

201134004A

厚生労働科学研究費補助金

健康安全・危機管理対策総合研究事業

居室における中間周波電磁界に関する研究

(H21-健危-一般-008)

平成23年度 研究報告書

研究代表者 大久保千代次

平成24(2012)年3月

## 目次

### I. 総括研究報告

- 居室における中間周波電磁界に関する研究 大久保千代次・・・・・・・・・・ 1

### II. 分担研究報告

1. 居室における中間周波電磁界に関する研究（電気工学班）・・・・・・・・・・ 19

鈴木敬久、和田圭二、和氣加奈子

2. 居室における中間周波電磁界に関する研究（細胞研究班）・・・・・・・・・・ 43

池畑政輝、吉江幸子、石井一行、小笠原裕樹

3. 居室における中間周波電磁界に関する研究（動物研究班）・・・・・・・・・・ 53

牛山 明、櫻田尚樹

居室における中間周波電磁界に関する研究

大久保千代次 一般財団法人電気安全環境研究所 電磁界情報センター所長

研究要旨

中間周波電磁界を利用した機器が居室内を含め生活空間にも普及を遂げ、生活の利便性は益々向上しているものの、その健康影響に関する科学的情報が不足なため、国民の間にはこれらの機器からの電磁界の健康影響に対する不安が発生しており、健康安全・危機管理として早急な対応が求められている。本研究は、そのハザードの有無について、細胞や動物を用いた基礎的な研究により追究することにある。電磁界の生体影響評価研究では電気工学的な定量が不可欠であるため、研究を電気工学班、細胞研究班、動物研究班の3班が共同研究を実施した。

電気工学班では昨年度開発した動物用局所磁界ばく露装置に関して、胎児内の誘導量の不確定性について知るために不均一組織のモデルから簡易モデルを作成し、数値シミュレーションを行なった。その結果、胎児内の誘導電界の不確定性は比較的大きなことが明らかになり、ばく露評価に誘導量の不確定性を考慮する必要があることがわかった。その後、解剖学的構造を考慮し、胎児位置の移動とその頻度をふまえた不確定性の検討を行い、動物実験の発生毒性の評価において、内部誘導電界の変動量が大きな胎児群と変動量が小さい胎児群に分けることを提案した。変動量が小さい胎児群は誘導電界値が大きく安定した値が得られ、より精度の高い評価が行うことができる。また、変動量が大きい胎児群は誘導電界値が小さい場合での評価を行えることがわかった。さらに、ばく露装置の磁界波形に関して、現実のIH調理器の波形を反映するため、低周波での振幅変調に関する検討を行い、ソフトウェアの変更のみで振幅変調が実際に行えることがわかった。

細胞実験班では、開発した *in vitro* 試験用 IF 磁界ばく露装置（21kHzにおいて最大 3.9mT（ICNIRP ガイドラインにおける公衆ばく露の参考レベルの 144 倍）を発生）を用いて、レポーター遺伝子を導入したヒト乳がん由来細胞（MCF-7）のエストロゲン応答性、DNA メチル化およびマウス ES 細胞の分化に対する IF 磁界ばく露の影響評価を行った結果、遺伝子やその発現、また分化に対して顕著な影響を与えないことが明らかとなった。

動物実験班では、電気工学班と協働し、実験動物へ 21kHz の磁界をばく露するための装置の開発し、妊娠ラットの胎児器官形成期にあたる妊娠 7 日～17 日に 1 日 1 時間、腹部局所ばく露をおこなった際の胎児への発生への影響を調べた。腹部表面の中心磁束密度で国際ガイドラインの約 400 倍にあたる 10.3mT の磁界ばく露を行っても奇形の発生率に影響は見られなかった。

大久保千代次 一般財団法人 電気安全環境  
研究所 電磁界情報センター 所長  
多氣 昌生 首都大学東京大学院 教授

#### < 研究の背景と目的 >

電磁界の生体作用は、低周波領域では神経や筋の刺激作用が支配的であり、高周波領域では生体の組織で電力エネルギーが吸収されることによって生じる温度上昇（熱作用）が支配的である。

中間周波（intermediate frequency, 以下 IF と略）電磁界は、これらの間に挟まれる周波数帯、すなわち 300Hz から 10MHz 程度の周波数の電磁界であり、刺激作用を持つ低周波領域と、熱作用を持つ高周波領域の中間に属する。この周波数領域を利用する技術としては、工業用の誘導加熱装置、盗難防止装置、電気鉄道の主変換器等が社会に導入されているが、国民個々の生活基盤を支える技術には応用されてこなかったため、その生体影響に関する研究についても余り行われていない。一方、近年ではオール電化の推進に伴い、中間周波帯に含まれる電磁界を使用する IH 調理器の普及が進んでいる。IH 調理器は、基本的に 20kHz～90kHz の電磁界を誘導加熱に利用するものであり、日常的な近傍での作業が想定されるため、電磁界へのばく露機会も増加する。しかしこの周波数帯の電磁界に関しては、これまで研究対象としての関心が低く、十分な科学的な知見が存在していない。そのため、2007 年に発刊された WHO の超低周波電磁界に関する環境保健クライテリア（EHC 238）では以下の通りに記載され、研究の推進が必須とされている。

「この領域のデータが欠落している現状

を考慮し、すべてを包括する必要事項として、通常は 300Hz～100kHz（訳注：原文の儘）とされる中間周波電磁界に関する更なる研究が必要である。健康リスク評価に必要とされる知識ベースの極少数しか集まっておらず、既存の研究の多くは結果が一貫していないので、更なる具体化が必要である。健康リスク評価のための十分な IF データベースを構成するための一般的な要件には、ばく露評価、疫学研究、ヒト実験室研究、動物および細胞（*in vitro*）研究が含まれる」

本研究の目的は、IF 磁界を発する IH 調理器への健康影響に対する国民の懸念は国会でも取り上げられ、社会的問題になっており、健康安全・危機管理の対象となっていることも考慮し、生物学的なハザードの有無を明らかにすることである。そのためには、正確なばく露評価が可能になる細胞用ばく露装置を開発が不可欠である。申請者らは平成 19 年度厚生労働科学研究費補助金特別研究において、ばく露装置の技術的検討を進めた。その知見を生かし本研究においては、初年度に、正確なばく露評価が可能になるばく露装置を開発するとした。更には、細胞研究班によるバリデーションがある。これと平行して次年度以降の動物用電磁界ばく露のあり方等に関する検討も含まれる。

なお、研究の特殊性からばく露装置の開発とばく露量評価を主目的とする電気工學班、ばく露に伴う細胞への影響評価を主目的とする細胞研究班および動物への影響評価を主目的とする動物研究班に分けて、それぞれ報告する。

## <電気工学班>

### A. 研究目的

本研究では、これまでにコンピュータシミュレーションを用いてラットの内部に誘導される電流、電界を調べ、その結果を手がかりに局所磁界ばく露装置の開発を行ってきた。今年度本研究では、動物実験結果とラットの内部誘導量の関連性を述べるために実験条件をふまえたばく露評価を行うことを目的とする。具体的には妊娠ラット用局所磁界ばく露装置において、実験期間中のラット胎児の成長、実験時の胎児の位置の不確定性を考慮したばく露評価を行う。

また昨年度までに製作した磁界発生装置は、単一周波数成分しか出力のできない装置であった。これは、単相インバータに直列共振回路を接続し、インバータのスイッチング周波数成分と回路の共振周波数成分を一致するように動作させたためである。実際のIHクッキングヒータでは、電源周波数(50/60 Hz)の2倍周波数成分で脈動し、振幅変調された電流が流れている場合が一般的である。今年度の本研究のもう一つの目的は、磁界ばく露装置においてもこのような振幅変調された電流を模擬する回路設計製作について検証を行うことである。

### B. 方法

#### 1. ばく露評価方法

##### 1.1 磁界分布計算と内部誘導量計算

生体内部の誘導量の数値計算を行うために生体に入射する磁界分布を計算する必要がある。ビオ・サバルの法則より、微小な長さの電流要素 $IdL$ によって $r$ 離れた距離に作り出す微小磁界 $dH$ は式(1)で表される。

$$dH = \frac{IdL \times \hat{r}}{4\pi r^2} \quad (1)$$

本研究ではこの式とボクセルモデルで作成したコイルを用いて、計算領域内の磁界分布を計算している。

さらに本研究では、変動磁界により生体内に誘導される誘導電流をインピーダンス法で求め、その結果を用いて誘導電界を求めている。

##### 1.3 妊娠ラットモデル

局所磁界ばく露装置のばく露評価に用いるラットモデルは情報通信研究機構で開発されたものであり、MRI画像から作成されたものである。組織数は15となっていて、11匹分の胎児がモデル内に作成されている。胎児の組織は脳組織と脳以外の組織の2組織となっている。妊娠ラットモデル内での生体組織の導電率を表1に示す。導電率の値は4-cole-coleモデルから求めている。なお、胎児の導電率の値はラット母体での組織の比率から重み付けを行い、脳組織とそれ以外の各導電率の値を求めている。

表1 妊娠ラットの各生体組織の導電率 [S/m]

組織なし	0.0	盲腸	0.568
脂肪	0.0240	その他内臓	0.345
筋肉	0.345	胃	0.531
肝臓	0.0607	胎児(羊水)	1.27
肺	0.0971	胎児(実質)	0.2
眼球	0.512	胎児(脳)	0.095
脳	0.0727	皮膚	0.000214
骨	0.00290		

##### 1.5 数値解からの特異値除去

本研究では数値計算において離散化された格子それぞれに電気定数を割り当て、計算を行っている。数値計算ではこのような近似を行うため、電気定数が極端に変化する境界において、実際の物理現象では起こりえない解の振る舞いが観測される。本研

究では人為的に生じる異常な解の振る舞いによる数値を特異値と呼ぶ。ばく露評価において、最大値、平均値等を調査することから、これら特異値を評価から除外することが望ましくICNIRPのガイドラインでも99パーセンタイル値の採用が推奨されている。本研究では特異値除去のために得られた数値解析結果の99パーセンタイル値を採用する。

### 1.6 局所ばく露装置の概要

図1に昨年度開発した装置の外観を示す。外部回路の構成として、大電流をコイルに流すため、インバータと降圧変圧器を用いた磁界発生コイル用電源装置を用いている。大電流によるコイルの温度上昇を防ぐため、ばく露装置の配線として水冷式の銅パイプを使用している。コイルは渦型コイルを5巻きしたものを2段に重ねたものを装置に用いている。ラットへの熱ストレスを防ぐためコイルとラット間の距離を12mmとした。

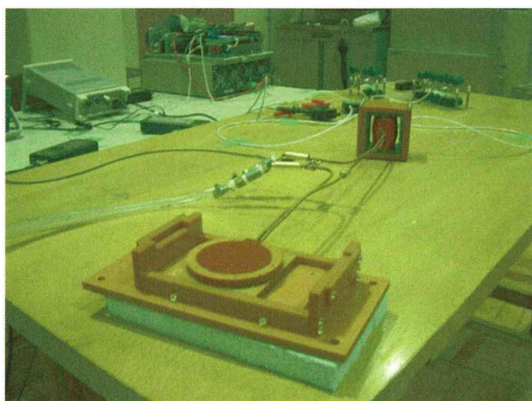


図1 局所ばく露装置の概観  
図2にラットとコイルの位置関係を示す。

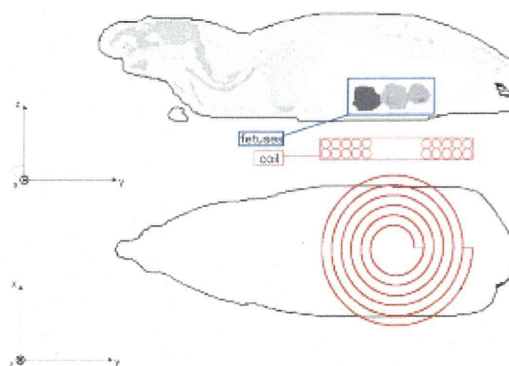


図2 ラットとコイルの位置関係

## 2. 振幅変調回路の検討

### 2.1 回路構成

回路構成は、これまでの磁界発生装置と同一の回路でしかもスイッチのみで単一周波数成分と振幅変調電流を切り替えられるようにすることを目的としているために、昨年度までと同様に単相インバータにLC直列共振回路が接続されている。局所磁界発生装置と同様の回路構成の回路定数としており、また巻数が4：1の変圧器を磁界発生コイルとインバータ間に接続している。さらに、抵抗成分については、コイルとインバータの損失を模擬するために接続している。

### 2.2 制御方式

従来インバータは、デューティー比50%でスイッチングを行う方式を採用していたが、そのままでは振幅変調電流を出力できない。そこで、単相インバータのスイッチング周波数は50%のまま、インバータの左右のレグの位相をずらすことによって、電流振幅を可変する方式を採用した。

## C. 結果と考察

### 1. ばく露評価

#### 1.1 誘導電界の不確定性の基礎検討

開発した装置を用いた動物実験の期間は妊娠7日～17日の間となる。その間にラット内の胎児の位置、大きさが変動することが考えられる。また、妊娠ラットの個体差としてばく露実験するたびにラット内の胎児の位置、大きさが変動することが考えられる。これらの影響により、胎児内の誘導量に不確実性が生じる。不確実性について定量的に知るために解剖学的モデルをベースとして簡易モデルを作成し、内部誘導量を計算した。本研究では、各胎児の内部誘導電界の計算を行った。計算条件、コイルとラットの位置関係は図2で示したものと同様である。表2に計算条件を示す。

表2 計算条件

周波数	20kHz
格子間隔 $\Delta x$	0.5mm
計算領域(セル数)	$192 \times 384 \times 107$
収束判定条件	$1.0 \times 10^{-5}$
コイル形状	巻き数が5の筒型コイルを2段に重ねたもの
コイルとラットとの距離	12.5mm
コイルに流す電流	90A

妊娠ラット内誘導量の不確実性を評価するにあたり、いくつかの不確定なパラメータを変化させばく露量のデータをとることで検討を行う。しかし、実際の妊娠ラットから不均一モデルを作成することは労力、費用がかかり、複数モデルを作成することは困難である。そこで、体内に胎児モデルを配置し、位置を変位させることができる簡易モデルを作成した。

基礎検討として、胎児簡易モデルは妊娠16日目、妊娠20日目のモデルを作成した。ここでは簡易モデルの妥当性とパラメータ変化による誘導電界の変動量について調べることが目的としており、解剖学的モデルとの各胎児の誘導電界値の比較、妊娠期間が異なるモデルによる胎児の誘導電界値の比較を行うため、胎児の位置の移動量を仮定し、その範囲で変位したときの誘導電界値の変動量を検討した。

簡易モデルの組織は母体ラット、胎児ラット、胎児周囲の羊水の3種類で作成している。母体ラットの導電率の値は妊娠ラットモデルの各組織の導電率の値とセル数から割合を計算し、その比から算出している。同様に胎児ラットの導電率の値は胎児の脳とそれ以外の組織との割合から算出している。妊娠ラットモデルの導電率は表1の値を用いた。

簡易モデルの胎児の大きさは動物研究班の協力のもと妊娠ラットを解剖したときの胎児の体重データから求めた。表3に胎児の体重データを示す。

表3 妊娠期間ごとの胎児の体重データ

	妊娠16日目	妊娠20日目
胎児の体重	0.464g	3.55g
胎児を模擬した球の半径	4.8mm	9.5mm

簡易モデルの妥当性を評価するために、解剖学的モデルとの比較を行った結果から、今回作成した簡易モデルは解剖学的モデルの代わりに不確実性の検討を行うことに有用であると考えられた。妊娠期間により胎児が成長することで羊水の厚さが変化することが予想される。そして、羊水の厚さが変化したとき、胎児の内部誘導電界に影響を与えることが考えられる。そのために、羊水の厚さに関しても実際の妊娠ラットの構造と同じものを用いることが望ましい。モデル作成では羊水を含めた胎児の体重データと胎児のみ体重データから羊水の厚さを推定し、簡易モデルに導入することを考えた。

## 1.2 解剖学的構造の導入

これまでの検討から胎児内の誘導電界の不確実性は比較的大きく、無視できないことから、ばく露評価に取り入れる必要が

あることがわかった。ここで、さらに、実際の動物実験の状況に近づけるために解剖学的構造を考慮し、位置の移動とそのときの頻度をふまえた不確定性の検討を行った。しかし、胎児の位置の移動頻度において解剖による観察のみでは推定することが難しい。そこで、動物研究班との議論をふまえ、仮定した確率分布を用い、各胎児の位置での誘導電界の値に重み付けを行った。今後、胎児の位置関係、各位置関係をとる頻度をより精密に推定することで、今回の検討結果より精度の高い結果が得られると考えられる。

### 1.3 確率分布で重み付けした各胎児の誘導電界値

各配置でのモデルを用いて数値計算を行い、得られた各胎児の誘導電界値を確率分布で重み付けした。その結果から子宮中心は変動量が小さく、誘導電界も高い値となる。子宮中心部の胎児はコイルとの距離が近く、胎児の位置についてもあまり動かないことを仮定しているためであると考えられる。また、子宮先端部分の胎児は変動量も大きく、誘導電界は比較的小さな値となる。子宮先端部での胎児は移動の自由度が大きく変動量が大きいことが考えられる。子宮がまっすぐ伸びている場合においてコイルに対して水平方向に距離が離れていること、子宮が折れ曲がっている場合においてコイルに対して垂直方向に距離が離れていることからばく露量が減り、誘導電界が小さくなると考えられた。

### 1.4 動物実験への適用に関する考察

動物実験後の胎児の発生毒性の評価において、動物実験の結果と各胎児の誘導電界値の関係性を調べた。胎児の位置の不確定性の影響について、上記の検討から子宮の位置により誘導電界の変動量が小さい胎

児群、変動量が大きい胎児群に分けられる。実験結果と各胎児の誘導電界値の関係性を調べる際、それぞれの胎児群に分け、評価を行うことを提案する。このとき、誘導電界の変動量が小さい胎児群は誘導電界値が大きく安定した値が得られることが予測でき、より精度の高い評価が行えることが考えられる。変動量が大きい胎児群は誘導電界値が小さい場合での評価を行うこととなる。

動物実験一日の磁界ばく露時間は1~2時間程度としている。このことから胎児の発達の不確定性の影響に関しては、妊娠日数ごとの誘導電界値を調べることで評価が行えると考えられた。

## 2. 振幅変調回路の検討

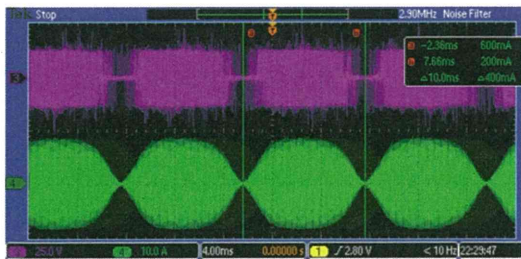
### 2.1 シミュレーション結果

磁界発生装置に流れる電流、ゲート信号、位相基準波形との関係を解析した結果、磁界発生装置の電流波形より、高周波(20kHz)成分の電流波形が振幅変調されていることが確認できた。インバータ出力電圧はそれぞれ20kHz固定であるが、出力電圧パルス幅が変化することにより電流振幅が異なることが確認できる。以上のことより、回路構成を一切変更することなしにゲート信号生成手法の変更のみで振幅変調電流が生成できることをシミュレーションにより明らかにした。

### 2.2 実験結果

図3に実験結果を示す。実験の回路はこれまでに開発した動物用曝露装置の電源装置のインバータの回路とし、その回路パラメータを変更せずに、ソフトウェアの変更のみにより改造した装置である。

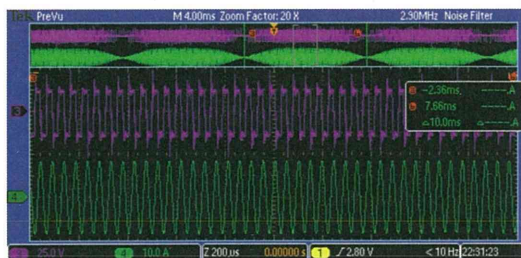




100Hz 変調モード (20.8kHz)  
CH3: インバータ出力電圧 (OUTPUT 端子台)  
CH4: 出力電流

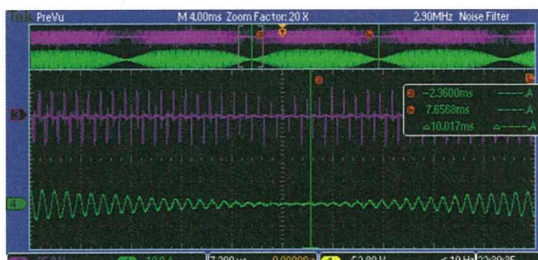
図3 実験結果

図4, 5に電流値が最大の時と最小の時の実験波形を示す。図3より電流波形は振幅変調されており、本研究で検討した手法の妥当性が確認できる。また、それぞれの拡大波形より、20kHzの高周波電流波形形状も正弦波となっており、シミュレーション結果と一致していることが確認できる。



100Hz 変調モード (20.8kHz)  
CH3: インバータ出力電圧 (OUTPUT 端子台)  
CH4: 出力電流

図4 図3の実験結果の電流値最大付近の拡大図



100Hz 変調モード (20.8kHz)  
CH3: インバータ出力電圧 (OUTPUT 端子台)  
CH4: 出力電流

図5 図3の実験結果の電流値ゼロ付近の拡大図

#### D. 結論

本研究では昨年度開発した動物用局所磁界ばく露装置に関して、胎児内の誘導量の不確定性について知るために不均一組織のモデルをベースとして簡易モデルを作成し、数値シミュレーションを行った。まず、胎児の位置の不確定性の影響を検討するため、ラットの前後方向に胎児の位置を2cmの範囲で変位させたときの各胎児の内部誘導電界を計算した。その結果、装置のコイルに90A流した場合、各胎児の内部電界の平均値が2.09V/m以上変動した。次に、成長による胎児の容積の変化の影響を検討するため、各妊娠日数での胎児の重量を手がかりにして、その容積を変え検討した。妊娠16日と20日を比較し、誘導電界が胎児平均で17.2%増加することがわかった。これらのことから、胎児内の誘導電界の不確定性は比較的大きいことがわかり、本研究で検討した不確定性をばく露評価に取り入れる必要があることがわかった。

その後、解剖学的構造の考慮し、位置の移動とそのときの頻度をふまえた内部電界の不確定性の検討を行った。実験時にラット内で子宮の形状が変化することが考えられる。そのような推測から子宮の形状ごとの各胎児の位置を推定し誘導電界の計算を行なった。そして、それら各形状をとる可能性を、仮定した確率分布を用いて表した。そしてそれを基にして内部誘導電界の重み付けを行った。妊娠期間ごとの胎児の内部誘導電界値を計算した結果、子宮先端部分の胎児は移動の自由度が高いことから内部誘導電界の変動量が大きく、子宮のもと付近の胎児はほとんど動かないことから内部誘導電界の変動量が小さくなることがわかった。このことから、動物実験の発生毒性の評価において、内部誘導電界の変動量が

大きくなる胎児群と内部誘導電界の変動量が小さく胎児群に分けることを提案した。誘導電界の変動量が小さい胎児群は誘導電界値が大きく安定した値が得られ、より精度の高い評価が行うことができ、変動量が大きい胎児群は誘導電界値が小さい場合での評価を行えることがわかった。

また、ばく露装置の磁界の波形に関して、現実のIH調理器の波形を反映するため、低周波での振幅変調に関する検討を行った。シミュレーションを行った結果、回路構成を変更することなしに、正弦波形と振幅変調波形を切り替えられる可能性を見いだした。シミュレーションに基づいて検証実験を行った結果、ソフトウェアの変更のみで振幅変調が実際に行えることがわかった。

## <細胞研究班>

### A. 研究目的

本分担研究では、培養細胞を用いた細胞レベルでの IF 磁界ばく露の生物影響評価を実施している。平成 23 年度は、平成 22 年度に引き続き、ヒト乳がん由来細胞を用いたエストロゲンレポータージーンアッセイ系による IF 磁界ばく露によるエストロゲン応答遺伝子の発現変化の有無、DNA メチル化、およびマウス ES 細胞を用いた *in vitro* 発生毒性試験である Embryonic Stem cell Test (EST) に基づいた細胞分化への IF 磁界ばく露の影響を評価することを目的として研究を実施した。

### A. 研究方法

#### 1. エストロゲン応答性に与える IF 磁界ばく露の影響評価

胎児への影響評価の必要性を鑑み、胎児の神経分化過程に関わる代表的な女性ホル

モンの一つであり、その高値は双児や巨大児、低値により胎児死亡や仮死、無脳児の出生の危険性を高めるエストロゲンへの細胞の応答性に着目し、IF 磁界ばく露によるエストロゲン応答性の変化の有無を内分泌攪乱化学物質のスクリーニング系であるレポータージーンアッセイを用いて調べた。

#### 1.1 細胞株

エストロゲンレセプターが高発現している細胞として、ヒト乳がん由来 MCF-7 細胞を選んだ。この細胞にエストロゲン応答配列 (-AGGTCACAGTGACCT-) を tandem に 3 回繋ぎ、その下流にホタルルシフェラーゼ遺伝子を組み込んだ pTransLucent ベクターを導入して形質転換し、さらにクローン化して目的の応答性を持つ細胞を、評価試験に用いる細胞株とした。

細胞株は凍結保存し、各試験毎にインシュリンを添加した MEM 培地にて新しく前培養し、一度植え継いだ細胞を試験細胞とした。ばく露条件や測定法の詳細は、分担報告書に譲る。

## 2. DNA メチル化に対する磁界ばく露の影響評価

IF 磁界に関しては、安全性評価に関する研究報告が極めて限られるため、有害性の評価の中でも特に管理上の大きな要素となる発がん性の有無を調査することは重要である。そのため、本研究ではこれまでに小核、遺伝子変異を対象として、変異原性の評価を行った。その結果、遺伝子修復能力の異なる培養細胞を用いた増殖に対する影響、培養細胞を用いた小核試験ならびに *HPRT* 遺伝子変異試験いずれにおいても、磁界ばく露による影響を認めなかった。しかし、機能性遺伝子の構造や配列などと生

物の関係を研究するジェネティックスに対し、エピジェネティックスと呼ばれる後天的な遺伝子の修飾（例：DNAメチル化、ヒストンアセチル化等）による変化についての研究は近年飛躍的に知見が得られつつあり、発がんや種々の疾病との関連が明らかになりつつある。そのため、エピジェネティックスの指標の一つであるDNAメチル化に着目し、IF磁界ばく露による影響の評価として、細胞ゲノム中のメチル化度を検討した。

### 2.1 細胞株

DNAメチル化の評価には、チャイニーズハムスターの肺由来の細胞であるCHL/IU細胞と、エストロゲン応答の評価に用いたヒト乳がん由来細胞のMCF-7細胞を用いた。

### 2.2 IF磁界へのばく露

凍結保存した細胞を、CHL/IU細胞では $\alpha$ MEM培地に、またMCF-7細胞ではインシュリンを含むMEM培地を用いて培養し、一度植え継いだ細胞を供試細胞とした。細胞の磁界へのばく露の詳細は、分担報告書に譲る。

### 2.3 DNAメチル化度の測定

測定法の詳細は、分担報告書に譲る。

## 3. 細胞分化に与える影響の評価

中間周波数磁界については、WHOも指摘している通り研究例自体が少なく、健康リスクを評価するためには幅広い知見が必要とされている。特に本研究で対象とするIH調理器や鉄道の主インバーターなどに起因する20kHz帯の正弦波磁界の場合、調理作業に起因する妊産婦のばく露なども考慮すべきである。本研究では動物実験班により中間周波数磁界の催奇形性が評価されているところであるが、異なる試験系でも評価

を行うことにより、より信頼性の高い結果が得られると考える。そのため、本節では、特に胎児の発生に関連する細胞の分化に対する影響評価を細胞レベルで行うことを目的とした。すなわち、個体の発生は、受精した卵細胞から、細胞が分裂・増殖すると共に、プログラムされた通りに細胞が分化し、様々な器官を形成する過程を経るが、個体の発生に伴う分化に比較的近い条件で影響評価が可能な動物代替試験法であるEmbryonic Stem Cell Test (EST)法に準じた方法で、IF磁界が細胞分化に与える影響の評価を行った。

### 3.1 細胞株

細胞株として、マウス由来のES細胞D3株(ATCC CRL-1934)を用いた。

### 3.2 細胞分化試験

試験法の概要を図6に示すが、その詳細は、分担報告書に譲る。

### 3.3 細胞増殖測定

測定法の詳細は、分担報告書に譲る。

## B. 研究結果

### 1. エストロゲン応答性変動評価

磁束密度0mT(装置環境確認のための疑似ばく露)、および2, 3, 3.9mTのIF-MFによる24時間のばく露を37°C、5%CO<sub>2</sub>、湿度100%のインキュベーター内で行った(n=3以上)。2標本t検定を行った結果、DMSO群、E2処理群において、ばく露群、非ばく露群間で、最大3.9mTまでのいずれのばく露条件であっても、有意差は認められなかった。有意水準は5%で検定した。

また、24時間ばく露の条件に加え、細胞応答の時間変動などを考慮し、長時間のばく露試験の検討に着手した。今年度は、本試験系における最長のばく露可能時間である

4 日間のばく露について、2mT における予備的な検討までを行った。その結果、これまでに生物学的に有意と考えられるような影響は認められていない。

## 2. DNA メチル化度の評価

今年度は CHL/IU 細胞と MCF-7 細胞それぞれのメチル化度に関する予備的な検討として、0mT(装置環境確認のための疑似ばく露)と 2mT の条件を検討した。現在まで、磁界ばく露による有意な影響は認められていないが、測定された DNA メチル化量は、使用した測定キットの下限に近く、そのため実験間も含め誤差が大きい結果となった。今後、測定を行う際の DNA 量の検討、ばく露条件を変えた試験サンプルの調整を行い、ゲノム DNA のメチル化度の測定を進める。また、試験に供する細胞については、今回用いた細胞に加え、ヒト正常細胞を用いた検討を行う予定である。

## 3. 細胞分化に与える影響評価

### 3.1 マウス ES 細胞の心筋への分化を指標とした細胞分化に対する影響

0mTの結果から、ばく露装置で培養した細胞群と疑似ばく露装置で培養した細胞群では、拍動する細胞塊の割合に統計的に有意な差はなかった。したがって、IF磁界ばく露装置と疑似ばく露を行う装置とは、培養条件がほぼ同等であることを確認したといえる。この結果を踏まえて、IF磁界のばく露実験を行った。今年度は、磁束密度3.9mTのIF磁界ばく露試験を進めたが、結果としてIF磁界ばく露群と疑似ばく露群では統計的に有意な差は認められなかった

また、培養 5 日目の胚様体の大きさや培養 10 日目の細胞塊の大きさを顕微鏡観察

したところ、陽性コントロール群は疑似ばく露群と比較して顕著に小さかったのに対し、IF 磁界ばく露群との比較では、その差はほとんど認められなかった。

以上の結果より、IF 磁界ばく露は、3.9mT であってもマウス ES 細胞の心筋への分化に影響を与えないことが示された。

### 3.2 マウス ES 細胞の増殖への影響

今年度は、予備的な検討として、0mT (装置環境確認のための疑似ばく露) の条件で、細胞増殖に違いがないかどうかの確認を行った。この結果、ばく露装置と疑似ばく露装置では、細胞増殖に差が見られないことが確認された。しかし、今回行った実験条件では、各ウェル間でデータのばらつきが大きかった。このことは、細胞の初期添加量 50cells/well と少なかったことが原因と考えられた。今後、細胞の初期添加量を増加させたばく露実験により試験条件を確定し、IF 磁界曝露が分化能を保持した細胞の増殖に与える影響の評価を行う予定である。

## C. 考察

人体ばく露防護のための国際的なガイドラインとして、国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) や IEEE (米国電気電子技術者協会) からそれぞれガイドラインや規格が発行されている。特に ICNIRP のガイドラインは、欧州連合において磁界ばく露からの人体防護の指針となっているほか、日本においても 2011 年に同ガイドラインに準拠した磁界規制が電力設備に関して導入された。2010 年に改訂されたガイドラインでは、本報告で検討した 21kHz の磁界ばく露に関しては、参考レベルとして一般環境で 27 $\mu$ T、職業環境で 100 $\mu$ T が示されている。ただし、この ICNIRP ガイドラインは、低

周波磁界については神経刺激などの影響を防止するために策定されたものであり、その他の影響については、科学的根拠が確立していないため、対象としていない。その理由として、商用周波数ではこれまでの研究結果が一貫していないことが指摘され、科学的根拠が弱いことが挙げられているが、本研究の対象である IF 磁界については、健康リスク評価を行うための十分な研究が行われていないことも一因であると考えられる。

本研究は、日本において普及が進む IH 調理器などから漏洩する 20kHz 帯の IF 磁界について、一般の関心が高いものの、研究が限られ科学的不確かさも高い、発がん性、内分泌かく乱性、催奇形性について、科学的な不確かさを減らし、必要な情報を得るための研究として実施した。細胞レベルの研究としては、これまでに、発がん性に関わる影響として、変異原性における結果が中園および宮越らにより報告されているものの、ホルモン応答（内分泌かく乱性との関連）、エピジェネティック作用（発がん性との関連）、細胞の分化に与える影響（催奇形性との関連）については報告された例がない。

そのため、本研究では、エストロゲン応答性に関する影響、細胞分化に及ぼす影響を主として進め、また DNA メチル化に関する予備的な検討を行った。その結果、IF 磁界 (21kHz) が、上記の ICNIRP のガイドラインにおける一般環境の磁界参考レベルの 144 倍となる最大 3.9mT の強度であっても、その 24 時間ばく露ではエストロゲン応答性に関して影響は認められず、また 10 日間ばく露によるマウス ES 細胞の分化への影響も認められなかった。また、予備的に実

施したエストロゲンによる遺伝子の長期的応答性を考慮した長期ばく露による影響、DNA メチル化についても顕著な影響は認められていない。今後、これらの試験データを蓄積し、3.9mT までの結論を得る予定である。

#### D. 結論

本研究により、21kHz、最大 3.9mT の IF 磁界には、ヒト乳がん由来細胞におけるエストロゲン応答性への 24 時間程度の短時間ばく露の影響がないこと、また 10 日間の曝露であってもマウス ES 細胞の分化に対する影響がないことが明らかとなった。この結果から、IF 磁界ばく露の内分泌かく乱性や催奇形性は無いか、極めて低いことが示唆される。

今後、エストロゲン応答性への長時間ばく露の影響、DNA メチル化に関する影響等を評価し、これまでの試験データと合わせ、発がん性、内分泌かく乱性、催奇形性についての *in vitro* での総合的な評価を行う。

#### <動物研究班>

##### A. 研究目的

今年度は、電気工学班と協働して、21kHz の正弦波形の強い磁界を局所にばく露することが可能なばく露装置を開発し、本装置を用いたドシメトリ解析を行う一方で、妊娠ラットを用いて、現行の ICNIRP ガイドライン値より 400 倍強い磁束密度である 10.3mT の磁界（ラットの腹部中心における平均）を 1 日 1 時間のばく露を行った際の胎児への影響を調べた。

なお、生殖発生毒性を評価するための試験として OECD 毒性試験ガイドラインの催奇形性試験の試験法においては、ラットの

使用を推奨し、交配確認後、器官形成期にあたる期間（ラットでは妊娠7日～17日）で対象物質を毎日投与することとしている。

本研究では、OECDガイドラインを参考にラットを用いて器官形成期に中間周波磁界をばく露することでヒトへの健康リスクに関して予知的・探索的な研究を行うことを

### 3. 交配と群わけ

10週齢の雌ラットの交配適期を判定した後、12週齢の雄ラットを1:1で同居させた。翌朝、膣スメアをとり、ギムザ染色をし顕微鏡下で精子の有無を調べ、精子を確認した場合を交配確認日（妊娠0日）とした。

交配は基本的に1日に3匹おこない、全

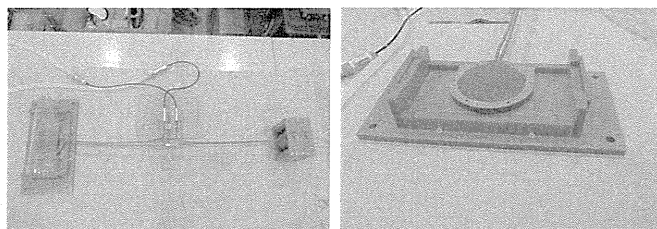


図7 磁界ばく露装置の概要  
(左上) コイルとコンデンサ、(右上)

目的とする。

## B. 方法

### 1. 磁界ばく露装置

実験動物用中間周波局所ばく露装置は、平成22年度の本補助金を用いて製作したものを用いた（図7）。今回はばく露群用のコイルだけでなく別室に設けたシャムばく露群用のコイルにも同様の冷却水循環装置を接続し、冷水を流すことでポンプからの微振動なども同条件になるようにした。

### 2. 動物

実験には、Slc:SD(Splague Dawley)系統のラットを使用した。実験（交配）開始日に雄は12週齢、雌は10週齢となるように購入時の週齢を調整し、実験開始まで飼育室内で馴化した。

て交配が成立した場合には3匹を無作為にシャム群、ばく露群、ケージコントロール群に割り付けをおこない、その3匹を1グループとして扱った。交配成立したラットが1～2匹であった場合は翌日も交配をおこない、3匹に達するように調整を行った。

### 4. 磁界ばく露

妊娠を確認した動物は飼育室において飼育を継続し、毎日午前中に体重を記録すると共に、妊娠7日～17日まではばく露の操作を行った。ばく露群及びシャム群の動物は図7に示すように、専用のアクリル製保定器にラットを保定した上でばく露装置のコイルの上に固定し、1時間のばく露またはシャムばく露を行った。

1時間のばく露終了後は直ちにラットをもとのケージに戻し、無用な拘束を行わないようにした。なお、ケージコントロール

群は保定器に入れずにケージ内で飼育を継続した。

ばく露期間中は毎日1回体重を測定および動物を観察し外見上の健康状態を確認した。

#### 5. 血液学的検査

母獣は妊娠20日に深麻酔下開腹し、心採血をおこない、血液は直ちに血液生化学分析に供した。

#### 6. 血液生化学の分析

ヘパリンリチウム含有微量採血管に採取した血液は直ちに動物用・生化学自動分析装置 VS2 (アバクシス社) を用いて分析した。

#### 7. 血球分析

EDTA 含有微量採血管に採取した血液は直ちに動物用・自動血球計測装置 HM2 (アバクシス社) を用いて分析を行った。

#### 8. 剖検

雌親は生化学分析と血球分析のための採血の後、脱血させ胸腺を摘出した。また、開腹しあとで、胎児の空間的な位置情報がわかるように写真撮影・記録を行った。その後子宮を観察し胎児数、着床痕数を調べた。

#### 9. 外表検査・内臓検査

外表検査・内臓検査用の標本については摘出胎児を10%中性緩衝ホルマリン液(和光純薬)に浸漬し、数日後にブアン固定液(和光純薬)に交換し、さらに数日後飽和ピクリン酸水溶液に交換して剖検に供した。

#### 10. 骨格検査

胎児の骨格をエタノールで固定し、その後アルシアンブルー、アリザリンレッド S による染色を常法に従って行い、最終的にグリセリンに浸漬した骨格標本を作成し検査に供した。

#### 11. 動物実験の倫理的配慮

本研究は、国立保健医療科学院動物実験委員会の承認を得て実験をおこなった。実験の実施にあたっては、関連法令、指針を遵守しておこなった。

#### 12. 統計処理

得られた数値データに関しては、一元配置分散分析により群間差の有無について調べ、群間差があった場合は、ケージコントロール群に対しての有意差を検出した。

### C. 結果

#### 1. 母獣への一般毒性評価と繁殖成績

今年度はばく露群、シャムばく露群、ケージコントロール群各11匹計33匹を実験に供した。ばく露群では周波数20.8kHz、コイル中心磁束密度(ラットの腹部中心表面)は10.30 mT の正弦波形の磁界を胎児の器官形成期である妊娠7日~17日の毎日午前中に1時間のばく露を行った。ばく露中、母獣の健康状態は良好であった。剖検を行った妊娠20日目の母獣から採血をおこない、その血液生化学分析、および血球分析を行った。その結果、検討した全ての項目において群間の差は見られず、ばく露の影響はないものと考えられた。ばく露群、シャムばく露群においてはケージコントロール群より体重が少ない傾向が見られたが、統計的有意差は見られなかった。体重が少ない理由としてはばく露を行う際に1時間



保定によるストレスの可能性がある。

母獣1匹あたりの胎児数胎児数について群間差は認められなかった。また、胎児1匹あたりの重量も群間差は認められなかった。

着床痕の有無については、ばく露群では母獣11匹中5匹、同様にシャム群では3匹、ケージコントロール群では3匹に着床痕を有する個体が観察された。この場合のカイ二乗値は0.91 ( $p=0.63$ ) であり、有意差は認められなかった。また、着床痕の個数別の母獣の分布については、ばく露群において1個体で着床痕を5個持つものがあつたが、これについては現時点では再現性がないため個体特有の他の要因によるものではないかと推測している。着床痕以外に胎児の途中死亡例がばく露群とシャム群で各1匹ずつ確認された。

## 2. 胎児の外形異常

検査胎児の外表観察異常について本研究では、全215検体を調べたが、そのうち一部の胎児に異常が認められた。異常に関しては、致死性であり発育や機能に悪影響を及ぼす永久的な構造の変化を奇形、構造的に通常の範囲を超えた変化であっても生存に影響しないものを変異と定義し解析した。

異常と判定したもののうち、ばく露群の1個体は奇形（口蓋裂）と判定された。またそれ以外の例は全て変異として考えられる口蓋ヒダ不整列であつた。この結果から、シャムばく露において、口蓋ヒダ不整列が他の群に比べ多めに発生しているが、保定のストレスがなんらかの影響を与えている可能性も考えられる。一方でばく露群とケージコントロール群と同程度の発生率を示しているため、今後例数を増やして検討が

必要である。また、ばく露群の奇形（口蓋裂）は、統計的に数が不十分であることから偶然の可能性もあり、今後さらなる検討が必要と考えられる。

## 3. 胎児の内臓異常

検査した胎児の内臓異常について全215検体を調べたが、そのうち一部の胎児で異常が認められた。異常に関しては、致死性であり発育や機能に悪影響を及ぼす永久的な構造の変化を奇形、構造的に通常の範囲を超えた変化であっても生存に影響しないものを変異と定義し解析した。

異常と指摘された検体はケージコントロール群に比べてばく露群、シャム群に多い傾向があるが統計的な差は見られなかった。

奇形の発生率についてはばく露条件による一定の傾向は見られなかった。

一方、変異については、いずれの群においても「胸腺頸部遺残」が多くを占め、それ以外に「左臍帯動脈」、「腎盂拡張」「尿管拡張」も少数例であるが見られた。

## 4. 胎児の骨格形成の異常

検査した胎児の骨格形成についての結果全体として、統計的な有意差は見られないが、ばく露群に異常個体が多い傾向があり、今後例数を増やし検討をする必要がある。

## 5. 母獣の腹単位の奇形発生頻度

OECDガイドラインを始め、催奇形性の評価については、異常を呈した胎児の数で評価するよりも、異常を呈した胎児をもつ母獣の割合で評価をおこなうことが推奨されている。本実験でも母中の腹単位での奇形発生頻度を比較した。各群11匹中、奇形を呈した胎児を持った母獣はばく露群3匹、



シャム群 1 匹、ケージ群 2 匹であり、現時点ではばく露群に有意に奇形発生率が多いということとはなかった。

#### D. 考察

本研究では、中間周波磁界が胎児の発生に与える影響を調べるため、ラット胎児の器官形成期にあたる期間で磁界ばく露をおこない、その生殖発生毒性を評価した。これまでに IH 調理器から放射される磁界を問題にした催奇形性試験は西村らによっておこなわれた研究があるのみである。西村らはラットに一樣な垂直磁界をばく露し、その催奇形性が見られないことを明らかにしているが、いくつかの考慮すべき問題点も考えられる。具体的には、実際の IH 調理器での調理作業は妊婦の腹部が調理器に接近した状態で使用するため、妊婦（胎児）に対して不均一な磁界に晒される点が実際のばく露と異なる点と、西村らの用いた磁界強度が 0.2mT であり、誘導電界に換算するとそれほど強い強度ではない点が挙げられる。本研究ではこれらの点を考慮し、ラットの腹部に局所的に強磁界をばく露するための実験系で実験を行った。腹部に局所的に磁界に晒すことはすなわち、母獣と胎児にとって不均一な磁界に晒されることを意味する。局所的に強磁界に晒すため、私たちは平成 22 年度の本研究で専用のばく露コイルを開発し、本実験に使用した。このコイルでばく露するためにはラットを専用の保定筒に保定しばく露をおこなうため、妊娠ラットの数値モデルを用いて、詳細なドシメトリを実施することが可能となった。ドシメトリに関しては本研究報告書の工学班の項を参照して頂きたい。

動物実験では 21kHz の正弦波形磁界を SD

ラットの胎児器官形成期である妊娠 7 日～17 日にばく露し、妊娠 20 日に解剖して胎児を摘出し胎児を常法に従って検査した。本研究では、ばく露群とシャムばく露群並びにばく露時の保定を一切行わないケージコントロール群の計 3 つの群を作り結果を比較した。これら 3 群の間で、妊娠中の母獣の体重増加、血液学的検査、血液生化学検査、胸腺重量において有意な差は見られず、また生存胎児数、胎児 1 匹あたり重量においても群間の有意な差は見られなかった。また胎児の外表検査や内臓検査、骨格検査をおこない異常の有無を調べた。異常に関しては、内臓観察の分類において、致死性であり発育や機能に悪影響を及ぼす永久的な構造の変化を奇形 (malformation)、構造的に通常範囲を超えた変化であって生存に影響しないものを変異 (variation) と定義することが多いため、本研究でもこれに従うこととした。骨格検査では、自然発生で発現頻度高率の異常を変異とみなし検査を進めた。

今回の結果は、外表、内臓、骨格の奇形の発生に関しては、統計学的な有意差を示すことはなかった。現時点では準備した母獣が各群 11 匹であり、OECD 毒性試験ガイドラインの催奇形性試験で示されている各群少なくとも 20 匹を下回る状況であるため、引き続き実験を重ね、十分な検体数を得る必要がある。

軽微な異常である変異については、骨格検査において、ばく露群において他の 2 群に比べてやや多い傾向 (カイ二乗値 5.20,  $p=0.074$ ) が認められたが有意ではなかった。変異の種別に見ると、外形検査では口蓋ヒダ不整列が、内臓検査では胸腺頸部遺残が、骨格検査では胸椎体ダンベル状骨化が多く

見られた。一般的に口蓋ヒダ不整列は、発生頻度が増加している場合、投与用量に対応して他の部位の異常が増加する可能性があるかもしれないと考えられている一般的な変異であるが、シャム群でケージコントロール群に比べて多く見られる傾向があるものの、ばく露群ではケージコントロール群と同程度の発生率であった。また、内臓変異で胸椎体頸部遺残はばく露、シャム群で多い傾向が認められるが有意なものではなかった。同様に、骨格変異では胸椎体ダンベル状骨化がばく露群で多い傾向が認められるが有意ではなかった。今回の研究の結果においてもさらに例数を増やした上で、今年度の電気工学班の成果である解剖学的構造に基づいたドシメトリの考え方を取り入れ詳細に検討を進めていく必要があると考えられる。

今年度は、昨年度までに開発した局所用ばく露装置を用いてばく露実験を行い胎児への影響の調べるための実験を開始し、現時点では磁界ばく露による胎児の奇形の有意な発生は見られないことを報告した。現時点では十分に考慮できていなかった高周波音やコイルの発熱といったアーチファクトにも配慮した実験を進めて、現時点ではデータが少ない生活環境における中間周波磁界のリスク分析に資する基礎資料を提供する必要がある。

#### E. 結論

妊娠ラット腹部表面中心で 21kHz、約 10mT の正弦波磁界ばく露を胎児の器官形成期にあたる妊娠 7～17 日まで 1 日 1 時間おこない、20 日目に解剖し胎児への影響を調べたところ、現時点で磁界が奇形の発生に影響を与えないことが明らかになった。IH

調理器で使用されている正弦波磁界での催奇形性試験の例はこれまで少ない。今後、十分な例数の確保のために継続して研究を進めていくことで、リスク評価に向けての科学的なエビデンスを提供できると考えられ、国民の健康を守る重要な知見となることが期待できる。

#### <倫理面への配慮>

動物実験における倫理的配慮として、実施にあたっては、国立保健医療科学院動物実験委員会の承認を得た上で、「厚生労働省の所管する実施機関における動物実験等の実施に関する基本指針」および関連法令、規程を遵守して行った。

#### <健康危険情報>

該当事項は無かった。

#### <研究発表>

- (1) 鈴木伸也, 和田圭二, 鈴木敬久” 2 重渦巻コイルを用いた動物用局所磁界曝露装置,” 電気学会産業応用部門大会 no.1-118, 2011.
- (2) Y. Hirai, Y. Suzuki, K. Wada, K. Wake, M. Taki, A. Ushiyama, C. Ohkubo, ”Development of the exposure apparatus with the localized magnetic field at 20kHz for pregnant rats,” The 33rd Annual Meeting of Bioelectromagnetics Society, Halifax, Canada, 2011.
- (3) 平井佑樹, 鈴木敬久, 鈴木伸也, 和氣加奈子, 和田圭二, 多氣昌生, 牛山明, 大久保千代次 ”妊娠ラット用ばく露装置の開発とドシメトリによる評価”, 環境電磁工学研究会, IEICE-EMCJ2011-71, pp. 1-6, 北海道大学, 2011.

- (4) 平井佑樹,鈴木敬久,和氣加奈子,和田圭二,多氣昌生,牛山明,大久保千代次, ”妊娠ラット用 20kHz 局所磁界ばく露装置における胎児の内部誘導電界の不確定性の検討 ”, 電子情報通信学会総合大会, 岡山大学, 2012.
- (5) 吉江幸子,池畑政輝,鈴木敬久,和田圭二,和氣加奈子,酒井泰二,中園聡,多氣昌生,大久保千代次,哺乳類細胞を用いた中間周波磁界の変異原性評価,第84回産業衛生学会,2011年5月,東京
- (6) M. Ikehata, S. Yoshie, T. Hayakawa, Y. Suzuki and M. Taki, EMFs in Railway system -Evaluation of Biological Effects and Current Trends of its Health Risk Assessment-, WCRR2011, May 2011, Lille.
- (7) M. Ikehata, K. Wada, Y. Suzuki, S. Yoshie, T. Sakai, K. Wake, S. Nakasono, M. Taki and C. Ohkubo, Evaluation of Genotoxic Effects of Intermediate Frequency Magnetic Field in in vitro Micronucleus Assay Using CHL/IU Cells, XXX URSI-GA, Aug. 2011, Istanbul
- (8) S. Yoshie, Y. Suzuki, K. Wada, K. Wake, T. Sakai, S. Nakasono, M. Taki, C. Ohkubo, and M. Ikehata, Estimation of Mutagenic Effects of Intermediate Frequency Magnetic Field using mammalian cells, XXX URSI-GA, Aug. 2011, Istanbul
- (9) Y. Ogasawara, M. Ikehata, R. Sakaguchi, S. Awano, S. Yoshie, C. Ohkubo and K. Ishii, Effects of exposure to intermediate frequency magnetic fields on gene expression of estrogen-regulated gene in MCF-7 cells, XXX URSI-GA, Aug. 2011, Istanbul
- (10) M. Ikehata, Evaluation of Biological Effects of Magnetic Fields -from static to intermediate frequency- ISAP2011, Oct. 2011, Jeju.
- (11) 小笠原 裕樹,坂口 涼,栗倉 志歩,石井 一行,池畑 政輝\*,吉江 幸子,大久保千代次,エストロゲン応答性レポータージーンアッセイを用いた中間周波磁界の生物影響評価,マグネティックス研究会, MAG-11-080, 2011年11月,我孫子
- (12) 大谷真,牛山明,海野愛子,平井佑樹,鈴木敬久,和田圭二,樺田尚樹,大久保千代次. 齧歯類を用いた in vivo 中間周波磁界ばく露のための新規ばく露装置の開発. 第50回日本生体医工学会大会. 2011.4.29-5.1. 東京,同プログラム・抄録集 p.284
- (13) 牛山明,海野愛子,大谷真,鈴木敬久,和田圭二,樺田尚樹,大久保千代次. ラットにおける中間周波磁界の全身曝露影響に関する研究. 第50回日本生体医工学会大会. 2011.4.29-5.1. 東京,同プログラム・抄録集 p.347
- (14) Ushiyama A, Unno A, Ohtani S, Suzuki Y, Wada K, Kunugita N, Ohkubo C. The effects of 21 kHz intermediate frequency magnetic fields on blood properties and immune systems in rats. The 33rd Annual Meeting of Bioelectromagnetics Society. 2011.6.12-17. Halifax, Canada
- (15) Wada K, Suzuki Y, Ushiyama A. Experimental Verification of a Localized Magnetic Field Generator Using a Two-Layered Coil. The 33rd Annual

- Meeting of Bioelectromagnetics Society.  
2011.6.12-17. Halifax, Canada
- (16) Ushiyama A, Unno A, Ohtani S, Suzuki Y,  
Wada K, Kunugita N, Ohkubo C.  
Short-term whole body exposure of  
intermediate frequency magnetic fields to  
rats does not affect blood properties and  
immune systems The XXX General  
Assembly and Scientific Symposium of  
the International Union of Radio Science  
(Union Radio Scientifique Internationale-  
URSI), 2011.8.13-20, Istanbul, Turkey,  
abstract CD-ROM.
- (17) 牛山明, 大谷真, 海野愛子, 樺田尚樹.  
中間周波電磁界の生体影響評価、第 28  
回全国衛生化学技術協議会年会、  
2011.11.10-11.11, 同予稿集 p.258-259
- (18) 牛山明, 大谷真, 樺田尚樹, 鈴木敬久,  
和田圭二, 大久保千代次. 中間周波電  
磁界の生体影響に関する研究, 電気学  
会マグネティックス研究会,  
2011.11.16-17, 千葉県我孫子市, 同資  
料集 p.39-43
- <知的財産権の出願・登録状況>  
無し