

201237001B

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21年度～24年度 総合研究報告書

研究代表者 大久保千代次

平成25(2013)年3月

目 次

I. 総合研究報告

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

(資料1) 電気工学班報告書 11

(資料2) 細胞研究班報告書 59

(資料3) 動物研究班報告書 81

II. 研究成果の刊行に関する一覧表 109

III. 研究成果の刊行物・別刷 115

居室における中間周波電磁界に関する研究

研究代表者 大久保千代次 （財）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が、その健康影響に関する科学的情報が不足しているため、国民の間にはこれらの機器からの電磁界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、ばく露の基本的な物理量とそのレベルについて検討し、細胞および動物のばく露実験に対して計算機シミュレーションを駆使したばく露評価を基に、生体内に誘導される電界・電流密度などを定量的に評価して、可能な限りの大きなばく露量を有するばく露装置を開発すると共に、実験実施のフォローアップを行った。

細胞実験班では、毒性（細胞の増殖阻害等）、遺伝毒性（小核試験、遺伝子変異試験）、内分泌かく乱性（エストロゲン応答性）、細胞分化（マウス ES 細胞の心筋への分化）のいずれについても、居室等の環境中ばく露より 100 倍以上高い磁束密度（最大 3.9mT）の中間周波磁界へのばく露の影響は認められなかった。したがって、居室の環境レベルでの磁界ばく露の影響についても、影響が無いかもしくは一般的な安全性評価に資する試験では検出できないレベルの極めて弱い影響であると推察された。

動物実験班では、全身ばく露装置を用いて、ラットに 1 日 1 時間で連続 3 日間、または連続 14 日間のばく露の影響を調べたが、体重、血液生化学、血球分画の各指標に影響を与えるような変化が見られないことを確認した。また一部の免疫毒性の指標について検討し、NK 活性、顆粒球の走化性・貪食能、T 細胞サブセット（CD4・CD8）には影響を与えないことを示した。局所用ばく露装置を用いて妊娠ラット腹部表面中心で 21kHz、約 10mT の正弦波磁界ばく露の催奇形性を調べたが、ばく露による胎児の死亡率の増加や、胎児の体重変化は見られなかった。また、胎児の外形異常、内臓異常、骨格形成異常、母獣の腹単位の奇形発生頻度の項目においても、磁界ばく露影響は確認されなかった。

以上、生物学的研究から得られた知見より、国際的なばく露防護ガイドライン以下のばく露環境では、何らの健康影響に関連する影響も認められなかった。

多氣 昌生 首都大学東京 教授

石井 一行 明治薬科大学大 教授

小笠原裕樹 明治薬科大学大 准教授

池畑 政輝 鉄道総合技術研究所 主任研究員

吉江 幸子 鉄道総合技術研究所 副主任研究員

樫田 尚樹 国立保健医療科学院 部長

牛山 明 国立保健医療科学院 上席主任研究官

鈴木 敬久 首都大学東京 准教授

和田 圭二 首都大学東京 准教授

中園 聡 電力中央研究所 上席研究員

和氣加奈子 情報通信研究機構 主任研究員

<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 300Hz から 10MHz 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。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、IF 電磁界へのばく露機会も増加している。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、この領域の研究の推進が必須とされている。また、IF 磁界を発生する 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るなど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本研究の目的は、これらの背景を踏まえ、IF 磁界へのばく露による生物学的なハザードの有無を明らかにすることである。具体的には、生物学的ハザードとして生殖器系や免疫系への重篤な健康リスクに関連した生物影響を明らかにすると共に、IH 調理器で懸念されている胎児への影響についても検討を進め、生物影響の存在が示唆された場合には、今後の疫学研究を実施するための問題点を明らかにすることである。

なお、研究の特殊性から電気工学班、細胞研究班および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

IF磁界へのばく露による生物影響を検討する上では、正確なばく露評価が可能になる細胞用、動物用のばく露装置の開発が不可欠である。そのため、細胞および動物のばく露実験に対して計算機シミュレーションを駆使したばく露評価を基に、生体内に誘導される電界・電流密度などを定量的に評価して、可能な限りの大きなばく露量を有するばく露装置を開発すると共に、実験実施のフォローアップを行うことを目的とした。

B. 研究方法と結果

1. 細胞用ばく露装置の設計手法の構築とばく露装置開発 (平成21年度)

装置のばく露指標として国際的なICNIRP (国際非電離放射線防護委員会) ガイドラインの参考レベル (磁界強度) を基準とし、同時に基本制限である内部誘導量 (誘導電流密度分布, 内部誘導電界分布) を評価できるシステムを構築した。結果として、20kHzの実効値で最大 3.9mT (一般公衆における参考レベルの約144倍) の均一磁界をばく露可能な細胞用ばく露装置を開発した。

2. 動物用ばく露装置の設計手法の構築とばく露装置開発 (平成22~24年度)

ばく露評価の指標としてはICNIRPガイドラインの一般公衆に対する基本制限値である誘導電流密度 (1998年版ICNIRP) と誘導電界 (2010年版ICNIRP) とした。平成22年度は全身ばく露用の均一磁界ばく露装置を開発し、ドシメトリを行った。この装置では誘導電流密度の全身平均値として約0.57A/m² (一般公衆基本制限値の14倍) のばく露が達成できた。さらに妊娠ラット用局所ばく露装置を電源開発・ドシメトリを含めたトータル設計に基づき開発した。胎児に局所的なばく露が可能であり、コイル電流が90Aで、1998年版ICNIRP のガイドラインの一般公衆の基本制限値の11倍程度の誘導電流、2010年版ICNIRPのガイドラインの一般公衆の基本制限値の1.1倍程度の誘導電界が得られる装置を開発した。

平成23年度では、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数値シミュレーションを行った。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。

平成24年度はこれまで開発してきたばく露装置の保守とばく露管理を行った。またアーチファクト検索を行った。

C. 結論

細胞および動物のばく露実験に対するばく露評価シミュレーションを実施し、生体内に誘導される電界・電流密度などを定量的に評価して、細胞用、動物用 (一様並びに局所の) ばく露装置開発を行った。

<細胞研究班>

A. 研究目的

IF 電磁界の生物学的ハザード評価の上で重要な毒性、発がん性についての一般的な安全性試験、また遺伝子の後天的修飾への影響、さらには IF 電磁界のばく露状況を考慮し、マウス ES 細胞を用いた細胞分化への影響、女性ホルモンを指標とした内分泌かく乱性について、培養細胞を用いた実験系で検討することを目的とした。

B. 研究方法

1. ばく露装置の開発 (平成 21 年度)

電気工学研究班が開発した IF 磁界発生装置に適合した細胞培養装置を開発するため、非磁性体や分離型温度調節を用いた炭酸ガス培養器を検討した。

2. 細胞増殖の測定 (毒性評価：平成 21～22 年度)

チャイニーズハムスター由来の培養細胞を用いて IF 磁界に 72 時間ばく露した。培養開始時および 24、48、72 時間後に WST-1 を用いて増殖度を測定し IF 磁界の影響を検討した。

3. 遺伝毒性の検討 (平成 21～22 年度)

発がん性を検討するため 2 種類の試験を実施した。①小核試験では、細胞分裂の際に生じる小核の出現頻度を指標とし、CHL/IU 細胞を用いて IF 磁界への 24 時間ばく露による影響の検討を行った。②*hprt* 試験では、6-チオグアニン耐性を指標とした選択培養によるコロニー形成を指標とし、CHO-K1 細胞を用いて IF 磁界への 24 時間ばく露による影響を検討した。

4. 内分泌かく乱性の検討 (平成 21～24 年度)

内分泌かく乱性について、遺伝子改変した女性乳がん由来の細胞を用いた検討を行った。エストロゲン応答性を有するヒト乳がん細胞由来 (MCF-7) を用いて、IF 磁界への 24 時間曝露および 4 日間の長期連続曝露による、①エストロゲンにより誘導される遺伝子発現への影響、②エストロゲン様作用の有無、を検討した。

5. マウス ES 細胞を用いた細胞分化への影響の検討 (平成 22～24 年度)

動物研究班の催奇形性試験を補完するために、マウス ES 細胞を分化させながら 10 日の間、IF 磁界に連続ばく露し心筋に分化した細胞の拍動の有無を指標として、細胞分化に与える IF 磁界の影響を検討した。また、同じ条件においてばく露を行った細胞に対して、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 5 種および典型的な心筋分化マーカー 2 種を対象として、

遺伝子発現への影響を検討した。

6. 遺伝子の後天的修飾への影響評価 (平成 23～24 年度)

遺伝子の後天的修飾への影響について、DNA メチル化を指標として、MCF-7 細胞を用い、IF 磁界下で 2 週間培養しクローニングした細胞から全 DNA を回収し、p53 および e-cadherin 遺伝子の発現制御部位を対象としてメチル化感受性制限酵素サイトを考慮した PCR 用プライマーを設計し、qPCR による増幅量を指標として IF 磁界の影響を検討した。

C. 結果

1. 樹脂や分離型温度調節を用いた培養器を開発・製作し、磁界発生下で、十分な試料空間に適切な細胞培養環境を長期安定して維持可能であることを確認した。この装置により、以降の本研究の生物影響評価試験では本装置により必要な IF 磁界ばく露が可能となった。

2. 毒性評価のために行ったほ乳類培養細胞の増殖に対する試験では、3.9mT の磁界に 72 時間までのばく露をした場合でも影響は見られなかった。DNA の一本鎖修復機能あるいは二本鎖切断時の修復機能を欠損した変異株においても、同様に影響はみられなかった。

3. 遺伝毒性を評価では、小核出現頻度や *hprt* 遺伝子の変異を指標として、3.9mT の磁界への 24 時間ばく露による影響を調べたが、磁界ばく露による影響は認められなかった。

4. エストロゲンレポーター遺伝子アッセイによる内分泌かく乱性の検討では、エストロゲン応答性について、3.9mT の磁界への 24 時間または 4 日間の長時間連続ばく露による有意な遺伝子発現誘導やエストロゲンにより誘導した遺伝子発現への影響は認められなかった。

5. マウス ES 細胞を用い、心筋への分化を指標とした磁界ばく露の影響評価を行った。その結果、胚様体 (Embryonic body) の形成、ならびに分化の過程を通した 10 日間にわたる 3.9mT へのばく露によっても心筋への分化頻度への有意な影響は認められなかった。また、催奇形性マーカー、心筋分化マーカーとして検討した 7 種の遺伝子のいずれの発現にも有意な影響は認められなかった。

6. DNA メチル化の評価では、全体的に e-cadherin と比

べ p53 の遺伝子発現でのメチル化度が高い傾向にあるものの、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。

D. 考察

IF 磁界ばく露の生物影響のうち、哺乳類培養細胞における増殖 (致死などの急性毒性) および遺伝毒性 (≒発がん性) に関する検討においては、DNA 損傷の修復能力が正常な細胞株および修復能力の一部を欠損した細胞株数種を用いて検討したが、21kHz、最大 3.9mT の IF 磁界はいずれの細胞にも影響をおよぼさなかった。また、標準的試験法である *in vitro* 小核試験、*hprt* 遺伝子変異試験の双方で影響が認められなかった。したがって、IF 磁界が、国際的な ICNIRP ガイドラインにおける一般公衆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、遺伝子損傷などの重篤な影響を示さないことが明らかとなった。以上、急性毒性および一般的な安全性評価における遺伝毒性も認められないことから、顕著な生物影響はないと考えられる。なお、本研究では、磁界ばく露についてのばく露評価量として、培養液での誘導電流が直径 90mm の円形培養容器の最外周で約 16.5A/m² (電界で約 11V/m) となることが電気工学班によって示されている。これは、1998 年版の ICNIRP ガイドラインにおける一般公衆の基本制限 (40mA/m²) の約 400 倍程度 (2010 年版 ICNIRP ガイドラインの約 11 倍) であり、本研究では、この基本制限を大幅に上回る条件でのばく露であっても、顕著な影響がないことが示されたと考えられる。

また、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についても、IF 磁界ばく露による影響は認められなかった。これらの結果、居室等での環境中でのばく露より 100 倍以上強い磁束密度の中間周波磁界であっても、内分泌のかく乱や細胞の分化への影響による種々の影響を持つ可能性は極めて低いと考えられる。

E. 結論

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。その結果として、

①細胞の増殖抑制や致死に至るような急性毒性は無い。

②発がんの因子となる遺伝子変異や核の異常、ならびに後天的な DNA の修飾を誘導しない。

③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。

④生物の発生初期段階の分化に対して影響を与えない。

以上 4 点が示された。

従って、本研究で得られた結果から判断する限り、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、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

IF 電磁界の動物に対する幼若期の全身ばく露による血液系・免疫系への影響、妊娠期の腹部局所ばく露による胎児催奇形性への影響の有無に影響の有無を明らかにすることを目的とした。

B. 研究方法

1. ばく露装置の開発 (平成 21~23 年度)

本分担研究では電気工学班と協働し①全身均一ばく露用コイル②腹部局所ばく露用コイルならびに、①と②を駆動するインバーターの製作を行った。なお、①の装置は 21 kHz で最大 3.8mT (体内誘導電界の全身平均値は約 4.5V/m) の全身均一ばく露が可能であり、②の装置は数値計算によると母獣内の各胎児の平均値で約 4mT (体内誘導電界の全胎児平均値は約 3.0V/m (標準偏差約 1.5V/m)) のばく露が可能である。また、双方のコイル共に駆動時にコイルを流れる電流により発熱が起こるが動物実験では熱環境を制御する必要があるため、水冷ループなどを作成し断熱構造とした。

2. 全身ばく露による血液系・免疫系への影響の検討 (平成 22 年度)

全身均一ばく露装置を用いて、血液生化学指標、血球分析、免疫系指標に対する検討を行った。本研究ではSDラットを用いて3日間（短期ばく露：6週齢）または14日間（長期ばく露：4週～6週齢）のばく露を行った。血液系に関しては生化学指標、血球指標に関して影響の有無を調べ、免疫系の指標としては①ナチュラルキラー（NK）細胞活性測定、②顆粒球の遊走能・貪食能、③T細胞のサブセット解析について調べた。

3. 局所ばく露による胎児の催奇形性の検討（平成23～24年度）

局所ばく露装置を用いて妊娠SDラット腹部に対して、現行のICNIRPガイドライン値より150倍程度高い磁束密度である4mT程度の磁界（全胎児平均）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。ばく露期間は、胎児の器官形成期にあたる妊娠7日～17日の毎日とした。妊娠20日目に母獣を解剖して生存（死亡）胎児数、胎児重量等を調べると共に、生存胎児を二分し、内臓観察用、骨格観察用の標本を作り、発生異常に関して病理検索を行った。

C. 研究結果

1. ばく露装置の開発

詳細は電気工学班の報告を参照されたい。

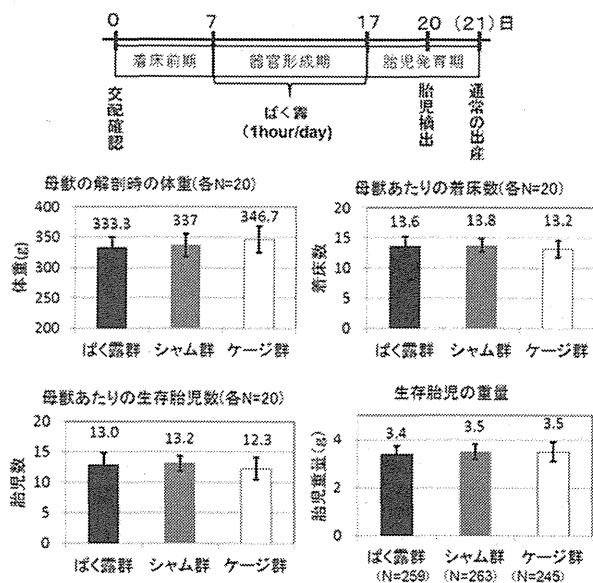
2. 全身ばく露による血液系・免疫系への影響の検討

本研究では、期間については短期ばく露（3日間）および長期ばく露（14日間）の2条件、また磁束密度については2mTと3.8mTの2条件で実験を行ったが、いずれの実験においても、生化学指標、血球指標に健康影響に関連する変化は認められなかった。同様に、NK活性、顆粒球走化性、貪食能、またTリンパ球のヘルパーT/キラーT比などのサブセットでもばく露の影響が見られなかった。

3. 局所ばく露による胎児の催奇形性の検討（平成23～24年度）

いずれの実験条件においても、母獣の体重、血液生化学値、血球分析値には有意な差がなく、母獣1匹あたりの生存胎児数、死亡胎児数も差がなかった。また、胎児の外形異常、内臓異常、骨格形成異常、母獣の腹単位の奇形発生頻度の項目においても、磁界ばく露影響は確認されなかった。

催奇形性試験のプロトコールと結果の概要



D. 考察

本研究で用いたばく露の条件は磁束密度で3.8mT（全身ばく露）、および約4mT（体内の全胎児の平均値）であり、これはICNIRPガイドライン（2010年）における一般公衆の参考レベルである $27\mu\text{T}$ に比べて十分に高い。また計算で求めた誘導電界は約4.5V/m（全身ばく露）、約3V/m（胎児平均）であり、ガイドラインの基本制限値を上回る。これらの条件下で、全身ばく露による血液・免疫系への影響および局所ばく露による発生毒性への評価結果は、ネガティブあり、本研究の結果は現行のガイドラインを支持しているといえる。

E. 結論

全身ばく露装置を用いて、ラットに1日1時間で連続3日間、または連続14日間のばく露を行い、磁界ばく露の影響を調べ、体重、血液生化学、血球分画の各指標に健康に影響を与えるような変化が見られないことを確認した。また同様に一部の免疫毒性の指標について検討し、NK活性、顆粒球の走化性・貪食能、T細胞サブセット（CD4・CD8）に関しては影響を与えないことを示した。

妊娠ラット腹部表面中心で21kHz、母獣内胎児に対して平均約4mTの正弦波磁界局所ばく露を行い催奇形性を調べたが、ばく露による胎児の死亡率の増加や、胎児の体重変化、奇形発生に対する影響は確認されなかった。

以上を通じて中間周波電磁界の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る。

F. 研究発表

1. 論文発表

Masateru Ikehata, Sachiko Yoshie, Yukihiisa 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 (in preparation for Mut. Res.)

Sachiko Yoshie, Yuki Ogasawara, Masateru Ikehata, Kazuyuki Ishii and Chiyoji Ohkubo, Evaluation of the exposure to intermediate frequency magnetic fields during embryonic stem cell differentiation into myocardial cells (in preparation)

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)。

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)。

2. 学会発表

木暮晋太郎、和田圭二、鈴木敬久：電圧形インバータを用いた20 kHz 磁界発生装置の開発、電気学会全国大会(2009年12月)。

Shintaroh Kogure, Keiji Wada, Yukihiisa Suzuki : “Development of a Magnetic-Field Generator at 20 kHz using a Voltage-Source Inverter for Biological Research”, European Conference on Power Electronics and Applications (2009年9月)。

木暮晋太郎、和田圭二、鈴木敬久：電圧形インバータを用いた細胞ばく露評価用20 kHz 磁界発生装置の開発、電子情報通信学会技術研究報告 EMCJ2009-88 (2009年12月)。

木暮晋太郎、和田圭二、鈴木敬久：細胞ばく露評価用磁界発生装置の高出力化に向けた検討、電気学会半導体電力変換研究会、SPC-10-043 (2010年3月)。

Yuki Hirai, Yasuhisa Suzuki, Keiji Wada, Masao Taki : “ Dosimetry on the induced current density and the induced electric field in the pregnant rat model exposed to localized magnetic fields at 20 kHz ” ,Asia-Pacific Radio Science Conference, K1-6, (2010年9月)。

鈴木伸也、和田圭二、鈴木敬久：”20 kHz 磁界発生用コイルの冷却方式の実験検討”、電気学会全国大会、1-149, 2010 (2010年3月)。

鈴木伸也、和田圭二、鈴木敬久：”局所ばく露を目的とした磁界発生コイル用電源装置”、電気学会研究会、EMC-10-040, 2010 (2010年12月)。

平井佑樹、鈴木敬久、鈴木伸也、和氣加奈子、和田圭二：”妊娠ラット用 20 kHz 局所磁界ばく露装置の開発”、通信学会総合大会、B-4-22, 2011

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(2011年3月)。

Yuki Hirai, Yasuhisa Suzuki, Keiji Wada, Kanako Wake, Masao Taki, Akira Ushiyama, Chiyoji Ohkubo.

“Development of the exposure apparatus with the localized magnetic field at 20kHz for pregnant rats ” The 33rd Annual Meeting of Bioelectromagnetics Society, 09-3 (2011年6月) . Keiji Wada, Yukihiisa Suzuki, Akira Ushiyama:” Experimental verification of a localized magnetic field generator using a twolayered coil”, The 33rd Annual Meeting of Bioelectromagnetics Society, PA-113 (2011年6月) .

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 ”、電子情報通信学会環境電磁工学研究会、IEICE-EMCJ2011-71, pp. 1-6、北海道大学、2011 (2011年7月)。

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 (2012年3月)。

池畑政輝、吉江幸子、早川敏雄、中間周波磁界の生物影響評価、第83回日本産業衛生学会 (2010年5月)

Masateru Ikehata, Keiji Wada, Yukihiisa Suzuki,

Sachiko Yoshie, Taiji Sakai, Kanako Wake, Satoshi Nakasono, Masao Taki and Chiyoji Ohkubo, Development of exposure system of intermediate frequency magnetic fields for *in vitro* test systems, 32nd Annual Meeting of Bioelectromagnetics Society (2010年6月)

Masateru Ikehata, Keiji Wada, Yukihisa Suzuki, Sachiko Yoshie, Taiji Sakai, Kanako Wake, Satoshi Nakasono, Masao Taki and Chiyoji Ohkubo, Evaluation of Genotoxic Effects of Intermediate Frequency Magnetic Field in *in vitro* Micronucleus Assay Using CHL/IU Cells, 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference (2010年9月)

Sachiko Yoshie, Masateru Ikehata, Yukihisa Suzuki, Keiji Wada, Chiyoji Okubo and Toshio Hayakawa, Evaluation of biological effects of intermediate frequency magnetic field based on growth of DNA repair deficient mammalian cells and mutation assay, 2010 Asia-Pacific Radio Science Conference (2010年9月)

Masateru Ikehata, Sachiko Yoshie, Yuki Ogasawara, Kazuyuki Ishii, Keiji Wada, Yukihisa Suzuki, Taiji Sakai, Kanako wake, Satoshi Nakasono, Masao Taki and Chiyoji Ohkubo, Evaluation of biological effects by exposure to intermediate frequency magnetic fields, the 6th International Workshop of Biological Effects of Electromagnetic Fields (2010年、10月)

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、中間周波磁界の変異原性および DNA 修復系欠損細胞を用いた毒性の評価、第 39 回環境変異原学会 (2010年11月)

池畑政輝、吉江幸子、和田圭二、鈴木敬久、酒井泰二、和氣加奈子、中園聡、多氣昌生、大久保千代次、*In vitro* 小核試験による中間周波磁界の生物影響評価、第二回医用生体電磁気学シンポジウム (2011年1月)

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)

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-, WCCR2011, (第 9 回世界鉄道研究会議、2011年5月)

Masateru Ikehata, Sachiko Yoshie, Keiji Wada, Yukihisa Suzuki, Taiji Sakai, Kanako Wake, Satoshi Nakasono, Masao Taki and Chiyoji Ohkubo, Biological effects of intermediate frequency magnetic fields -Development of exposure system and evaluate genotoxicity *in vitro*-, The XXX General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (2011年8月)

Sachiko Yoshie, Yukihisa Suzuki, Keiji Wada, Kanako Wake, Taiji Sakai, Satoshi Nakasono, Masao Taki, Chiyoji Ohkubo and Masateru Ikehata, Estimation of Mutagenic Effects of Intermediate Frequency Magnetic Field using mammalian cells, The XXX General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (2011年8月)

Yuki Ogasawara, Masateru Ikehata, Ryo Sakaguchi, Shiho Awakura, Sachiko Yoshie, Chiyoji Ohkubo and Kazuyuki Ishii, Effects of exposure to intermediate frequency magnetic fields on gene expression of estrogen-regulated gene in MCF-7 cells, The XXX General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science (2011年8月)

M. Ikehata, Evaluation of Biological Effects of Magnetic Fields -from static to intermediate frequency- ISAP2011, Jeju (2011年アンテナ・伝播国際シンポジウム、2011年10月)

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

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 cells, 34th Annual Meeting of Bioelectromagnetics Society (2012年6月)

吉江幸子、池畑政輝、小笠原裕樹、石井一行、大久保千代次、中間周波磁界が細胞分化に与える影響の評価、日本放射線影響学会第55回大会、2012年9月

Ohtani S, Ushiyama A, Unno A, Hirai Y, Suzuki Y, Wada K, Kunugita N, Ohkubo C. Development of novel in vivo exposure apparatus for intermediate frequency magnetic field. The 10th International Congress of the European Bioelectromagnetic Association (EBEA). 2011.2.21-24, Rome, Italy

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, 日本生体医工学雑誌 (同プログラム・抄録集) Vol.49(Suppl.1), p.284(付属CD-ROM, P3-6-5)

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, 日本生体医工学雑誌 (同プログラム・抄録集) Vol.49(Suppl.1), p.347(付属CD-ROM, P3-8-3)

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

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.

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, 同講演集 p.258-259

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 (MAG-11-082), p.39-43

牛山明, 大谷真, 鈴木敬久, 和田圭二, 樺田尚樹, 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 (同プログラム抄録集) Vol.50(Suppl.1), p.241. (付属CD-ROM, P1-07-1)

Ushiyama 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 juvenile rats. The 2012 Korea-Japan EMT/EMC/BE Joint Conference (KJJC-2012), 2012.5.18-19, Seoul, Korea, the Conference Proceedings p251-253.

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 34rd Annual Meeting of Bioelectromagnetics Society. 2012.6.17-23. Brisbane, Australia, Abstract book p.209.

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

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

牛山明，大谷真，前田満智子，樺田尚樹，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 49 回全国衛生化学技術協議会年
会，2012.11.21-22，同講演集，p266-267．

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)

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)

<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。

<知的財産権の出願・登録状況>

無し

別紙3 資料1

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）

分担研究報告書

居室における中間周波電磁界に関する研究
(電気工学班：ばく露装置開発及びドシメトリ)

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

近年 IH 調理器などの中間周波数域(300Hz-10MHz)の変動磁界を利用する機器が一般家庭に普及しつつあり、それらの漏れ磁界と生体との相互作用に関する関心が高まっている。しかし、生活環境下における長期・継続的なばく露に関する生物学的なデータが不足しているのが現状である。このように不足しているデータを補完するため、本研究プロジェクトにおいて電気工学班は細胞研究班、動物研究班と協力しながら、ばく露指標の選定、ばく露装置開発、ばく露評価（ドシメトリ）を行ってきた。

ばく露指標に関しては ICNIRP ガイドラインにおける参考レベル（磁界強度）を基準とし、同時に基本制限である内部誘導量（誘導電流密度分布、内部誘導電界分布）を評価できるようなシステムを構築することになった。これは、家電機器などは生体影響への配慮として ICNIRP のガイドラインにおける制限値を考慮し作製されていることが多いためである。

細胞用ばく露装置の開発において、電源装置と磁界ばく露用コイルをトータルシステムとして設計できる手法を構築した。この設計手法を利用し、150mm×150mm×150mmの空間内に20kHzの入射磁界を短時間運転であれば実効値で最大3.4mT（一般公衆における参考レベル(6.25 μ T)の約540倍)、連続運転時の場合最大2mT（一般公衆における参考レベル(6.25 μ T)の320倍)の均一磁界（ばく露空間内の磁界強度の偏差が \pm 5%以内）としてばく露可能な細胞用ばく露装置を開発し、細胞ばく露実験の試験運用を行った。アーチファクトに関する検討としては、磁界ばく露時のコイルの温度上昇の測定を行い、ばく露時の温度環境に関する基礎的な知見を得た。

動物用局所磁界ばく露装置に関しては、パワーエレクトロニクスの技術を利用したばく露装置用の電源の開発、インピーダンス法を用いた数値計算によるばく露評価を利用した磁場発生コイルの開発を組み合わせ、動物用局所ばく露装置のトータル設計を独自に行った。電源の開発に関してはその設計手法を確立した。さらに提案した電源装置の有用性を確認するために電圧形インバータ、LC共振回路と変圧器からなる電源装置の設計・製作し、20kHzの正弦波電流80Aを流し、コイル中心で19.3mT発生できることを実験により明らかにした。また、磁界発生コイルを精製水で冷却することによりコイル表面部の温度調整ができることを実験により確認した。一方局所ばく露用コイ

ルの開発では、独自の局所化指標を導入し、可能な限りラット胎児に大きな誘導量が得られるような検討を行った。その結果として、一様磁界入射に比べ、胎児に局所的なばく露が可能となり、コイルに電流を 80A 流したとき、1998 年版 ICNIRP のガイドラインの一般公衆の基本制限値の 11 倍程度の誘導電流、2010 年版 ICNIRP のガイドラインの一般公衆の基本制限値程度の誘導電界が得られる装置を開発した。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。

ドシメトリでは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、妊娠日数ごと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。

その後、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。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。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い、それらの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、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。

A. 研究目的

現在、中間周波数帯 (300Hz~10MHz) [1] を用いた機器、例えば電磁調理器、電力伝送、人体通信、携帯電話、VDT など様々な機器が利用されており、生体との相互作用について関心が持たれている。その中で、変動磁界を

利用する IH (Induction-Heating) 調理器は日本で広く一般家庭に普及しており、その漏れ磁界による生体影響への関心が高まっている。ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) ガイドライン [2] [3] では磁界ばく露に関する制限値

が設けられており、その根拠になる調査研究として、動物実験や数値シミュレーションによるばく露評価の研究がなされてきた。10MHzまでの周波数帯では神経への刺激作用（急性影響）が根拠となり制限値が設けられている。しかし、長時間ばく露の慢性的な影響に対する調査は不十分である。IH調理器は妊婦の使用も考えられ、胎児への発生影響などにも関心が持たれている。WHOにおいても動物実験、数値計算における研究を推奨している[4]。

動物実験においてこれまでに中間周波数帯での動物用ばく露装置を用いた研究がいくつかなされており、例えばVDTの利用を背景としたラット、ニワトリの胚等を用いた動物実験がなされている[5]~[11]。胎児の発生影響についてはニワトリの胚等での研究が多く、ほ乳類での動物実験は未だ不十分となっている。他にも、ドシメトリと生体実験を関連づけた中間周波数帯での動物実験の研究例は過去あまり行われていない。

上述のように生活環境下での磁界による生物学的な影響を評価するためのばく露条件の選定とばく露装置の開発は中間周波(intermediate frequency, 以下IFと略)電磁界影響研究において重要なポイントである。

このような背景から電気工学班では以下のことを目的として研究を実施した。

- (1)ばく露装置のばく露指標となるばく露条件の物理的な検討。
- (2)細胞用ばく露装置の開発。
- (3)動物用（一様磁界・局所磁界）ばく露装置の開発。
- (4)実際のばく露条件におけるばく露評価（ドシメトリ）

B. 方法

B.1 ばく露評価指標に関する検討

電磁界が与える生体影響は周波数帯により異なっており、1Hzから100kHzまでの範囲では、神経系への刺激作用の影響が考えられている。100kHzより高い領域では、刺激作用に加えて、SARを考慮する必要がある。

本研究では100kHz以下の周波数を対象としており、生体内に誘導される電界、電流等の神経系への影響を考慮する必要がある。ICNIRPのガイドラインにおいて電磁界のばく露量の制限値が定められている。本研究では内部誘導される電界値、電流値のことを内部誘導量とする。本研究におけるばく露装置の設計指針も基本制限値を指標としており、ばく露装置の設計において、内部誘導量を考慮する必要がある。しかし、内部誘導量を測定することは困難である。そのため、我々は数値シミュレーションを用いたばく露評価の結果から、内部誘導量を推定し、ばく露装置の設計を行った。つまり、本研究では装置に関しては入射磁界量を明らかにする。また、基本制限である内部誘導量（誘導電流密度及び誘導電界）も同時に評価できるようにする。

細胞ばく露実験ではIF磁界と細胞との相互作用の基礎検討を行うので、入射磁界を以下のように考える。(1)Dose-Responseの観察のため住環境レベルから可能な限り強いレベルの磁界ばく露を行得るような装置とする。(2)入射磁界は20kHz付近の単一周波数とする。(3)入射磁界分布は可能な限り一様とする。-内部誘導量依存性に関しては容器のサイズを変更することで対応する。これらのことを考慮しばく露装置の設計指標として、以下の項目を達成することを目的とする：

(1)周波数：20kHz。

(2)最大入射磁界：短時間運転時：3.4mT（参考レベル（一般公衆）の約540倍）、連続運

転時：2.0mT（参考レベル（一般公衆）の約320倍）。

(3)細胞用のばく露空間は最低限 150mm×150mm×150mmとし、その領域内では磁界強度の偏差を±5%以内とする。

(4)容器のサイズを変更することにより、内部誘導量（誘導電流密度、誘導電界）の条件を変更可能。

動物用ばく露装置開発では以下のようなばく露指標・ばく露条件を考慮した。今日、多くの家電機器が普及し、その周囲にはある程度の電磁界の漏洩がある。生活環境下では、それらを長時間の使用することが想定されている。これら家電機器は生体影響への配慮として ICNIRP のガイドラインにおける制限値を考慮している場合が多い。しかし、100kHz以下の周波数では ICNIRP ガイドラインの基本制限値は神経系への急性影響が根拠になっており、長時間ばく露され続けるような場合の影響が考慮されていない。このことから慢性影響に対して調査が必要となる。生活環境下において、人体への磁界ばく露は局所的にばく露される場合が考えられる。そのため、妊娠中の妊婦が磁界に曝された場合、胎児付近に局所的に強い磁界が曝される場合があると考えられる。本研究では、胎児への発生に対する影響を評価することを目的としており、電磁界の胎児への影響の要因を限定するため、母ラットへのばく露量を軽減する局所ばく露装置の開発を行った。

B.2 細胞用ばく露装置の設計

B2.1 磁界発生装置設計

ここでは磁界発生装置構成と設計指針について述べる。本磁界発生装置は電源部に単相フルブリッジインバータと LC 直列共振回路を用いている。また、装置全体を考慮した設計指針を示す。

図B2.1に示すように、本磁界発生装置は、フルブリッジインバータとLC直列共振回路から構成されている。表6に製作したインバータの仕様を示す。パワーデバイスにIGBTを用いており、直流定格電圧280 V、交流出力電流2Aである。本インバータは、スイッチング素子SW.1, SW.4 とSW.2, SW.3 を交互に20kHzでオン・オフすることで矩形波電圧 v_{INV} を出力させ、正弦波電流 i_L を生成している。インバータのデューティ比は一定（50%）であるため直流電源の出力電圧 V_{DC} の振幅を調整することにより i_L を可変できる。ここで、 L は磁界発生用コイル、 C は共振用コンデンサ、 R は電線抵抗である。

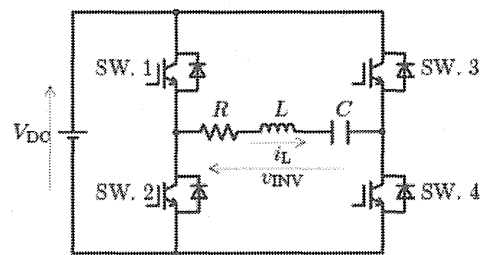


図 B2.1 回路構成

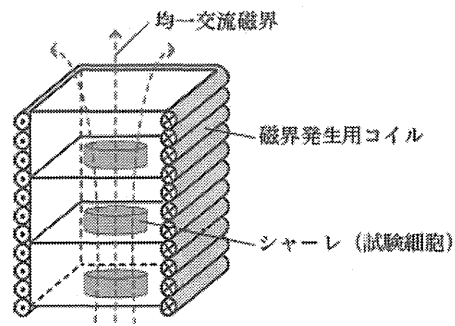


図 B2.2 細胞用ばく露装置の概念図

図B2.2に示すように、空芯状の磁界発生用コイル L に20kHzの正弦波交流電流を流し、シャーレ（試験細胞）に対して空間的に均一な磁界を発生させる。空芯コイル内部に発生する磁界は電流 i_L とコイル形状によって決まる。つまり、磁界発生装置の実用設計を構築するには、電流 i_L とコイル形状の関係を明確にすることが求められる。同時に、共振用コンデンサの耐圧など電氣的制限も同時に考慮する必要がある。

次に、磁界発生装置の設計指針を示す。次に示す4点を設計指針として磁界発生装置開発を行う。

- (1)広範囲の均一磁界領域
- (2)高磁界出力
- (3)ひずみの少ない20kHz交流磁界を発生
- (4)長時間連続駆動

まず、ばく露を行う細胞に対して空間的に均一な磁界を発生させる必要がある。また、より多くの培養容器を設置できることが求められるため均一磁界領域の拡大が1点目の設計指針となる。磁界発生用コイルの詳細設計を行うことで均一磁界領域の拡大を目指す。

出力磁界強度の高出力化を2点目の設計指針とする。前章に示したように、広範囲均一磁界と高磁界を両立させることは難しい。しかし、今までに磁界発生装置の詳細設計を示した文献は見当たらない。そのため、空間的に均一に磁界を発生させる場合、実現可能な出力磁界強度がどの程度なのか明らかにされていない。そこで、本研究では磁界発生用コイルの詳細設計だけではなく装置全体を考慮した設計法の構築を目指している。また、電源部に汎用交流電源ではなく単相フルブリッジインバータを用いることで消費電力に対する出力磁界強度の高効率化を図る。

ばく露環境統制のために、ひずみの少ない20kHz正弦波交流磁界を発生させる必要がある。これを3点目の設計指針とする。本磁界発生装置の電源部はLC直列共振回路で構成される。そして共振周波数を20kHzに設定、共振周波数周辺でスイッチングさせることで正弦波電流をコイルに流し、ひずみの少ない交流磁界が発生可能である。

また、生体影響を調査するため長時間（数時間～数日間）にわたる連続駆動が求められる。そこで、実際に長時間駆動させた場合のコイル発熱に関して検討する。

なお、設計法の妥当性を確認するために磁界発生装置を試作し、実験と計算より確認した。

B2.2 磁界発生用コイル設計

ここでは、ソレノイド型及び四角型磁界発生用コイル設計について述べる。まず、各コイル型の出力磁界強度計算法を示す。20k～100kHzの交流磁界は静磁界と同様の計算で求められる。続いて、コイルインダクタンスの計算法を示す。また、Merritt4 コイルの実現可能性を含めた詳細設計法も本章で述べる。なお、磁界及びインダクタンス計算については文献[12-15]を参考としている。

四角型コイルの出力磁界計算は、ビオ・サバールの法則を用いることで求めることができる。図 B2.3 に示すような正方形コイル ABCD に電流 I を流したとき、任意の点 $P(x, y, z)$ における磁界強度を求める。四角型コイルが発生する磁界を求めるには、1 辺それぞれが発生する各方向成分の磁界を足し合わせればよい。ここでは、 z 軸方向成分について示す。まず、辺 AB が点 P に作る磁界は、ビオ・サバールの法則より

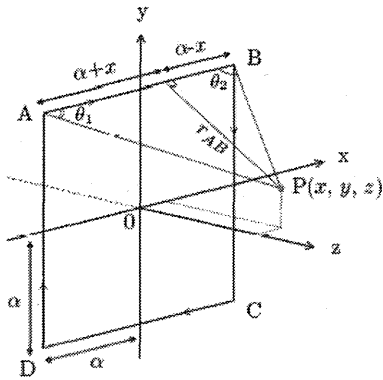


図 B2.3 四角型コイルにより生成される磁界の計算

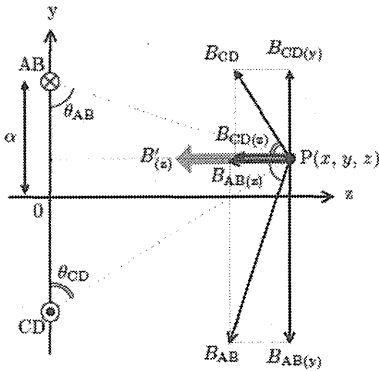


図 B2.4 四角形コイルにより生成される磁界の計算：y-z 断面

$$B_{AB} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_{AB}} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (B2.1)$$

$$r_{AB} = \sqrt{(\alpha - y)^2 + z^2} \quad (B2.2)$$

$$\cos \theta_1 = \frac{\alpha + x}{\sqrt{(\alpha + x)^2 + (\alpha - y)^2 + z^2}} \quad (B2.3)$$

$$\cos \theta_2 = \frac{\alpha - x}{\sqrt{(\alpha - x)^2 + (\alpha - y)^2 + z^2}} \quad (B2.4)$$

となる。ここで、 r_{AB} は辺 AB から点 P までの距離、 θ_1 及び θ_2 は頂点 A、B から点 P を望

む角度である。同様に B_{BC} 、 B_{CD} 、 B_{DA} を求めることができる。 B_{AB} と B_{CD} は y 軸と z 軸方向成分のみをもち、 B_{BC} 及び B_{DA} は x 軸、z 軸方向成分のみをもち、合成磁界は、各方向成分ごとの和になるので、図 B2.4 に示す B_{AB} 、 B_{CD} の合成磁界を考える。図 B2.4 は、正方形コイル ABCD を x 軸方向から見た側面図である。AB、CD から点 P を望む角度をそれぞれ θ_{AB} 、 θ_{CD} とすると、 B_{AB} 、 B_{CD} の y 軸、z 軸方向成分 $B_{AB(y)}$ 、 $B_{AB(z)}$ 、 $B_{CD(y)}$ 、 $B_{CD(z)}$ は、図 8 のように分解することができる。そこで z 軸方向に関して

$$B_{AB(z)} = B_{AB} \times \cos \theta_{AB} \quad (B2.5)$$

$$B_{CD(z)} = B_{AB} \times \cos \theta_{CD} \quad (B2.6)$$

$$\cos \theta_1 = \frac{\alpha - y}{\sqrt{(\alpha - y)^2 + z^2}} \quad (B2.7)$$

$$\cos \theta_2 = \frac{\alpha + y}{\sqrt{(\alpha + y)^2 + z^2}} \quad (B2.8)$$

$$B'_{(z)} = B_{AB(z)} + B_{CD(z)} \quad (B2.9)$$

となる。同様に B_{BC} 、 B_{DA} の z 軸方向成分を計算でき、その和を B''_z とすると、四角コイル ABCD が点 P において発生する磁界の z 軸方向成分は、

$$B_{(z)} = B'_{(z)} + B''_{(z)} \quad (B2.10)$$

となる。

x、y 軸方向成分に関しても同方法で計算できる。なお、x、y 軸方向成分は図 8 中の $B_{AB(y)}$ 、 $B_{CD(y)}$ のように逆方向になるため、符号に注意する必要がある。また、複数巻の場合は巻数分の和となるが、コイル位置座標を明確にし、

コイルの作る面をz座標方向に移動させて各コイルについて計算する必要がある。

次に四角型コイルの自己インダクタンス計算法を示す。ソレノイド型コイルでは長岡係数を用いて計算したが、四角型コイルでは Neumann の公式[14]を用いた計算が一般的である。四角型コイルは2組の平行線からなるコイルと考えることができる。そこで、平行線間の相互インダクタンスを検討し、拡張することで四角型コイルのインダクタンスを求める。まず、Neumann の公式を説明する。図 B2.5 に示すような回路 C_1, C_2 の線要素 ds_1, ds_2 間の距離を r , 両要素の方向間の角度を θ とすると、両回路の相互インダクタンス M_{12} は次のようになる。

$$M_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{C_1} \oint_{C_2} \frac{ds_1 \cdot ds_2}{r} \quad (\text{B2. 11})$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{C_1} \oint_{C_2} \frac{\cos \theta ds_1 ds_2}{r}$$

これを Neumann の公式という。

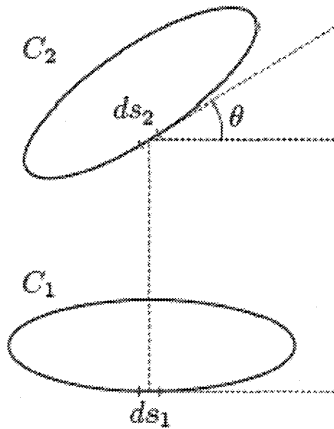


図 B2.5 Neumann の公式

この考え方をういて図 B2.6 に示す間隔 d で平行する長さ l の細い2線間の相互インダクタンスを求める。式(B2.11)において、 $ds_1=dx_1, ds_2=dx_2$, また2線は平行なので

$$\theta=0, r=\sqrt{d^2+(x_2-x_1)^2} \quad (\text{B2. 12})$$

とおけるので、

$$M_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^l \int_0^l \frac{dx_1 \cdot dx_2}{\sqrt{d^2+(x_2-x_1)^2}} \quad (\text{B2. 13})$$

$$= \frac{\mu_0}{2\pi} \left\{ l \log \frac{\sqrt{d^2+l^2}+l}{d} - \sqrt{d^2+l^2} + d \right\}$$

となる。また、 $d=l \ll 1$ のときは、

$$M_{12} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\log \frac{2l}{d} - 1 \right) \quad (\text{B2. 14})$$

となる。

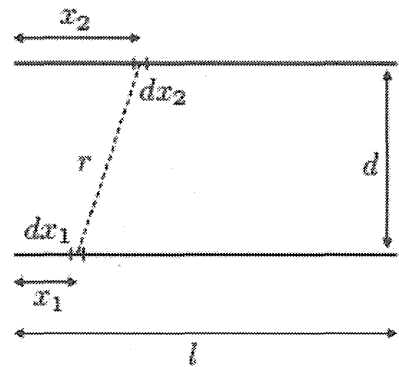


図 B2.6 平行線路における相互インダクタンス

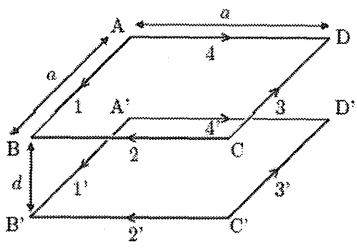


図 B2.7 平行に配置された四角型コイルの相互インダクタンス

続いて、図 B2.7 に示す 1 巻き正方形コイルを間隔 d で平行に正対させるときの相互インダクタンスを考える。式(B2.11)において、図 B2.7 中の辺 AB に対して A'B'は $\theta=0$ ($\cos \theta=1$)、B'C'は $\theta=\pi/2$ ($\cos \theta=0$)、C'D'は $\theta=\pi$ ($\cos \theta=-1$)、D'A'は $\theta=3\pi/2$ ($\cos \theta=0$)となる。図の辺 k, l 間の相互インダクタンスを $M_{k,l}$ とすると、全体の相互インダクタンスは、

$$M = (M_{1,1'} - M_{1,3'}) + (M_{2,2'} - M_{2,4'}) + (M_{3,3'} - M_{3,1'}) + (M_{4,4'} - M_{4,2'}) \quad (\text{B2.15})$$

である。また、ここでは 1 辺 a の正方形コイルを検討しているため、

$$M_{1,1'} = M_{2,2'} = M_{3,3'} = M_{4,4'} \quad (\text{B2.16})$$

$$M_{1,3'} = M_{3,1'} = M_{2,4'} = M_{4,2'} \quad (\text{B2.17})$$

となる。つまり、正方形コイルの相互インダクタンスは、

$$M_{\text{square}} = 4(M_{1,1'} - M_{1,3'}) \quad (\text{B2.18})$$

となる。また、 $M_{1,1'}$ 、 $M_{1,3'}$ は、

$$M_{1,1'} =$$

$$\frac{\mu_0}{2\pi} \left\{ a \log \frac{\sqrt{a^2 + d^2} + a}{d} - \sqrt{a^2 + d^2} + d \right\} \quad (\text{B2.19})$$

$$M_{1,3'} =$$

$$\frac{\mu_0}{2\pi} \left\{ a \log \frac{\sqrt{2a^2 + d^2} + a}{\sqrt{a^2 + d^2}} - \sqrt{2a^2 + d^2} + \sqrt{a^2 + d^2} \right\} \quad (\text{B2.20})$$

である。

続いて、四角型コイルの自己インダクタンスの計算法を示す。自己インダクタンスは、内部インダクタンス L_i と外部インダクタンス L_e の和である。半径 rl 、長さ l の導線の内部インダクタンスは、文献[16]より

$$L_i = \frac{\mu l}{8\pi} \quad (\text{B2.21})$$

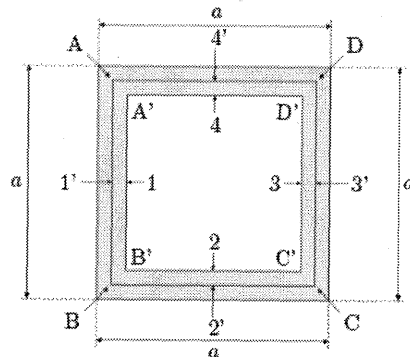


図 B2.8 四角型コイルの自己インダクタンス

となることがわかっている。この内部インダクタンスは半径に無関係なパラメータである。このことを踏まえて、図B2.8に示す1辺 a の正方形コイルABCDの自己インダクタンスを求める。ここでは、1辺長 a に対して電線半径 r_l が十分小さいとする。まず、内部インダクタンスは式(B2.22)より

$$L_i = 4 \times \frac{\mu_0 a}{8\pi} = \frac{\mu_0 a}{2\pi} \quad (\text{B2.22})$$

となる。次に外部インダクタンス L_e を求める。ABCDに電流 I を流すときにコイル内側A'B'C'D'内に生ずる磁束を Φ とすると、外部インダクタンスは $\Phi = L_e I$ より求められる。ここで、ABCDとA'B'C'D'間の相互インダクタンスは、 $\Phi = MI$ から求めることができる。したがって、 M を計算することで L_e を求めることができる。つまり、式(B2.23)(B2.24)より正方形コイルの自己インダクタンスは

$$M_{1,1'} = \frac{\mu_0 a}{2\pi} \left(\log \frac{2a}{r_l} - 1 \right) \quad (\text{B2.23})$$

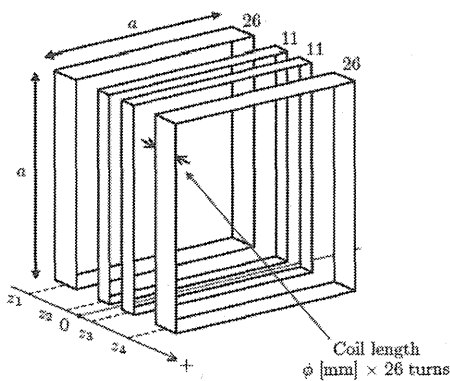


図 B2.9 Merritt4 コイル

$$M_{1,3'} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left\{ a \log \frac{\sqrt{2a^2 + a} - \sqrt{2a^2 + a}}{a} \right\} \quad (\text{B2.24})$$

$$M = L_e = 4(M_{1,1'} - M_{1,3'}) \quad (\text{B2.25})$$

$$L = L_i + L_e \quad (\text{B2.26})$$

となる。

関連研究に関する考察より、Merritt4コイルの構造が均一磁界分布の生成に優れていることが判明した。そこで本研究では、Merritt4コイルを磁界発生用コイルとして採用する。Merritt4コイルとは、アンペア・ターン比がそれぞれ26:11:11:26となるような同形状の4台の正方形空芯コイルから構成され、コイル1辺の長さ a によって各コイル配置間隔が決定する。従来の磁界発生用コイルは、1巻きコイルで検討しており、アンペア・ターン比を電流比によって振り分けている。本装置では一台の電源回路(インバータ)で4台のコイルを駆動させるため、各コイルは直列接続されている。つまり、既定のアンペア・ターン比を巻数比として決める必要がある。つまり、図B2.9, B2.10に示すように電線径 ϕ ×巻数分のコイル長が存在する。

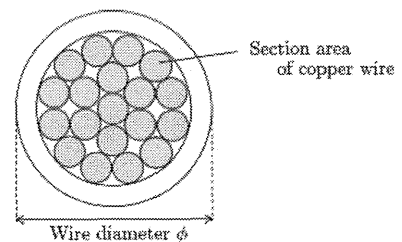


図 B2.10 リッツ線の構造