぞれ聴神経由来、下丘 (中脳) 由来の波形を示す。

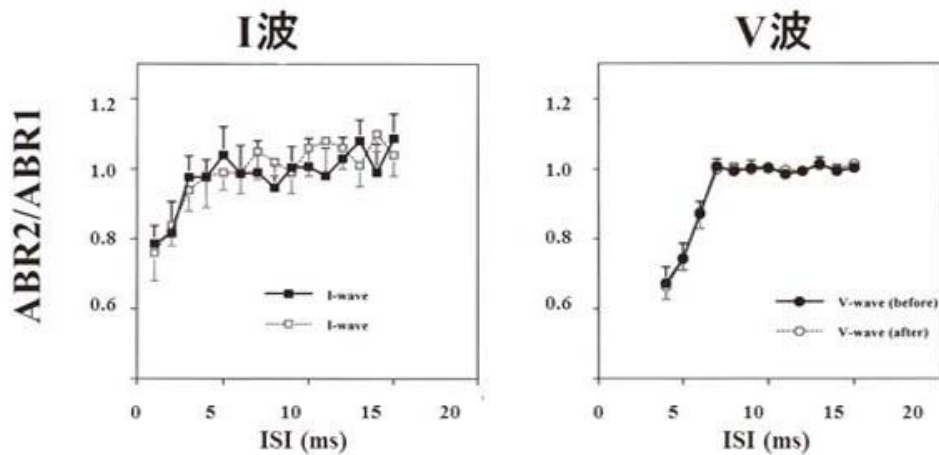


図3 ABR (聴性脳幹誘発電位) 回復曲線。

ISI: Inter Stimulus Interval。I波=聴神経由来、V波=下丘(中脳)由来。ABR2/ABR1は二発目刺激による反応の一発目刺激での反応に対する振幅の比率を示す。

次聴覚野である側頭葉で起きる反応である。30分間の携帯電話からの電磁場曝露前後で両者を比較したが、ABR、MLRとも、反応の潜時、振幅に有意な差はなかった。すなわち、一発刺激の音に対する反応は、30分間の携帯電話曝露で影響を受けなかった。ABRに携帯電話が影響するという報告<sup>1)</sup>と影響受けないと言う報告がある<sup>2)</sup>、我々の実験では影響を受けなかった<sup>3)</sup>。一発刺激に影響しない時に、2連発刺激に対する反応を見ることにより、大脳皮質での抑制機能を見る実験がしばしば行われる。これは抑制介在ニューロンを介する機能を見ていて、介在ニューロンが小さくて様々な影響を受けやすいので、より弱い影響を見る事ができるとされている。そこで、ABRの2連発刺激の実験<sup>4)</sup>も行った。図3に示す様に、ABRの回復曲線は携帯電話の電磁場曝露によって影響を受けなかった<sup>3)</sup>。また、MLRに対する電磁場の影響に関する報告がそれまでなかったが(図4)、この研究が新しい知見を提供した。

以上より、携帯端末に近い聴覚系の神経系に携帯電話が有意に影響する証拠を提示できなかった。

## 2. 体性感覚誘発電位 (SEP)

手の末梢神経を刺激して、脳波の反応を加算するのが体性感覚誘発電位 (SEP) である。手に何かが触れたと言う様な事を理解する脳の反応を見

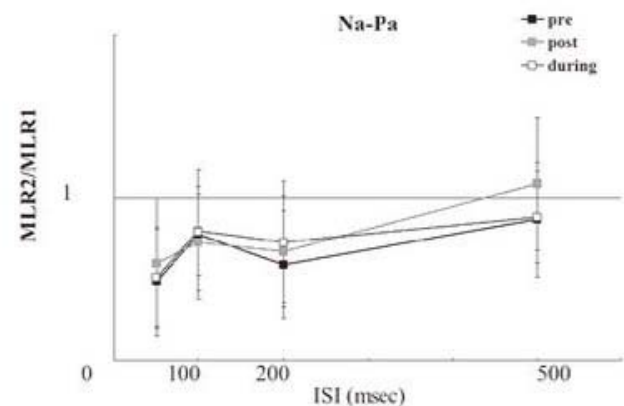


図4 曝露側の中潜時反応比率 (MLR-R)。

Na-Paは、MLR測定時に出現する最初の陰性ピーク(Na)と次に現れる陽性ピーク(Pa)の振幅( $\mu V$ )。MLR2/MLR1は、二発刺激実験での一発目刺激に対する反応と二発目刺激に対する反応の振幅の比率を示す。

ていると考えてよいだろう。このSEPも一発刺激に対する脳の反応は、30分間の携帯電話の曝露により影響を受けなかった。そこで、聴覚と同様に2連発刺激に対する反応を電磁場曝露の前後で比較した(図5)<sup>5)</sup>。SEPにおいても、2連発刺激で検出している抑制性介在ニューロンの機能にも携帯電話の曝露は影響しなかった。この抑制機能のタイムコースを図6に示す。一部の抑制性介在ニューロンに機能障害が生じる疾患では、この検査で異常が検出できるのであるが<sup>6)</sup>、携帯電話



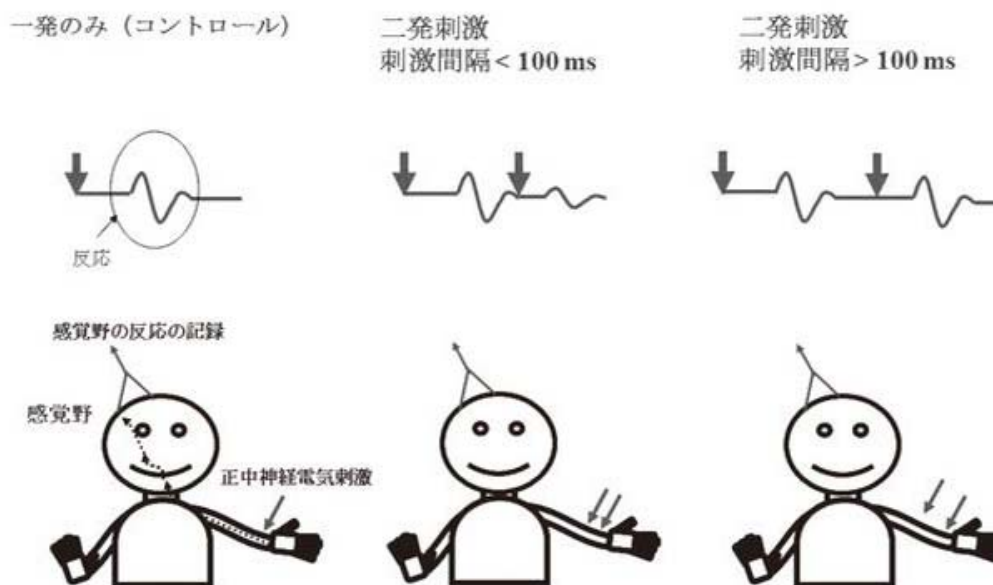


図5 体性感覚誘発電位 (SEP) 二発刺激法の概略。

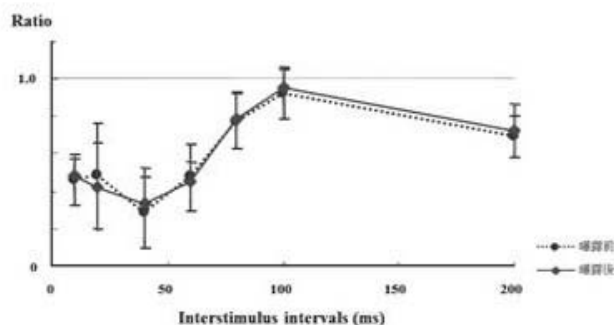


図6 電磁波曝露前後での体性感覚誘発電位 (SEP) 二発刺激法のタイムコースの比較。

Ratio は一発目刺激に対する反応と二発目刺激に対する反応の振幅の比率を示す。

ではそのような影響も見られなかった。

### 3. 運動誘発電位 (MEP)

頭蓋骨の外から脳を刺激できる方法として磁気刺激という刺激法が20年以上前に発明された。この刺激法を利用して、人の運動野を経頭蓋的に刺激できる。刺激で生じる筋電図を記録する事により、錐体路機能を評価できる。この方法での反応を MEP と呼んでいる。携帯電話の曝露前後での MEP を比較する事により、運動野に対する携帯電話の影響を検討した結果が図7である。この反

応でも、曝露前後で反応の振幅、潜時に有意差はなかった。運動野に関しても一発刺激の反応で影響を示すことが出来なかった<sup>7)</sup>。運動野においても、2連発刺激で運動野の抑制性介在ニューロン (GABA 作動性ニューロン) の機能を見る検査<sup>8)</sup>を行った。2発刺激の MEP の結果 (図8) でも、曝露前後で影響を受けず、前後とも同様な抑制効果が認められた<sup>7)</sup>。

以上誘発電位の実験結果をまとめると、3種類の誘発電位で同じ結果が得られた。これらの誘発電位において、単発刺激の反応も2連発刺激の反応も、30分間の携帯電話使用により影響を受けなかった。

### III. 反応時間

反応時間とは、ある指令を支持された時に、なるべく早く・間違えずに指令を成し遂げられるかを見る検査である。タスクが完了するまでに要する時間で評価する事が多い。この反応時間が電磁場に影響を受けるという報告があり<sup>9)</sup>、我々も反応時間の研究を行った<sup>10)</sup>。反応時間の中には、いくつかの種類があり、単純に go の指令が出たら、あらかじめ決められた一つの運動を行う simple

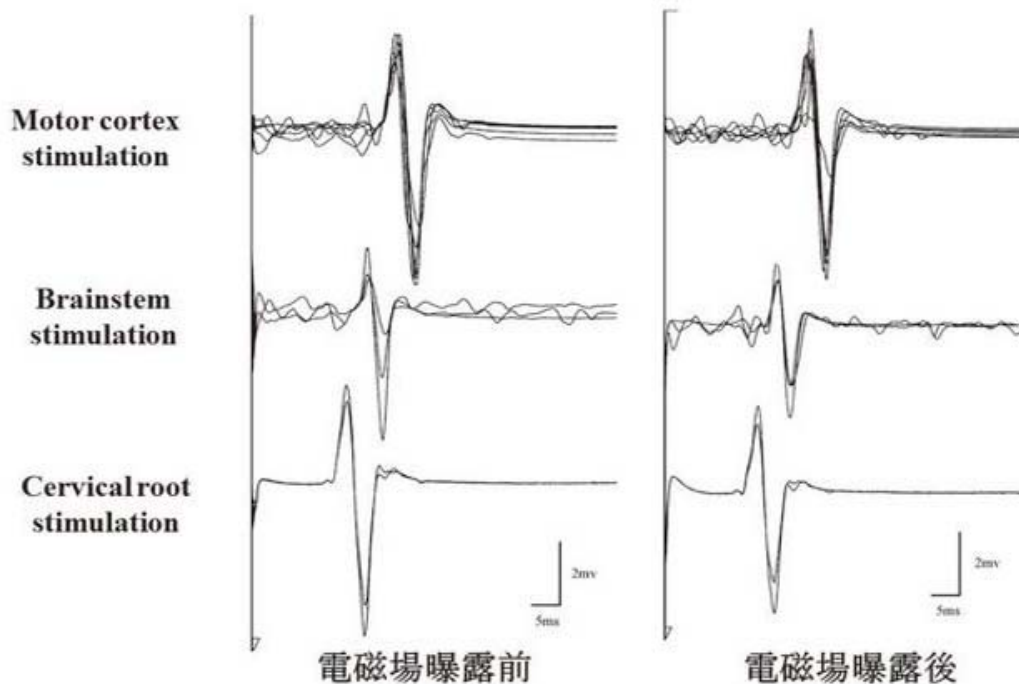


図7 正常被験者の運動誘発電位 (MEP)。

上段より大脳（上肢運動野）運動野刺激、脳幹（大後頭孔部）刺激、頭椎脊髄神経根刺激における波形を示す。

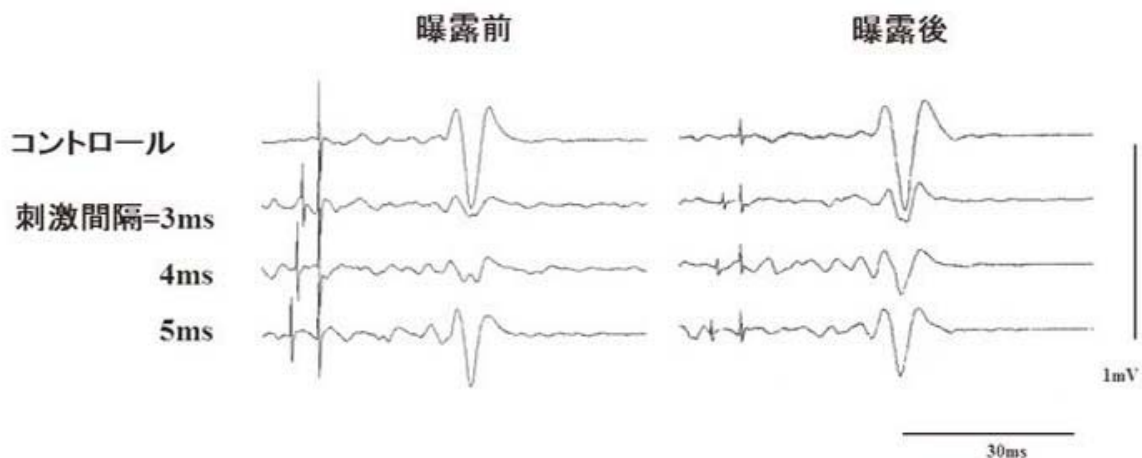


図8 電磁波曝露前後での大脳運動野二連発刺激の反応抑制効果の比較。

曝露前後で同様の抑制効果を認める。

reaction task から、何種類かの反応の中から条件により一つの運動を行う choice reaction task, これらに前もってヨーイのような cue が出ている cued choice reaction task などである。行うタスクに種類により、使用する脳の部位が異なる。特に、選択などが入る施行では前頭前野などの前頭葉の機能を多く使う事になる。我々は、そこで単純で

なく、選択すべき項目が二つ入っている cued choice reaction task を用いて、携帯電話の曝露を検討した。前頭前野まで使うタスクの方が、中枢神経の小さな変化を検出できるのではないかと考えたからである。4種類の難易度が違うタスクを同時にランダムに行う検査である。4つのタスクで、各々施行時に機能している脳の部位が違うこ



とが、あらかじめ正常者で解明されているものである。この研究でも、携帯電話30分の曝露が有意に反応時間に影響する結果は得られなかった。この結果から、前頭前野を含めて高次脳機能を行う脳にも、携帯電話はあまり大きな影響は与えてないだろうと結論した。

#### IV. 眼球運動

眼球運動(目の動き)を制御する脳のシステムは、かなり複雑で、脳幹の部位で詳細にコントロールできる中枢があり、その脳幹を大脳からの指令で動かしている。脳の中では脳幹が携帯電話の端末に近いと言う事実と、眼球運動は年齢と共にその能力が低下するので小さな影響でも変化が出やすいだろうと言う予測から、眼球運動が携帯電話の電磁場により影響を受ける可能性があると考えて、様々な眼球運動タスクに対する携帯電話使用の影響を検討した<sup>11,12)</sup>。結果は提示しないが、30分の携帯電話使用の前後で眼球運動に有意差があるという結果は得られなかった。

#### V. 電磁場過敏

多くの人では障害の原因となっていないが、携帯電話使用が原因で健康に被害がでたと考えてい

る人がある程度の頻度で存在する。このような方を仮に“電磁場過敏”と定義すると、電磁場過敏と言える方がどのくらいの頻度でいるかを、5000人の女性を対象に調査した結果、一般女性人口の1.2%にそのような方がいると判明した<sup>13)</sup>。その後7000人の男性にもアンケート調査を実施したところ、やはり1.2%の方にこのような方がおられると解った。全体として、日本では一般人口のおよそ1.2%位の方が電磁場過敏症状を訴えていると解った事実は重要である。

電磁場過敏と訴えている人と、年齢・性が一致したコントロールの方で、携帯電話の基地局を模倣したアンテナからの電磁場曝露と、携帯電話端末からの電磁場曝露の実験を行った。電磁場曝露条件は図9に示すように、4つの条件で、これらがランダムに曝露されていて、被験者、検者は条件がわからない設定で施行した。4つの条件の中に一つだけ陽性コントロールとして、誰もが認知できる低いレベルの騒音条件を入れた。この曝露時に、上述の反応時間タスクを施行したり、自律神経系のパラメータを記録したり、曝露前後での気分に関してアンケート調査を実施した。どのパラメータも電磁場曝露で影響を受けることはなかった。また、この実験中に被験者に曝露されて

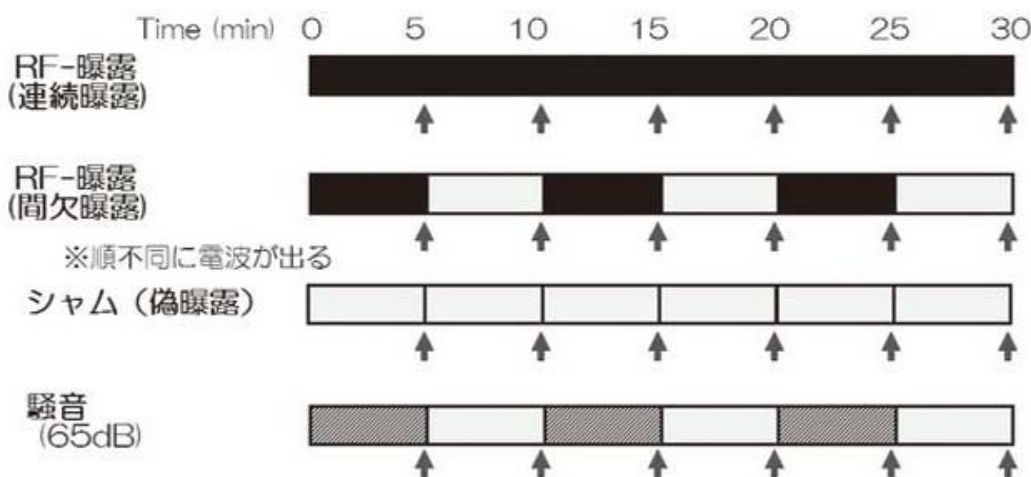


図9 協力者が行う4つの実験条件の概略。

被験者は5分おき(矢印)に電波の感知に関する質問と、主観的な違和感に関してスイッチで解答する。なお、黒く塗りつぶしてある時間は電波の曝露、斜線は騒音の曝露を示す。間欠曝露では、図では交互になっているが、実際の順番はランダムに曝露が行われた。

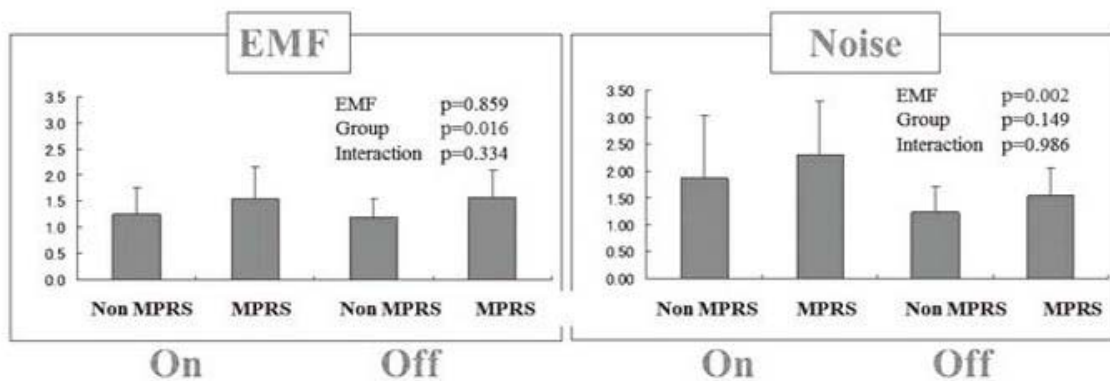


図10 曝露中の不快感。

それぞれ縦軸は気分に関するアンケート調査による不快感のスコアを示す。EMF; 電磁場、MPRS: mobile phone related symptoms (携帯電話に関連した症候を有する被験者)。

EMFの曝露実験では、2要因のANOVA(群: 感受性群と感受性でない群、EMFのオンかオフ)の結果では、EMFの有無は有意な影響はなく、感受性群か相でないかが有意に影響している、有意な2要因の相関は無かった。感受性群が有意に、電磁場の有無に関係なく、違和感が強い事になる。電磁場を曝露されるかもしれないという不安感が影響した結果かもしれない。

騒音の負荷実験では、騒音曝露の有無が有意に影響していたが、群間に差はなかった。

いたときの違和感に関する質問と、電磁場を浴びていると思ったか・浴びてなかったかに関する質問も行った。違和感に関する結果を図10に示す。誰でも感じる騒音の条件では、コントロール群も過敏症群も違和感が他の条件より有意に強かった。それに対して、電磁場については電磁場がオンでもオフでも同様な違和感のレベルであった。すなわち、騒音に関しては、確かにオンの時にオフより誰でも有意に違和感が強かったが、携帯電話がオンと言う条件がオフに比べて違和感が強いということはなかった。また、電磁場がオンかオフかを認識出来ていたかを聞いた質問では、正解率がランダムに答えた時に出る50%と有意に差がなかった(図11)。すなわち、電磁場を感じたと言っても、正確に電磁場を感じているのではなく、ランダムレベルと同じであった。

## VI. 睡眠、睡眠脳波

携帯電話使用が睡眠に影響して生活上困難を感じていると言う報告がある<sup>14,15)</sup>。電話使用では、会話の内容によっては興奮して寝られない、長電話をして寝不足になるといった、別の要素で睡眠に影響することがあるが、それ以外に電話からの

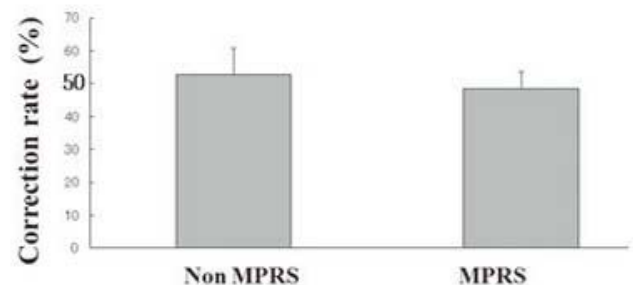


図11 電磁波がオンかオフかを認識できたかを尋ねた質問での正解率。

正解率は偶然正解する50%と有意差がなかった。

電磁場によって睡眠が障害されるということが考えられている。この結果を踏まえて、我々は睡眠の質を睡眠脳波で評価する研究も行った。図12に示すような条件で睡眠の実験を行った。結果として、睡眠前の3時間にわたる携帯電話と同じ強度の電磁場曝露が睡眠の質に影響する事はなかった(未発表データ)。

以上、我々がこれまで行ってきた携帯電話からの電磁場のヒトの脳に対する影響に関する研究をまとめた。最初に述べたように、この結果から決定的な結論を出すことは出来ないが、発表されて



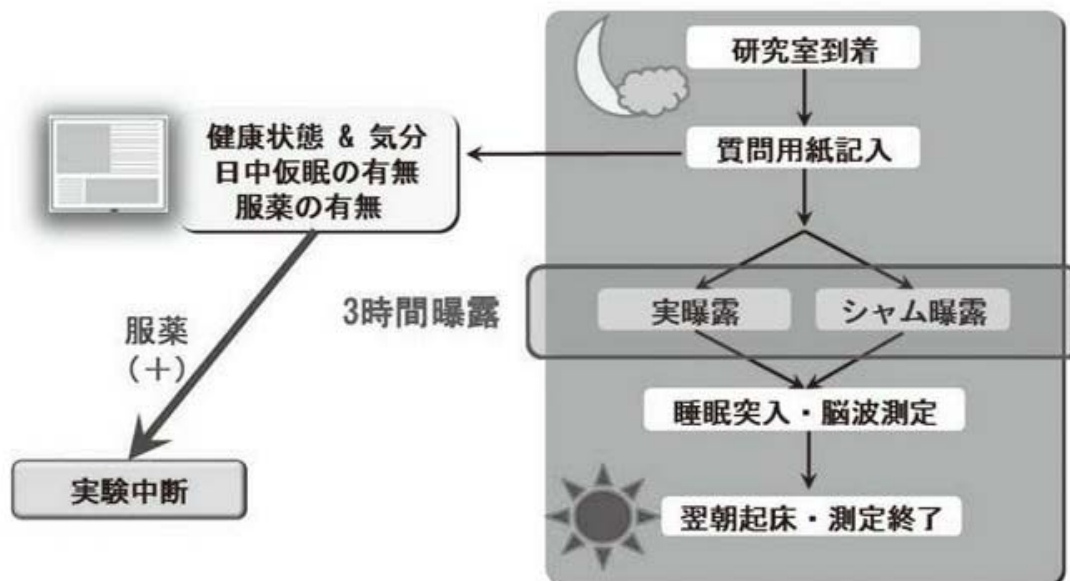


図12 電磁波曝露の有無による睡眠の質を、睡眠脳波で評価する研究の、被験者の一日のスケジュールの概略。

いる結果が必ずしも再現性が良いわけではないと言う事だけはいえるであろう。事実、陽性の結果を出した研究者自身が、後で陰性の結果を出している研究もいくつかあり、慎重な考察が必要な印象を私は持っている。

#### 文献

- 1) Kellényi L, Thuroczy Gy, Faludy B, Lenard L.: Effects on mobile GSM radiotelephone exposure on the auditory brainstem response (ABR). *Neurobiology* 7: 79-81, 1999
- 2) Bak M, Sliwinska-Kowalska M, Zmyslony M, Dudarewicz A.: No effects of acute exposure to the electromagnetic field emitted by mobile phones on brainstem auditory potentials in young volunteers. *Int J Occup Med Environ Health* 16: 201-218, 2003
- 3) Arai N, Enomot H, Okabe S, Yuasa K, Kamimura Y, Ugawa Y.: Thirty minutes mobile phone use has no short-term adverse effects on central auditory pathways. *Clin Neurophysiol* 114: 1390-1394, 2003
- 4) Kevanishvili Z, Lagidze Z.: Recovery function of the human brainstem auditory-evoked potential. *Audiology* 18: 472-84, 1979
- 5) Yuasa K, Arai N, Okabe S, Tarusawa Y, Nojima T, Hanajima R, Terao Y, Ugawa Y.: Effects of thirty minutes mobile phone use on the human sensory cortex. *Clin Neurophysiol* 117 (4): 900-905, 2006
- 6) Ugawa Y, Genba-Shimizu K, Kanazawa I.: Somatosensory evoked potential recovery (SEP-R) in various neurological disorders. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 100: 62-67, 1996
- 7) Inomata-Terada S, Okabe S, Arai N, Hanajima R, Terao Y, Furubayashi T, Ugawa Y.: Effects of high frequency electromagnetic field (EMF) emitted by mobile phones on the human motor cortex. *Bioelectromagnetics* 28: 553-561, 2007
- 8) Hanajima R, Ugawa Y, Terao Y, Ogata K, Kanazawa I.: Ipsilateral cortico-cortical inhibition of the motor cortex in various neurological disorders. *J Neurol Sci* 140: 109-116, 1996
- 9) Koivisto M, Revonusuo A, Krause C, Haarala C, Sillanmaki L, Laine M, Hamalainen H.: Effects of 902 MHz electromagnetic field emitted by cellular telephones on response times in humans. *NeuroReport* 11: 413-415, 2000
- 10) Terao Y, Okano T, Furubayashi T, Ugawa Y.: Effects of thirty-minute mobile phone use on visuo-motor reaction time. *Clin Neurophysiol* 117: 2504-2511, 2006
- 11) Terao Y, Okano T, Furubayashi T, Yugeta A, Fukuda H, Ugawa Y.: EFFECTS OF THIRTY-MINUTE MOBILE PHONE EXPOSURE ON SACCADDES *Clin Neurophysiol* 118: 1545-1556, 2007
- 12) Okano T, Terao Y, Furubayashi T, Yugeta A, Hanajima R, Ugawa Y.: The effect of electromagnetic field emitted by a mobile phone on the inhibitory control of saccades.

- Clin Neurophysiol 121: 603-611, 2010
- 13) Furubayashi T, Ushiyama A, Terao Y, Mizuno Y, Shirasawa K, Pongpaibool P, Shimba A, Wake K, Nishikawa M, Miyawaki K, Yasuda A, Uchiyama M, Yamashiata HK, Masuda H, Hirota S, Takahashi M, Okano T, Inomara-Terada S, Sokejima S, Maruyama E, Watanabe S, Taki M, Ohkubo C, Ugawa Y: Effects of Short-term W-CDMA mobile phone base station exposure on women with or without mobile phone related symptoms. *Bioelectromagnetics* 30: 100-113, 2009
  - 14) Huber R, Graf T, Cote KA, Wittmann L, Gallmann E, Matter D, Schuderer J, Kuster N, Borbely AA, Achermann P: Exposure to pulsed high-frequency electromagnetic field during waking affects human sleep EEG. *NeuroReport* 11: 3321-3325, 2000
  - 15) Borbely AA, Huber R, Graf T, Fuchs B, Gallmann E, Achermann P: Pulsed high-frequency electromagnetic field affects human sleep and sleep electroencephalogram. *Neurosci Letts* 175: 207-210, 1999