

## 中間周波帯磁場の生物作用評価

環境工学研究部 生物工学  
主任研究員 池畑政輝

### 1. まえがき

環境中に発生している種々の電磁場の健康影響に関する社会の関心は依然として高い。そのため、特に極低周波域（主に商用周波数50/60Hz）および高周波域（主に携帯電話使用帯域）の電磁場の安全性に関しては、様々な研究がなされており、国際保健機関（WHO）も科学的知見の収集と評価を進めている。一方、中間周波帯（300Hz～10MHz）の電磁場については、鉄道では、鉄道車両用主変換器などの機器から、また一般には電磁調理器、非接触ICカード、盗難防止装置、RF-IDなど、種々の機器・装置から発生しており、それらの普及に伴い、一般公衆が曝露する機会が増加していると考えられるが、現状では人体防護を考慮した生物影響評価を行うのに十分な実験データはほとんど蓄積されていない。そのため、具体的に生物を用いた実験による生物作用の評価は喫緊の課題であり、産業分野、省庁などを超えて対応を進めるべき課題であるといえる。

### 2. 電磁場の生物作用に関する既往の知見

1996年に、WHOでは、0～300GHzの周波数帯の電磁場の健康への影響を評価するために国際電磁場プロジェクトを発足させた<sup>1)</sup>。これまでに、商用周波磁場を含む低周波電磁場（0～300Hz）や、携帯電話に代表される無線周波電磁波（10MHz～300GHz）の健康影響に関して、日本、米国、欧州を中心に研究が進められ、多くの生物学的知見が蓄積されてきた。しかし、現在までのところ、居住環境もしくは、一般使用での曝露レベルの電磁場が、健康に悪影響を及ぼすという明確な科学的証拠は得られていない。これを受けて、WHOは、最近電磁場に関して2つの環境保健クライテリア（静電界・静磁場；2006年<sup>2)</sup>、100kHz以下の変動電磁場；2007年<sup>3)</sup>）を発表した。

一方、近年、RFIDタグ、非接触ICカードや電磁調理器等の新しい電気機器の利用が著しく増加してきており、これまで注目されていなかった中間周波数帯の電磁場（300Hz～10MHz）の生物影響について、社会的関心が高まりつつある。しかし、この周波数帯の電磁場の生物影響についての科学的知見は、現在までほとんど無い。中間周波磁場の中間周波とは名前の通り極低周波帯と高周波帯の「中間」を意味しているが、その生物作用は、中間周波帯の中でも、その周波数により大きく二つに分けられると考えられている。すなわち、100kHz未満の周波数帯は、低周波磁場と同様に刺激作用、100kHz以上の周波数帯は、高周波と同様に熱作用により生体に影響を及ぼすと考えられており、ICNIRP（国際非電離放射線防護委員会）に代表される国際ガイドラインでも、実際には当該周波数帯での生物実験は非常に少ないものの、低周波と無線周波で得られている知見から「外挿」して、中間周波数帯のガイドライン値が設定されている<sup>4)</sup>。これらのことから、「外挿」が正しいかどうかを検証する上でも、中間周波電磁場の健康リスク評価に資する生物影響評価に関する科学的知見の収集が望まれている。

本報告では、細菌・細胞を用いた試験管レベルでの遺伝毒性についての影響評価を取り上げるが、これは、健康リスク評価の様々なプロセスの最初に位置づけられる「有害性の確認」に寄与する。この「有害性」には致死に至る明らかな毒性等が含まれるが、中でも遺伝毒性の有無の評価は特に重要である。遺伝毒性とは、物理化学的、もしくは生理的な要因等により遺伝子やタンパク質が作用を受け、本来、その細胞の有する形質を変化させる性質（事象）であり、発がんや、遺伝病の原因、さらには発生異常(奇形発生)の原因となり得る。この遺伝毒性を評価するため、もっとも簡便な遺伝毒性の短期検索法として、遺伝子への作用の一つである突然変異を起こす能力(変異原性)を検出する「微生物を用いた復帰突然変異試験(エイムス試験)」や「マウスリンフォーマ試験(MLA試験)」が、一般に広く用いられている。この変異原性と動物試験での発がん性の間には高い相関性があることが既に明らかにされ、遺伝毒性を検査するための有用な試験法として、医薬品や環境汚染物質、食品添加物の安全性評価に広く用いられている。磁場の変異原性については、商用周波磁場(1mT以下)や高周波磁場の単独曝露ではこれまでに多くの研究が行われ、環境レベルの強度で変異原性があるという報告はされていない。一方、これらの方法を中間周波磁場の変異原性の検討に適用した事例は無い。

このような状況を踏まえ、本研究では、中間周波の電磁場に関する生物影響の基礎的な知見を得るため、特に変異原性に着目した評価を行った。

### 3. 材料と方法

中間周波帯の磁場を生物試料に曝露するため、非磁性の材料のみで構成した樹脂製の炭酸ガスインキュベーターを製作し、このインキュベーターと平面コイルを組み合わせた曝露装置(図1)およびヘルムホルツ型コイルを組み合わせた曝露装置を用いた<sup>5)</sup>。

変異原性の評価法として、上記エイムス試験とMLA試験を実施した。

エイムス試験では、試験菌株として一般的に用いられているサルモネラ菌(*Salmonella typhimurium*)由来のTA1535、TA1537、大腸菌(*Escherichia coli*)由来のWP2 *uvrA*および、プラスミドpKM101が導入されたサルモネラ菌 TA98、TA100と大腸菌 WP2 *uvrA*/pKM101を用いた。培養した菌液(およそ3000万~1億個の細菌)を変異原性選択用の寒天培地上に塗布し磁場曝露群は曝露装置内に静置し中間周波磁場を曝露した。一方、擬似曝露群は擬似曝露装置内に静置し、37℃にて48時間培養した後にプレート上に出現した変異体コロニーを計数し、突然変異の出現頻度を求めた。中間周波磁場の曝露条件は、2kHz、20kHzにおいて、それぞれ、0.91mT、1.1mTであった。これらは、現在、国際機関(ICNIRP)により、生物影響の可能性のある他の周波数帯からの外挿により定められている曝露制限値(参考レベル)の、それぞれ、146倍、176倍であった。

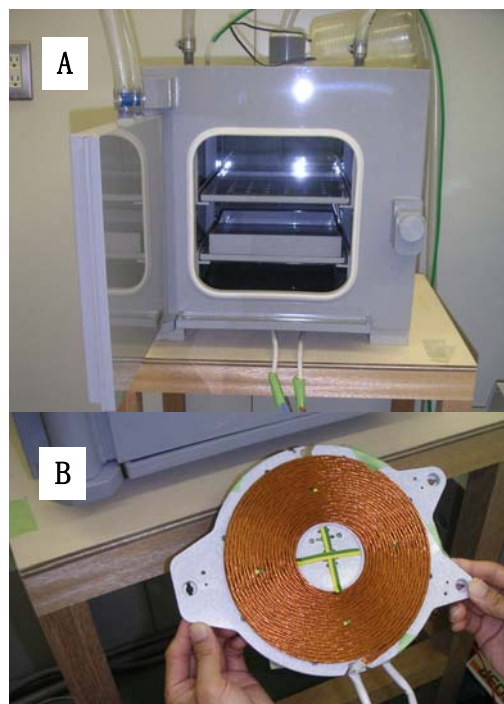


図1 中間周波帯磁場曝露装置  
A. 樹脂製インキュベーター  
B. 曝露用平面コイル

MLA試験では、L5178Y *tk<sup>+/+</sup>* 3.7.2c細胞をRPMI1640培地を用いて培養後、 $1 \times 10^5$ 細胞/mlの細胞浮遊液を調整し、磁場曝露群、対照群、陽性対照群（メタンスルホン酸メチル（発がん物質）処理）の3群に分けた。磁場曝露群は曝露装置内に静置し中間周波磁場を曝露した。対照群、陽性対照群は汎用の炭酸ガス培養器中で培養した。培養条件は各々37°C、5%CO<sub>2</sub>であった。48時間培養（24時間後に一度継代）した後、生細胞数測定用の96穴プレートおよびTFT耐性変異検出用の96穴プレートを4枚ずつ作製し、汎用炭酸ガス培養器中でさらに2週間培養した。培養後、生存率ならびに突然変異頻度を求めた。中間周波磁場の曝露条件は、インキュベーター底部に置いた培養用フラスコの底面で、周波数2および20kHz、磁場強度最大約0.8mTとした。また、フラスコ底面での磁場の強度分布は最大値に対して-10%以内であった。磁場強度を最大とした時、フラスコ底面の細胞面に誘導される電界は、曝露に使用した細胞用培地（RPMI1640）の実測による誘電率をもとに、最大2.7V/mであると推定された。

#### 4. 結果および考察

##### 4.1 エイムス試験の結果

最高1.1mTの強い磁界（ICNIRP参考レベルの約180倍；20kHz）を用い、それぞれの菌株で独立した3回以上の試験を行ったが、中間周波磁界の変異原性は確認できなかった（表1）。また、2kHzで0.91mTの曝露条件でも同様の試験を実施したが変異原性は確認できなかった。したがって、本研究で検討した中間周波磁界は、塩基置換、フレームシフトなど、エイムス試験で検出できる遺伝子を直接傷つけるような突然変異誘発能を持たないことが示唆された。

表1 2kHz、0.91mTでの微生物変異原性試験の結果

	対照群		曝露群		コロニー数の比	P値
	平均	標準偏差	平均	標準偏差		
サルモネラ菌						
TA98	14 ±	2	15 ±	1	1.1	0.786
TA100	64 ±	1	68 ±	2	1.1	0.647
TA1535	8 ±	1	8 ±	1	1.0	0.781
TA1537	6 ±	1	7 ±	0	1.2	0.705
大腸菌						
WP2 <i>uvrA</i>	33 ±	1	34 ±	3	1.0	0.794
WP2 <i>uvrA</i> /pKM	109 ±	3	114 ±	8	1.0	0.635

##### 4.2 MLA試験の結果

磁場強度0.8mT、周波数2および20kHzの条件でMLAの実験を各6回以上繰り返し行った。各群における生存率とTFT耐性変異コロニーの出現頻度を比較したところ、対照群と磁場曝露群の間には生存率およびTFT耐性変異の頻度いずれも有意な差異は見られなかった（図2）。一方、陽性対照処理群では対照群と比較して、有意な生存率の低下とTFT耐性変異の出現頻度上昇が観察された。また、磁場強度を0.4mTに下げて曝露した場合も、結果は全く同様であった。これらの結果から、本研究で検討した磁場曝露の条件では、中間周波磁場はMLAで検出される種々の突然変異（点突然変異、染色体レベルの変異）誘発能を持たないことが示唆された。

### 4.3 考察

本研究で得られた結果は、中間周波磁場においては、ICNIRPガイドラインの100倍程度の磁場強度でも明確な変異原性は無いことを示唆している。また、中間周波磁界による誘導電界を評価指標とした場合は、最大2.7V/m程度の誘導電界による、マウス細胞への変異原性は無いことが同様に示唆される。

中間周波帯磁場の生物作用を解明することは、最終的には健康リスク評価への寄与を目的としている。そのためには、更なるデータの蓄積が重要であり、今後、様々な変異原性評価試験ならびに生物影響評価試験を適用し、詳細な実験による評価を進めていきたい。

### 5. まとめ

2kHzで0.91mT、20kHzで1.1mTの中間周波磁場について、細菌を用いた変異原性試験（エイムス試験）により変異原性を調査したが、変異原性は認められなかった。更に、哺乳類培養細胞としてマウス由来細胞を用いた変異原性試験により2及び20kHz、0.8mTまでの生物作用を検討したが、変異原性ならびに急性毒性は認められなかった。

これらの結果は、我々が実際に環境中で曝露する磁場は、本報告で対象とした磁場強度と比較して大変弱いこと、また曝露する時間も短時間であることを勘案するならば、健康リスク、特に遺伝子の変異などを起こす可能性は小さいことを示唆する。しかしながら、社会では依然として電磁場の健康リスクが懸念されている現状、またEUにおける作業環境の磁場による健康リスクの評価・低減に関するEU指令など、各国の政策やWHOなど国際的にも様々な動きが生じることを踏まえ、今後も様々な側面からの調査を継続する必要があると考える。そのため、我々は、鉄道で発生する種々の周波数帯の電磁場を対象として、本報告で紹介する生物学的な側面からの研究に加え、工学的側面から人体内の誘導電流量を詳細かつ定量的に推定する研究等を通して、磁場の安全性に関する総合的な評価を進めている。

尚、本研究の一部は（財）電力中央研究所との共同研究ならびに（独）情報通信研究機構との共同研究で実施した。

### 参考文献

- 1) WHO INTERNATIONAL EMF PROJECT (<http://www.who.ch/peh-emf/>)
- 2) World Health Organization, Environmental Health Criteria 232 Static Field, Geneva: WHO Press; 2006
- 3) World Health Organization, Environmental Health Criteria 238 Extremely Low Frequency Fields, Geneva: WHO Press; 2007
- 4) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Health Phys., 74, pp494-522, 1998
- 5) 中園聡, 池畑政輝, 西村泉, 根岸正, 重光司, 電力中央研究所報告, V04008, 2005

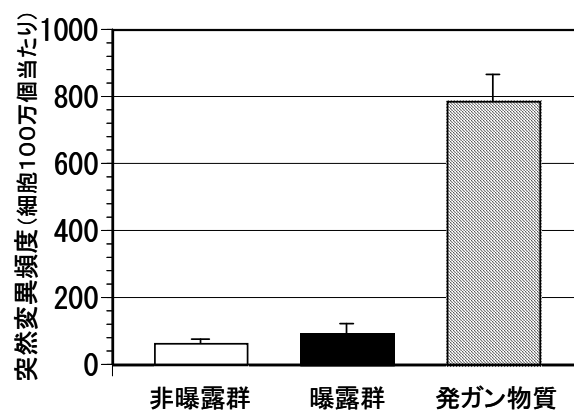


図2 2kHz、0.8mT磁場のMLA試験による変異原性試験結果