

20123700/A

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

平成24年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 大久保千代次

平成25(2013)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) . . . . . 17

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) . . . . . 31

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) . . . . . 43

牛山 明、櫻田尚樹

II. 研究成果の刊行に関する一覧表 . . . . . 59

III. 研究成果の刊行物・別刷 . . . . . 61

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。

電気工学班ではこれまで開発してきた細胞用ばく露装置、動物用ばく露装置（一様磁界ばく露タイプ・局所磁界ばく露タイプ）の保守とばく露管理を行った。ばく露評価として母獣と胎児の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。このことから、比較的誘導電界値が大きな胎児のグループは安定した値が得られ、誘導電界の変動量が小さい胎児群であることがわかった。またばく露装置にラットが正常に配置された状態では入射磁束密度の各胎児間のばらつきは、誘導電界のばらつきよりも小さいことがわかった。さらにPWMインバータとデジタル制御器を用いた新しいタイプのばく露装置の制御方法について検討し、コイルの構成を変えずに、磁界の空間分布形状を制御できる可能性を見いだした。

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、内分泌かく乱性の評価とし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磁界ばく露の影響を遺伝子発現のレベルで評価した結果、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学班、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

H24年度、本研究では細胞用、動物用ばく露装置に関して正確なばく露が行えるように保守管理を行う。また数値ドシメトリに関しては、各胎児間の入射磁界のばらつきと誘導電界のばらつきについて考察する。ここではそれらの妊娠日数に対する依存性についても調べる。そしてばく露コイルの位置がずれたときの現象についても検討を行う。さらにばく露装置の新しい制御法として、複数のインバータ電源とコイルを使った磁界の時空間分布の精密制御について検討する。これにより、今後の磁界ばく露装置に関してより自由度の高いものを提案できると考えられる。

## B. 方法

### 1. ばく露装置の保守管理

細胞用ばく露装置、動物用一様磁界ばく露装置、動物用局所磁界ばく露装置に関する保守管理については、細胞研究班および動物研究班と普段の装置の動きに関して常時連絡をとり合うことにより行う。装置に設置した電流モニター値に関して注意を払い、異常な値が出力された場合には各班と協議を行うような体制をとった。

### 2. シミュレーションによるドシメトリ

#### 2.1 磁界分布計算

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数値計算により求めた。本研究ではビオ・サハールの法則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。ボクセルモデルを用いた場合での磁界分布の精度については円形コイルのモデルを用いて、理論解と比較を行っており、1.7%程度の誤差であり、ボクセルモデルを用いた影響が十分に小さいことを確認して

いる。

#### 2.2 インピーダンス法

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。インピーダンス法は生体を分割された各セルで近似し、各セルの辺をインピーダンス $Z$ で仮定して磁界が入射したときの各辺の電流を求める方法である。

#### 2.3 誘導電流密度・誘導電界の算出方法

インピーダンス法では未知数が誘導電界であり、第一量として誘導電流が求まる。誘導電界は誘導電流密度 $J$ を導電率 $\sigma$ で割ることで誘導電界求まる。ボクセルごとの誘導電界を求めるために、誘導電流密度、導電率は同じ位置( $i, j, k$ )の値を用いている。

### 3. ばく露装置制御方式の検討

本研究では複数台コイルを用いた磁界曝露装置の設計について検討した。複数のインバータとコイルを組み合わせることでこれまでの1つのコイルでは困難であった磁界分布を出力することが可能になる。また、これまでの共振回路を用いた磁界曝露装置と違い、正弦波電流出力のインバータを使用することで制御パラメータのみの変更をするだけで異なる磁界出力が可能となる。

## C. 結果と考察

### 1. ばく露装置の保守管理

本年度の実験において、細胞用ばく露装置、動物用ばく露装置ともに設計通りの動作をしており、目標の磁界強度及び空間分布でばく露が行われていたことを確認した。

## 2. ドシメトリに関する考察

### 2.1 誘導電界と磁束密度の比較

局所磁界ばく露装置において誘導電界と磁束密度のばらつきが各胎児においてどの程度の量になっているかを比較した。

図1に解剖学的モデルにおける各胎児（胎児数は11）における磁束密度の平均値と全胎児平均値を示す。また図2に胎児内誘導電界の各胎児の平均値と全胎児平均値を示す。コイルに流す電流が90Aの時、コイル中心の直上において19.1mTの磁界を発生する。このとき磁束密度の全胎児平均値は4.55mTであり、標準偏差は1.33mTである。また誘導電界に関しては全胎児平均値が3.01V/m、標準偏差は1.71V/mである。平均値に対して標準偏差は磁束密度に関しては29%、誘導電界に関しては57%である。このように磁束密度のほうが誘導電界よりもばらつきは小さくなっている。ただし、胎児の大きさがすべて同じである簡易モデルを使用した場合磁束密度のばらつきと誘導電界のばらつきは同程度になる。このように胎児の大きさのばらつきが内部誘導量のばらつきに大きな影響を与えることがわかる。

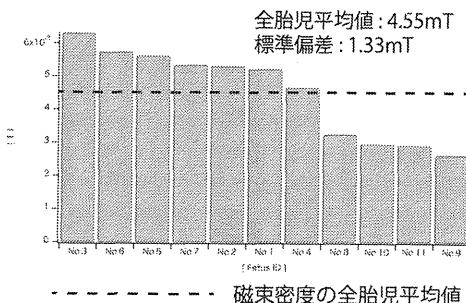


図1 解剖学的モデルにおける各胎児に射入する磁束密度の平均値

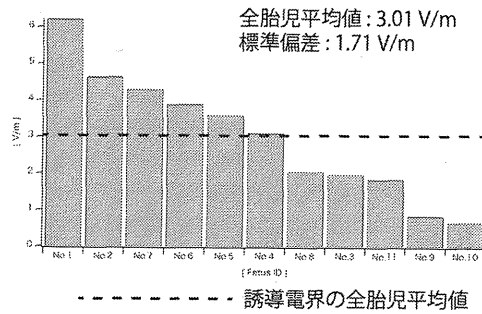


図2 解剖学的モデルにおける各胎児の内部誘導電界の平均値

コイルの中心位置がずれて、より尾の付け根に近づいたときの場合について考察する。ここでは尾の付け根の基準点からコイルの中心までを25mmとした。このときの入射磁界、誘導電界それぞれの標準偏差を平均値で規格化した値の妊娠日数に対する依存性を図3に示す。コイルが尾の方にずれた場合、入射磁界のばらつきが誘導電界よりも大きくなっている。このように、コイルの位置によって、入射磁界と誘導電界のばらつきが逆転することもあることが分かる。また妊娠日数が大きくなるに従って、入射磁束密度、誘導電界の両方の標準偏差が大きくなっていることがわかる。

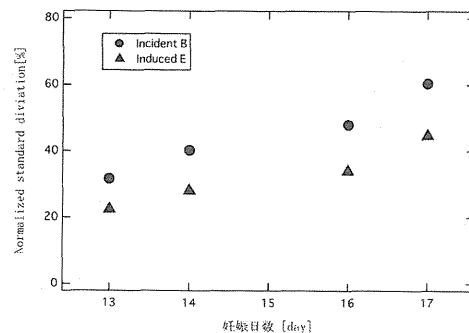


図3 各胎児への入射磁界と誘導電界に関する規格化された標準偏差の妊娠日数に対する依存性 (●磁束密度、▲誘導電界)

### 3. ばく露装置の制御方式に関する検討

#### 3.1 試験装置

今回必要な±5%の均一領域をラット 1 匹分の大きさ（長さ 160mm、幅 56mm）とする。ソレノイドコイル場合では、均一領域を大きくするにはコイル径よりコイル長を長くすることが必要になるので、コイル内径を 76mm、コイル長を必要な領域の 2 倍の 320 mm とする。また、電線は電線径  $\phi=4\text{mm}$  のリッツ線を使用するので、coil1 と coil2 の巻数は 40 巻づつ（合計 80 巻）となり、このパラメータで試験コイルを製作した。

#### 3.1 実験結果

図4にcoil1とcoil2に同位相の電流を流した場合の各インバータ出力電圧波形と電流波形を示す。図のように各コイルに流れる電流は同位相で指令値通りの20kHz正弦波出力していることを確認できる。

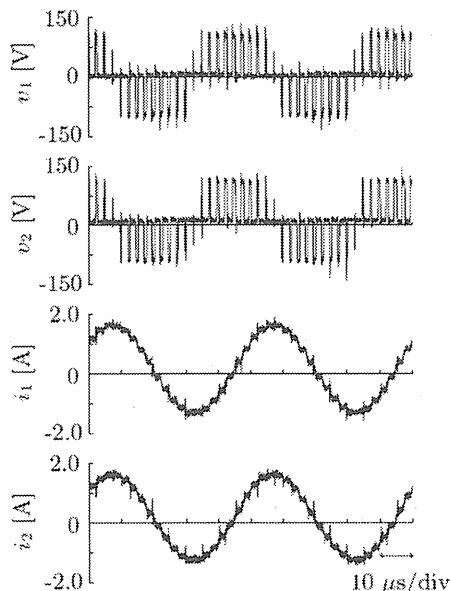


図4 coil1 と coil2 に同位相の電流を流した場合の出力波形

図5にcoil1とcoil2に逆位相の電流を流した場合の各インバータ出力電圧波形と電流波形を示す。図のように、各コイルに流れ電流は逆位相で指令値通りの20kHz正弦波出力していることを確認できる。

PWMインバータとデジタル制御器を用いた磁界曝露装置を使用することで、同一装置の制御パラメータ変更により任意の磁界出力や制御が可能であることが確認できた。

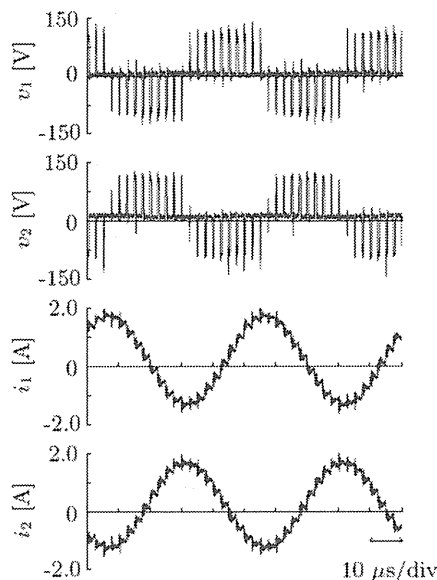


図5 coil1 と coil2 に逆位相の電流を流した場合の出力波形

#### D. 結論

本年度は開発した磁界ばく露装置のばく露管理と保守を行った。これにより本プロジェクトでは細胞実験及び動物実験における磁界ばく露量、内部誘導量を適正に評価できている。また数値ドシメトリに関しては各胎児に入射する磁束密度のばらつきと内部誘導電界のばらつきに関して比較を行った。その結果、設計したラットとコイルの位置関係では誘導電界のばらつきが入射磁束密度のそれよりも解剖学的モデルでは

大きなことがわかった。しかしこの関係はコイルの位置ずれによって逆転することも分かった。また胎児の成長に依存して、入射磁束密度、誘導電界の各量のばらつきが大きくなることがわかった。さらにばく露装置の新しい制御方式に関して検討し、試験的な装置の実装を行った。その結果PWMインバータとデジタル制御器を用いることにより、同一のばく露装置で磁界分布の制御がある程度任意に出来ることが確認できた。

## <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 24 年度は、引き続き、内分泌かく乱性の評価としてヒト乳がん由来細胞を用いたエストロゲンレポーター遺伝子アッセイ系による 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。

### B. 研究方法

#### 1. IF 磁界ばく露による内分泌かく乱性とエストロゲン応答性への影響評価

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遺伝子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、各試験毎にインシユリンを添加した 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クスに対し、エピジェネティ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、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、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. 催奇形性マーカーによる分化中の細胞への影響評価

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るべきである。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られる。そのため、本節では、催奇形性物質処理により特異的に発現が低下する事が報告されている催奇形性マーカーの候補遺伝子および既知の心筋分化マーカーに着目し、分化中のマウス ES

細胞中の前記マーカー遺伝子の発現を対象として、IF 磁界ばく露による影響評価を行った。

### 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 胚様体細胞のばく露試験

試験法の詳細は、分担報告書に譲る。

### 3.3 催奇形性マーカーによる検討

催奇形性マーカー遺伝子解析法の詳細は、分担報告書に譲る。

## C. 研究結果

### 1. 内分泌かく乱性の評価

磁束密度 0 (疑似ばく露)、3.9mT の IF-MF による 4 日間のばく露を 37°C、5% CO<sub>2</sub>、湿度 100% のインキュベータ内で行った (n=3 以上)。磁界のばく露を行った結果、エストロゲンの有無に関わらず、IF 磁界ばく露群、疑似ばく露群間で、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。これらの結果、および前年度までの結果と合わせ、IF 磁界のばく露により、①エストロゲンを介する遺伝子発現系の遺伝子発現は誘導されない、②エストロゲンによる遺伝子発現が起こっている状態への影響を与えないことが示された。

### 2. DNA メチル化度の評価

IF 磁界 (3.9mT) ばく露下または疑似ばく露下で 2 週間培養した細胞の p53 および e-cadherin 遺伝子の発現制御領域におけるメチル化度の割合を比較すると、同一遺伝子における IF 磁界ばく露群と疑似ばく露群の間には、統計的に有意な差は認められなかった。したがって、IF 磁界は、21kHz、

3.9mT への2週間という長期ばく露によっても、遺伝子の後天的修飾（DNAのメチル化）に影響を及ぼさないと考えられる。

### 3. 催奇形性マーカーによる分化中の細胞への影響評価

催奇形性物質処理により特異的に発現が変化する事が知られる遺伝子および典型的な心筋分化マーカーを対象として、IF磁界ばく露による影響を分化中のmES細胞を用いて行った。その結果、検討した全ての遺伝子について、IF磁界ばく露による有意な変動は見られなかった。

これらの結果および前年度までの胚様体の心筋への分化を指標とした結果は、いずれもIF磁界への曝露による影響が無いことを示している。したがって、3.9mTへの長時間曝露によって、胎児の発生などに対する顕著な影響は生じないと考えられる。

## D. 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。

本研究では、ICNIRPガイドラインの100倍強の磁束密度を長時間ばく露した際の影響について、変異原性に加え、後天的遺伝子修飾、内分泌かく乱性、細胞分化など様々な可能性を考慮して評価を目的とし、今年度は特に後天的遺伝子修飾、内分泌かく乱性、細胞分化に対してのフォローアップとなる試験を実施し、IF磁界の影響が認められないことを見出した。

本研究で用いたIF磁界（21kHz、最大3.9mT）は、ICNIRPガイドラインの参考レベルよりの150倍弱の強度であり、実際に環境中で想定されるばく露と比較した場合、数百~数千倍となる。しかしながら、このように強い磁界であっても、そのエネルギーは化学結合などと比べると極めて小さく、例えばDNAなどの生体物質を切断・分解するほどのものではない。また、磁界による電磁誘導によるエネルギーも同様である。

これ以外に、誘導による膜への影響や遺伝子発現への影響などについては、明確な根拠は確立しておらず、本研究においても影響は見られなかったことから、少なくとも顕著な影響はないと考えられ、もって重篤な影響を持つ可能性は小さいと考えられる。

## E. 結論

本研究は、日本において普及が進む家電製品などから漏洩する20kHz帯のIF磁界に

ついて、一般の関心は高いものの、研究が限られ科学的な不確かさも高い生物影響に関して、科学的な不確かさを減らし必要な情報を得るために研究を実施した。具体的な評価法として、ヒトおよびげっ歯類の培養細胞を用いて 21kHz、最大 3.9mT の磁界の影響を評価した。その結果、

- ① 発がんの因子となる後天的な DNA のメチル化を誘導しない。
- ② 女性ホルモン（エストロゲン）により制御される遺伝子の発現をおこさず、またエストロゲンによる遺伝子発現へ影響を与えない。
- ③ 生物の発生初期段階の分化に際して働くと考えられる 7 種の遺伝子の発現量に影響を与えない。

ことを示した。

これらの結果から、居住環境に存在する微弱なレベルでの IF 磁界ばく露の影響については、影響が無いか、もしくは一般的な安全性評価試験では検出できないレベルの極めて弱い影響しか持たず、したがって生体影響としてのリスクは低いと考えられる。

## <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を用いた（図 6）。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。また、平成 23 年度からの改良点として、コイルの周りをシリコンチューブで巻いて、その中を 25℃に調節した水を循環させて、コイルからの発熱をその循環水で吸熱し動物の部位の温度を一定に保持した。

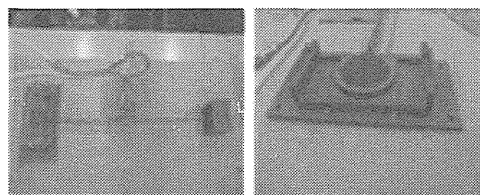


図 6 磁界ばく露装置の概要

#### 2. 動物

実験には、Slc:SD (Sprague 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。

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。

交配が確認された場合は、同居を終了させ、以後は雌 1 匹で飼育を継続した。交配成立後、動物は毎日体重の測定、目視に健康観察をおこなった。交配が成立したラットは無作為にシャム群、ばく露群、ケージコントロール群に割り付けをおこない、最終的に各群の N 数が 20 になるまで実験を行った。

### 3. 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 6 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。

### 4. 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。

### 5. 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。

### 6. 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。

### 7. 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。また胎児は生存胎児を対象として、胎児の表面の水分をガーゼで吸収したのちに体重を測定した。摘出した胎児は、基本的に子宮内での並び位置に基づき 1 匹ずつ交互に外表・内臓検査用、骨格検査用に二分した。

### 8. 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。

### 9. 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。

## 10. 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。

## 11. 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有意水準 5%で検定を行った。統計処理には統計パッケージソフト PASW Statistics (SPSS) ver.18 (日本 IBM) を使用した。

## C. 結果

### 1. ばく露中の温度制御

平成 23 年度の研究において、ばく露を行うと、ばく露コイル近傍において若干の温度上昇が認められたため、方法で述べたように、コイルの周りに一定温度に保った水を循環させ、温度の安定化を目指した。その結果、ばく露中の温度が安定するような環境を形成することが可能であった。水の循環はシャム群、ばく露群ともに同様に行うことにより、両者の間に発生する磁界以外の要因による影響を排除することが可能であると判断した。

### 2. 妊娠動物の健康状態

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 20 匹計 60 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。

### 3. 妊娠動物の体重

体重に関しては、全ての群の母獣の体重は順調に増加した。妊娠中の各測定日においての体重の平均値の比較では、ケージコントロール群に比べ、ばく露群、シャム群の双方において小さい傾向が見られたが、有意差は見られなかった。また、妊娠中の体重増加量についても同様に有意差は認められなかった。

### 4. 妊娠動物の血液生化学的検査・血液学的検査

剖検を行った妊娠 20 日目の母獣から採血をおこない、その血液生化学的検査、および血液学的検査(血球検査)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。

### 5. 着床数、胎児数、胎児重量などの比較

着床数は群間の有意差は認めなかった。また着床痕数は、ばく露群 11 匹、シャム群 11 匹、ケージコントロール群 16 匹、死亡胎児は、ばく露群 1 匹、シャム群 2 匹、ケージコントロール群 1 匹であった。着床痕や死亡胎児は特定の母獣に頻発していることはなく、均等な頻度での発現が見られた。各群の生存胎児数や体重に有意な差は認められなかった。

### 6. 胎児の外形異常

検査胎児の外表観察異常について全 380 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 (malformation)、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 (variation) と定義し解析した。異常と判定したものうち、奇形を呈する個体は見られなかった。変異に関しては、全て口蓋ヒダ不整列の所見であった。口蓋ヒダ不整列の発生頻度は、ばく露群で 28.9%、シャム群 35.3%、ケージコントロール群 38.5%であり、ばく露条件による有意差は見られなかった。

#### 7. 胎児の内臓異常

検査した胎児の内臓異常について全 380 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。その結果ばく露条件によって奇形が頻発することはなく有意差も認められなかった。

一方変異については、ばく露群の 23.4%、シャム群の 37.6%、ケージコントロール群の 28.6%に見られて、カイ自乗検定では、有意差が認められた ( $p=0.04$ )。内訳では、多くが胸腺頸部遺残であった。また左臍帯動脈、肺分葉過剰裂がそれぞれ数例見られた。

#### 8. 胎児の骨格形成の異常

検査した 387 胎児検体の骨格形成の異常に関しても、外形・内臓異常と同様に、発育や生存に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。

奇形に関しては、ばく露群 1 匹 (発生頻度 0.8%)、シャム群 5 匹 (発生頻度 3.8%)、

ケージコントロール群 0 匹 (発生頻度 0%) という結果であった。シャム群において高い頻度で見られたが、その理由は明確ではない。しかしながら、ばく露群では増加傾向はみられないため、磁界が催奇形性をもたらす要因になるということはない。

変異に関しては、全 387 胎児検体中、67 検体で異常が確認され、内訳はばく露群 20 匹 (発生頻度 15.2%)、シャム群 26 匹 (発生頻度 19.5%)、ケージコントロール群 21 匹 (発生頻度 15.7%) であった。

#### 9. 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。母獣の腹単位で考えると、内臓奇形に関しては、各群 20 匹に対して、ばく露群 1 匹、シャム群 2 匹、コントロール群 2 匹であり、特定の母獣に奇形が集中するということもなく、自然確率的な発生であると考えられた。また、骨格奇形について母体レベルで考えると、各群 20 匹の母数に対し、ばく露群 1 匹、シャム群 3 匹、ケージコントロール群 0 匹であった。

内臓と骨格を総合して考えると、奇形を呈した胎児を持った母獣はばく露群 1 匹、シャム群 4 匹、ケージ群 2 匹であり、ばく露群に有意に奇形発生率が多いということはない。

#### 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  $0.2\mu\text{T}$  であり、誘導電界に換算した場合、ヒトとラットでは磁界が通過する断面積には大きな差があることから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た。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工学班の項を参照して頂きたい。

平成 23 年度はそのコイルを用いて催奇形性の実験を行った。その結果、通電によりコイル自身に生じる発熱が非常にわずかであるがコイル付近の温度上昇を招き、それが結果に影響する可能性があることが分かった。本年度は、たとえわずかな温度上昇であっても、磁界以外の影響の可能性は否定できないことから、その可能性を排除す

るために、温度を安定化するための水ルーブをコイルに装着し実験を行った。

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、各群 20 匹の母獣を用意して結果を比較した。これら 3 群の間で、妊娠中の母獣の体重増加に関しては、ばく露群、シャム群においてケージコントロール群に比べ増加量が有意に少ないことが明らかになったが、これは磁界の影響ではなく、ばく露中の保定のストレスによるものであると推察された。しかしながら、血液学的検査、血液生化学検査、胸腺重量においては有意な差は見られなかった。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。

結果の項で示したとおり、全部で 60 匹の母獣から 767 匹の胎児検体を得て、その半数を外表及び内臓の異常検索用に、半数を骨格の異常検索用に供した。催奇形性として問題となる奇形の発生に関しては、ばく露群で有意に多く発生することはなく、磁界によって催奇形性が発生するということはないと考えられた。なお、本研究では外

形奇形は0%、内臓奇形は1.1%、骨格奇形は1.6%、全体として1.3%の奇形発生率であったが、竹内らがまとめたSDラットの生殖に関するバックグラウンドデータ（複数研究をとりまとめたもの）では、外形奇形が平均0.29%、内臓奇形が平均2.64%、骨格奇形が0.26%となっており、特段の差は見られないと考えられる。

本研究では、通常の範囲を超えてはいるが生存に影響しない変異についても検討を行った。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、ケージコントロール群に比べて、ばく露群ではむしろ低い発生率であった。変異については、それぞれの群において変異をもつ胎児が検出されるものの、磁界ばく露群において有意に高い率を示すことはなく、磁界ばく露による変異のポジティブな影響はないことが明らかとなった。

本研究において平成24年度は、動物実験用に開発した局所用ばく露装置を用いて妊娠ラットの胎児形成期に強い中間周波磁界のばく露実験を行い胎児への影響の有無を調べ、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。平成24年度に得られたこの結果はOECD毒性試験ガイドラインの催奇形性試験で推奨される各群20例の母獣を用いてデータを収集

し、磁界の影響が見られないことを明らかにしたことから、一般的な化学物質の催奇形性データの対比も可能となるものである。また、データの収集にあたり、磁界以外の要因、たとえばコイルの発する熱についても除去する実験系を用いたため、信頼性の高いデータを得られたと考えている。本研究で得られた結果は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として活用可能な貴重なデータとなった。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、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少なく、リスク評価に向けての科学的なエビデンスの一つとして活用されることが期待される。

## <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>

F.1 論文発表



1. Masateru Ikehata, Sachiko Yoshie, Yukihisa Suzuki, Keiji Wada, Kanako Wake, Taiji Sakai, Satoshi Nakasono, Masao Taki and, Chiyoji Ohkubo, 21 kHz Magnetic Field Did Not Affect Cell Growth And Mutagenesis in Mammalian Cells (準備中)
2. Sachiko Yoshie, Yuuki Ogasawara, Masateru Ikehata, Kazuyuki Ishii, Yukihisa Suzuki, Keiji Wada, Kanako Wake, Satoshi Nakasono, Masao Taki and Chiyoji Ohkubo, Evaluation of Biological Effects of Intermediate Frequency Magnetic Field Based on Differentiation of Embryonic Stem Cell (準備中)
3. 木暮晋太郎、和田圭二、鈴木敬久：“変型 Merritt コイルを用いた細胞曝露評価用 20 kHz 磁界発生装置の開発”、(電子情報通信学会論文誌 B 投稿予定)
4. 鈴木伸也、平井佑樹、和田圭二、鈴木敬久：“中間周波電磁界の生体影響評価を目的とした局所磁界発生装置”、(電気学会論文誌 A 投稿予定)
5. 池畑政輝、中間周波磁界の生物影響の評価、日本放射線影響学会第 55 回大会、2012 年 9 月、仙台
6. 池畑政輝、中間周波磁界の生物影響の評価、第 262 回鉄道総研月例発表会、2012 年 12 月、東京
7. M. Ikehata, EMF issue in Railway systems Evaluation of Biological Effects and Trends of Regulation in Japan-, ISEF'2013, Sep. 2013, Ohrid (invited).
8. M. Ikehata, S. Yoshie, T. Hayakawa, Y. Suzuki and M. Taki, EMF issue in Railway systems - Evaluation of Biological Effects and Trends of Regulation in Japan-, WCRR2013, Nov. 2013, Sydney. (accepted for oral presentation)
9. Sachiko Yoshie, Masateru Ikehata, Yuuki Ogasawara, Kazuyuki Ishii, Yukihisa Suzuki, Keiji Wada, Kanako Wake, Satoshi Nakasono, Masao Taki and Chiyoji Ohkubo, Evaluation of Health effect of intermediate frequency magnetic field WCRR2013, Nov. 2013, Sydney. (accepted for poster presentation)
10. 牛山明, 大谷真, 鈴木敬久, 和田圭二, 櫻田尚樹, 大久保千代次. 中間周波磁界の全身亜慢性ばく露影響に関する研究, 第 51 回日本生体医工学学会大会, 2012.5.10-12, 福岡, 日本生体医工学雑誌 (同プログラム抄録論文集) Vol.50(Suppl.1), p.241.(付属 CD-ROM, P1-07-1)
11. Ushiyama A, Ohtani S, Suzuki Y, Wada K, Kunugita N, Ohkubo C.

## F.2 学会発表

1. Yuki Ogasawara, Masateru Ikehata, Sachiko Yoshie, Satoshi Nakasono, Chiyoji Ohkubo & Kazuyuki Ishii, Effects of exposure to 21kHz magnetic fields on estrogen-regulated gene expression in MCF-7 cell, The 34<sup>th</sup> Annual Meeting of the Bioelectromagnetics Society, Jun. 2012, Brisbane
2. 吉江幸子、池畑政輝他、中間周波磁界

- The effects of 21 kHz intermediate frequency magnetic fields on blood properties and immune systems in juvenile rats. The 2012 Korea-Japan EMT/EMC/BE Joint Conference (KJJC-2012), 2012.5.18-19, Seoul, Korea, the Conference Proceedings p251-253.
9. Ushiyama A, Ohtani S, Maeda M, Hirai Y, Suzuki Y, Wada K, Kunugita N, Ohkubo C. Effects of abdominal local exposure of intermediate frequency (21kHz) magnetic fields on fetal development in rats. The 34th Annual Meeting of Bioelectromagnetics society. 2012.6.17-23. Brisbane, Australia, Abstract book p.209.
  10. 牛山明. 中間周波数磁界の催奇形性に関する研究および BEMS2012 報告(特別講演). 平成 24 年度第一回医用生体電磁気学研究会(兼 第 22 期第一回 URSI-K 国内小委員会). 2012.8.2. 東京.同資料集.
  11. 牛山明. 生活環境中の電磁界:測定・規制・健康影響(公衆衛生行政研修フォーラムシンポジスト) 第 71 回日本公衆衛生学会総会, 2012.10.24-26, 山口, 日本公衆衛生学雑誌(同抄録集) Vol.59(10), p104
  12. 牛山明, 大谷真, 前田満智子, 櫻田尚樹, 鈴木敬久, 和田圭二, 大久保千代次. 家庭用 IH 調理器で利用される 21kHz の中間周波磁界の生体ばく露による発生毒性評価. 第 29 回全国衛生化学技術協議会年会, 2011.11.21-22, 同講演集 p266-267.
  13. Ushiyama A, Ohtani S, Maeda M, Suzuki Y, Wada K, Kunugita N, Ohkubo C., Lack of teratological effects in pregnant rats being locally exposed to their abdomen of intermediate frequency (21kHz) magnetic fields. BioEM2013, Thessaloniki, Greece, June 10-14. 2013 (採択済)
  14. Ushiyama A, Ohtani S, Suzuki Y, Wada K, Kunugita N, Ohkubo C. The 21 kHz Intermediate frequency magnetic fields do not affect on Blood Properties and Immune Systems in Juvenile Rats. the 2013 CIGRE 3rd International Colloquium on Low Frequency Electromagnetic Fields (EMF-ELF 2013), Nara, Japan, Oct 15-16, 2013 (採択済)
- <知的財産権の出願・登録状況>  
無し

居室における中間周波電磁界に関する研究  
（電気工学班：ばく露装置保守・ばく露評価・ばく露装置制御方式の検討）

分担研究者 鈴木 敬久 首都大学東京  
分担研究者 和田 圭二 首都大学東京  
分担研究者 和氣 加奈子 情報通信研究機構

研究要旨

今年度電気工学では、平成 21 年度から平成 23 年度にかけて開発してきた細胞用ばく露装置、動物用ばく露装置（一様磁界ばく露および局所磁界ばく露装置）の保守管理を行った。これを行うことにより適正なばく露量のコントロールを行った。また動物ばく露のばく露評価に関するコンピュータシミュレーションを用いた考察を行った。考察では胎児間の入射磁界のばらつきと誘導電界のばらつきの比較を行った。またコイルのずれによる影響、妊娠日数に対するばらつきの依存性を検討した。さらに磁界ばく露装置の新しい制御方式に関する考察を行った。具体的には複数台のインバータ電源とコイルを用いたときに、相互の位相を変化させることにより、磁界の時空間変化を精密に制御できる指針を得た。

A. 研究目的

本研究における電気工学班の役割は物理・工学的な視点から中間周波（intermediate frequency、以下 IF と略）電磁界における生体影響について検討することである。我々は H21 年度に細胞用ばく露装置、H22 年度に 2 種類の動物用ばく露装置の開発を行ってきた。また、これらのばく露装置に対して大規模なコンピュータシミュレーションを駆使して、内部誘導量（誘導電流・誘導電界）のドシメトリを行ってきた。

本年度の目的は以下の通りである。上述のばく露装置に関して正確なばく露が行えるように保守管理を行う。また数値ドシメ

トリに関しては、各胎児間の入射磁界のばらつきと誘導電界のばらつきの関係について考察する。ここではそれらの妊娠日数に対する依存性についても調べる。そしてばく露コイルの位置がずれたときの現象についても検討を行う。さらにばく露装置の新しい制御法として、複数のインバータ電源とコイルを使った磁界の時空間分布の精密制御について検討する。これにより、今後の磁界ばく露装置に関してより自由度の高いものを提案できると考えられる。

B. 方法

1. ばく露装置の保守管理

細胞用ばく露装置、動物用一様磁界ばく露装置、動物用局所磁界ばく露装置に関する

る保守管理については、細胞研究班および動物研究班と普段の装置の動きに関して常時連絡をとり合うことにより行う。装置に設置した電流モニター値に関して注意を払い、異常な値が出力された場合には各班と協議を行うような体制をとった。

## 2. シミュレーションによるドシメトリ

### 2.1 磁界分布計算

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(2.1)で表される。

$$dH = \frac{IdL \times \hat{r}}{4\pi r^2} \quad (B2.1)$$

$$dH_x = \frac{IdL_y r_z - IdL_z r_y}{4\pi r^3} \quad (B2.2)$$

$$dH_y = \frac{IdL_z r_x - IdL_x r_z}{4\pi r^3} \quad (B2.3)$$

$$dH_z = \frac{IdL_x r_y - IdL_y r_x}{4\pi r^3} \quad (B2.4)$$

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。

図B2.1に円状のコイルと流れる電流の各方向を示す。図1に示すように中心点とコイル上の点の角度  $\theta$ 、 $\phi$  から  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向における微小な長さの電流要素  $IdL_x$ 、 $IdL_y$ 、 $IdL_z$  が求まる。これらの値により離れた距離  $r = ((r_x, r_y, r_z))$  に作り出す各方向の微

小磁界  $dH_x$ 、 $dH_y$ 、 $dH_z$  を式(2.2)、式(2.3)、式(2.4)から計算している。ある空間点での磁界は、コイル上のすべてのセルにおいて微小磁界  $dH$  を計算し、足し合わせて求めている。ボクセルモデルを用いた場合での磁界分布の精度については円形コイルのモデルを用いて、理論解と比較を行っており、1.7%程度の誤差であり、ボクセルモデルを用いた影響が十分に小さいことを確認している。この計算手法ではボクセルがコイル配線の中心点のみとなっているため、配線の太さが考慮されていない。しかし、ボクセルモデルが作成できる形状であれば容易に計算できることからこの手法を採用した。

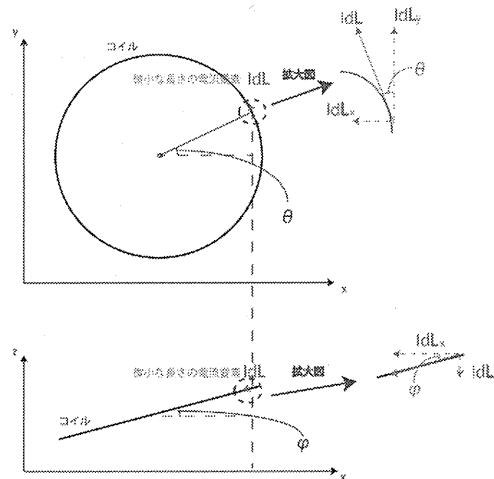


図 B2.1 磁界分布の計算モデル

### 2.2 インピーダンス法

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[1-3]で求め、その結果を用いて誘導電界を求めている。