

200705034A

厚生労働科学研究費補助金

平成19年度厚生労働科学特別研究事業

「中間周波電磁界の健康リスク評価」
(H19—特別—指定—026)

研究報告書

主任研究者 大久保 千代次

平成20(2008)年4月

目 次

I. 総括研究報告

中間周波電磁界の健康リスク評価	大久保千代次	-----	1
-----------------	--------	-------	---

II. 分担研究報告書

1. 分担研究報告書	鈴木敬久、和田圭二、渡辺総一、和気加奈子、 酒井泰二	-----	4
2. 分担研究報告書	牛山 明	-----	13
3. 分担研究報告書	池畑政輝、吉江幸子、石井一行、小笠原裕樹	-----	15
4. 分担研究報告書	笠島 茂、杉森裕樹、毛利一平、高尾総司	-----	17

厚生労働科学研究費補助金（健康科学総合研究事業）

総括研究報告書

中間周波電磁界の健康リスク評価

主任研究者 大久保 千代次（明治薬科大学大学院環境生体学教授）

研究要旨

近年、誘導加熱調理器（IH 調理器）が普及し、火災に対する安全性から市民の関心が高まっている。しかしこれまで、この周波数領域は労働環境以外ではあまり利用されていなかったため、生体に対する作用を直接的に示すデータが世界的にも不足しており、2007年6月発刊されたWHO環境保健クライテリア（EHC No.238）においても、中間周波領域の生体影響に関する全ての研究領域の推進が第1段に勧告されている。そこで、本研究は、IH調理器で使用されている20kHz帯の中間周波電磁界の健康リスク評価を行う事を目的とした。本年度は平成20年度より開始される予定であった本格的な研究を行う為の研究デザインの検討と生物学的研究に供する中間周波電磁界暴露装置の電源開発を行った。

多氣昌生 首都大学東京 教授
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
渡辺総一 情報通信研究機構研究 マネージャー
和氣加奈子 情報通信研究機構 主任研究員
酒井泰二 情報通信研究機構 専門研究員
牛山 明 国立保健医療科学院 室長
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 研究員
石井一行 明治薬科大学 准教授
小笠原裕樹 明治薬科大学 専任講師
笠島 茂 国立保健医療科学院 室長
杉森裕樹 大東文化大学 教授
毛利一平 労働安全衛生総合研究所部長代理
高尾総司 岡山大学大学院 講師

料を家庭内で燃焼しない「オール電化住宅」への関心が高まっている。オール電化住宅とは、これまでガスや灯油が担っていた給湯、厨房、空調の全てを電気によって賄うものである。特に厨房においては、誘導加熱調理器（IH調理器）が普及し、火災に対する安全性から市民の関心が高まっている。IH調理器で使用するのは、主に周波数20kHzの中間周波数帯に属する電磁界であるが、これまで、この周波数領域は労働環境以外ではあまり利用されていなかったため、生体に対する作用を直接的に示すデータが世界的にも不足しており、2007年6月発刊されたWHO環境保健クライテリア（EHC No.238）においても、中間周波領域の生体影響に関する全ての研究領域の推進が第1段に勧告されている。これまでの研究において、IH調理器使用時の漏れ磁界強度は、これを定める国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）ガイドライン値の参考レベル（20kHzで6.25μT〔マイクロテスラ〕）を部分的に上回る場合があるという報告もある。低周波および高周波領域では、当該参考レベルを上回る電磁界強

A. 研究目的

近年、高齢化などを受けて、化石燃

度に遭遇することは、生活環境では稀であること、IH 調理器は、家庭内で妊婦を含む一般人が連日これを使用していることから、国民の IH 調理器への健康影響に対する懸念は非常に強いと考えられる。これらの理由から、安全・安心の社会の構築に向けて、中間周波電磁界の生体影響について科学的知見の蓄積が早急に必要であると考えられる。

本研究においては、次年度以降の細胞実験および動物実験に使用するための中間周波磁界暴露装置に必要な条件を明らかにし、その基本設計を行う事を目的とした。特に、暴露に付随する環境要因による影響に注意を払う。例えば、動物用の電磁界暴露装置から発生する 20 kHz 以上の超音波、高電圧による放電、大電流による熱の発生などの影響についての評価と対策方法を検討する。また、IH 調理器から漏洩する 20 kHz を中心とする電磁界の健康影響について、文献調査により情報集を行い、健康リスク評価を実施する場合に必要な生物学的研究と疫学研究のあり方と、研究が確実・有効に実施出来るよう研究実施計画を構築することを第2の目的とした。

本研究は、その特殊性から電気工学的暴露評価が不可欠である。そこで電気工学を専門とする電気工学班を設けると共に、健康リスク評価に不可欠な、細胞研究班と動物研究班、さらには疫学研究班の4班を構築した。

B. 研究結果

本研究は、その特殊性から電気工学的暴露評価が不可欠だったので、電気工学を専門とする電気工学班を設けると共に、健康リスク評価に不可欠な、細胞研究班と動物研究班、さらには疫学研究班の4班を構築した。以下に各班の研究結果の概要を示す。

「電気工学班」

本研究では主に最近普及が著しく伸びている誘導加熱(IH)調理器(電磁調理器)の発生する電磁界に起因する生体影響に関して知識を得ることを目的としている。本研究では中間周波数帯における細胞用暴露装

置に必要な条件に関して検討し曝露システムを構成するための個々の要素について検討した。結論として必要条件を満たす曝露装置を実現するためには今回作成したコイルを並列化することが必要であり、並列化された回路にそれぞれインバータ電源を接続するようなシステムの構成を検討しなければならない。またそのようなシステムのための電源の制作を行い、基本的な動作試験を行った。

「動物班」

2007年に発刊されたWHOの電磁界に関する環境保健基準(EHC)では研究の推進が勧告されている。本研究においては、現時点での動物実験を中心とした過去の知見をまとめ、今後の研究においてどのような研究デザインを適用するのがよいか検討を行った。

20kHzの中間周波電磁界に関する変異原性試験等の細胞実験については、我が国の宮越らが報告をおこなっている⁽¹⁾⁽²⁾が、ヒト細胞を用いた突然変異誘発については報告がなく、また、動物を使用した突然変異誘発の有無を検討した結果もない。したがって、これらを網羅的に検討することは必要であると考えられた。

「細胞班」

本研究では、中間周波の健康リスク評価のために、これまでの科学的知見をまとめた上で必要な細胞研究の要素を選定し、今後の研究のデザインを検討することを目的とした。

これまでの中間周波磁界の生物影響に関する報告は非常に少なく、特にIH調理器を念頭に置いた研究は、世界規模で見ても日本における中園、宮越、中馬らの報告があるに過ぎず、基礎的な知見が不足していることが明らかとなった。これらのうち、中園らの研究は2,20,60kHzの正弦波の遺伝毒性評価を微生物変異原性試験や酵母を用いた変異原性試験で評価しており、最大1mTの磁界を評価しているが、変異原性ならびに助変異原性を認めないとの結果である。また、宮越らの研究では、DNA切断、遺伝子変異等がIH調理器実機を模擬した

暴露波形 23kHz、0.5mT では認められなかったと報告しているが、暴露時間（2時間）や模擬波形（高調波等を含む）など、特殊な要因が含まれていると考えられる。したがって、中間周波磁界に関しては、今後遺伝毒性をはじめとして、遺伝子発現なども含めた幅広い知見の蓄積が必要であると考えられた。

「疫学班」

IH 調理器による 20Hz 付近の中間周波電磁界への曝露とヒトの流産に関する疫学研究の実施に際して必要と考えられる方法の検討を目的とした。

本年度は中間周波電磁界の健康リスクに関する先行研究のレビュー、曝露測定についての検討、曝露を中間周波電磁波、アウトカムを流産とした場合の交絡因子についての検討を行った。

先行研究のレビューについては、曝露評価の方法に焦点をあてたレビューを実施した。IH 調理器による中間周波電磁界の健康リスクに関する研究には疫学に関するものは少なく、動物実験が大部分であった。極低周波電磁界曝露と流産との疫学的関連性に関するものを先行研究として参考にしようが、現段階では IH 調理器による中間周波電磁界曝露と流産のリスクに関する疫学的知見は極めて乏しいと結論した。

曝露測定についての検討では、家屋内外の電化製品による中間周波電磁波の発生源は多く、かつ、その曝露の頻度・強弱の時間変化やヒトの行動による発生源からの距離の変化が測定される磁束密度の強度に大きな変動をもたらしていることが明らかとなった。実測に関連づけて質問票を作成するには、中間周波電磁波曝露指標の作成に綿密な研究が必要であると考えられた。交絡因子については、悪阻によって調理機会が減少することがあれば当然、調理器に近づくことも減る。従って、悪阻が流産のリスクと関連している場合、それを中間周波電磁界への曝露によるものと誤って評価する可能性は否定できない。従って、行動記録ないし行動量のモニターが必要であると結論した。

D. 考察

平成 20 年度より本格的な研究開始を行う為の、中間周波電磁界暴露装置の開発、動物実験、細胞実験、疫学研究に関する先攻研究レビューと研究デザインについて十分な検討を行うことが出来た。研究は、健康リスク評価に不可欠な、細胞研究班と動物研究班、さらには疫学研究班の 3 班と共に、その特殊性から電気工学的暴露評価が不可欠である。そこで電気工学を専門とする電気工学班を設けた。4 班から構成される研究班の意思疎通を良好に保つため、4 回の全体班会議を開催した。また、各班は班内で班会議を行うと共に、必要に応じ、電気工学班と別途連絡を保った。

D. 結論

中間周波電磁界曝露に伴う健康リスク評価を行う為に必要な、疫学研究、生物学的研究並びにこれらの研究の曝露量制御と定量的評価を行う電気工学的研究体制構築に成功した。

E. 研究発表

なし

F. 知的財産権の出願・登録状況

なし

G. 健康危機情報

なし

別添 4

厚生労働科学研究費補助金（厚生労働科学特別研究事業）

分担研究報告書

中間周波電磁界の健康リスク評価 ～暴露装置の開発～

分担研究者	鈴木敬久	首都大学東京・都市教養学部	准教授
	和田圭二	首都大学東京・都市教養学部	准教授
	渡邊聡一	独立行政法人情報通信研究機構	研究マネージャー
	和氣加奈子	独立行政法人情報通信研究機構	主任研究員
	酒井泰二	独立行政法人情報通信研究機構	専攻研究員

研究要旨

本研究では主に最近普及が著しく伸びている誘導加熱(IH)調理器（電磁調理器）の発生する電磁界に起因する生体影響に関して知識を得ることを目的としている。本研究では中間周波数帯における細胞用曝露装置に必要な条件に関して検討し曝露システムを構成するための個々の要素について検討した。結論として必要条件を満たす曝露装置を実現するためには今回作成したコイルを並列化することが必要であり、並列化された回路にそれぞれインバータ電源を接続するようなシステムの構成を検討しなければならない。またそのようなシステムのための電源の制作を行い、基本的な動作試験を行った。今後今回作成した電源を用いて、中間周波数帯における細胞用曝露システムを作成する予定である。

A. 目的

本研究では主に最近普及が著しく伸びている誘導加熱(IH)調理器（電磁調理器）の発生する電磁界に起因する生体影響に関して知識を得ることを目的としている。このときに生体影響に関して評価するためにはまずばく露する場の量に関して十分に把握しておく必要がある。IH調理器で使用しているのは周波数が約 20kHz 前後の変動磁界であり、生物影響に関して議論する際にこの変動磁界のばく露量を評価出来るようにしなければならない。ここでは変動磁界のばく露量を定量的に把握するために、ばく露装置の設計において、ばく露する方法、ばく露の強度、そしてばく露の周波数などのばく露条件をコントロール出来るよ

うに考慮しておく必要がある。

本年度の研究計画では先に細胞用(in vitro)ばく露のためのシステム設計を検討することになっているため、先に in vitro ばく露システムの前提条件を決めておく必要がある。細胞ばく露の前提条件として本研究では以下の3項目考慮することにする。

- (1)出来るだけ強い強度の磁界ばく露を達成する。
- (2)ばく露領域内の磁界分布は一様である。
- (3)均一な磁界で曝露できる領域を可能な限り広くする。

これらの項目は以下の理由から考慮される必要がある。(1)については強いばく露を考慮することにより、ICNIRP 等で示されているガイドラインのより遙かに高いばく露

条件での検討が可能になる。(2)については細胞試料へ曝露される磁界の空間変動を抑制し、曝露する場所による条件の違いを最低限に押さえるためである。また(3)については磁界に曝露される細胞の収量を出来る限り多くし、統計上の母集団を大きくすることにより、生物学的な評価の精度を高めるためである。以上のような条件を達成することにより十分にコントロールされたばく露条件下での生物学的な評価が可能になる。

本研究では、約 20kHz 前後の周波数において 1mT の磁界強度を達成出来るようなばく露システムの開発を目指す。この磁界強度は ICNIRP ガイドラインにおける公衆に対する参考レベル(6. 25 μ T)の 160 倍であり、管理環境下の参考レベル (30. 7 μ T) の約 33 倍である。また 20cm (幅) x20cm (奥行き) x20cm (高さ) のインキュベータを想定し、そのインキュベータの占める体積部分をばく露領域と考え、ばく露領域内磁界の空間変動に関しては 10%以内を達成できるような設計を行う。

本年度は、来年度以降に実際に上記の条件を達成できるばく露システムを作成するための準備として、システムの各構成要素の検討を行っている。本年度は具体的に以下のような手順で検討を進めた。

- (1) ばく露システムの概念設計に基づいた具体的な磁界発生用コイルの作成
- (2) (1)で作成した磁界発生用コイルの駆動実験を行い、磁界発生用コイルを駆動する回路について検討し、駆動用電源の条件を決定する。
- (3) (2)の駆動実験データに基づいた細胞用ばく露システムのための電源設計と作成。

このような各要素の手順を経て来年度以降の本格的なばく露装置作成に対する準備を行った。なお(3)の電源作成に関しては、来年度以降の本格的なばく露装置作成において同型のを複数使用する設計を念頭において、今年度は事前にその中の 1 台を作成し、電源のみの基本的な試験を行っている。

B. 結果

1. ばく露装置の設計

ばく露装置の基本設計として図 1 のようなヘルムホルツ型のコイルを検討した。ヘルムホルツ型のコイルでは、図 1 の 2 つのコイルに同じ大きさの電流を流した時におおよそ $a=2b$ という関係を満たしていれば原点 o 近傍に比較的均一な磁界が生じる。

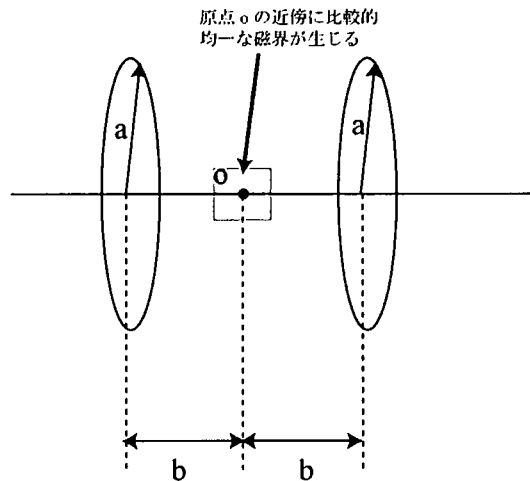


図 1 ヘルムホルツ型のコイルの概略図

このような性質を利用して図 2 のようなばく露装置の設計を行った。図に示すように、今回設計したばく露装置はヘルムホルツ型のコイルを基本にしており、2 つのコイルに挟まれるような位置にインキュベータを位置させている。インキュベータにおいて細胞試料を配置できる空間は内部の 20cm (幅) X20cm (奥行き) X20cm (高さ) の空間であり、その中心は図 1 の座標原点に一致するように設置する。2 つのコイルはその面が地面に水平になるように設置し、磁界は地面に垂直な方向に向くような設計になっている。図 2 の設計において数値計算により推測される磁束密度分布を図 3 に示す。図 3 において $-10\text{cm} < x, y, z < 10\text{cm}$ の範囲が細胞を配置する空間である、図 3 の左側に示すカラーバーは磁束密度を示し、右図の磁束密度分布を示す色と対応している。この図からコイルを本構成にすることにより、細胞を配置する空間内においてほぼ均一な磁界を発生できることが分かる。細胞を配置する空間内において

磁界の空間変動はばく露空間内の磁界の平均値を基準にして約±1%以内に納まって

いることが計算により示された。

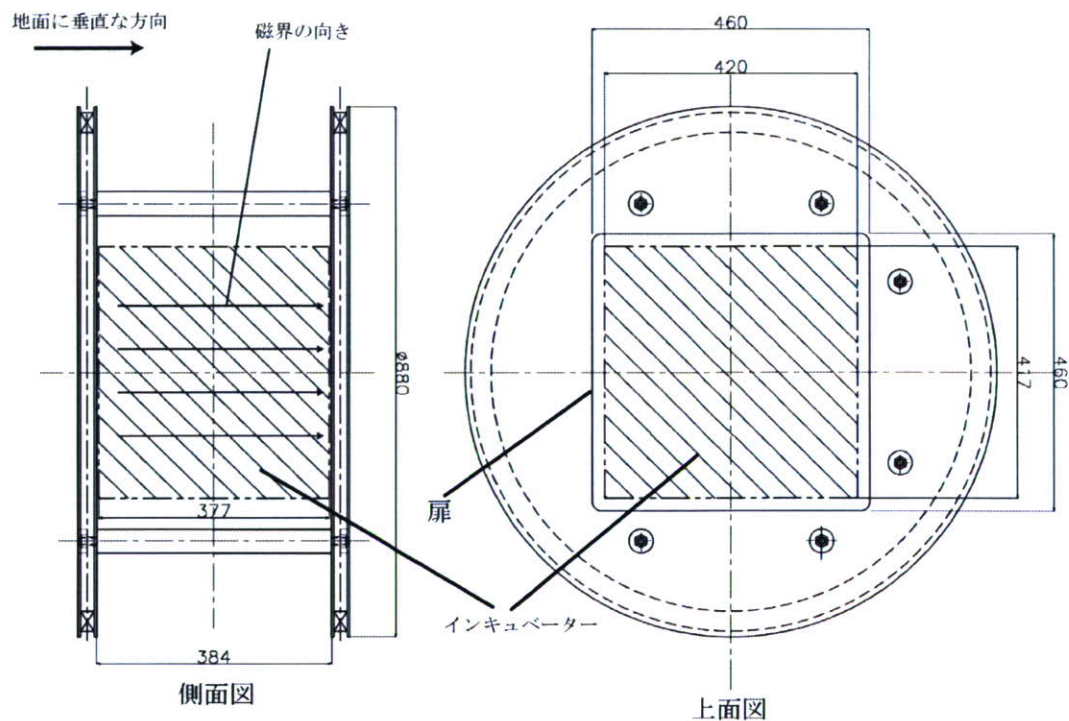


図2 細胞ばく露のためのばく露装置。ヘルムホルツ型コイルを基本にした設計である。インキュベーターはコイルの内側に位置している。磁界の向きは地面に垂直な方向である。

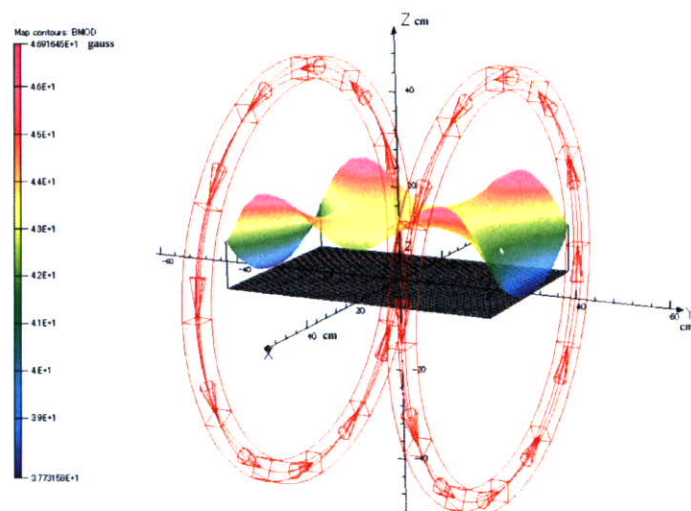


図3 図2の設計を基に計算した磁束密度分布

上述の設計をもとに予備的な検討のためのコイルの製作を行った。製作したコイルの写真を図4に示す。また実際の磁界分

布を得るために直流電流をコイルに流し、磁界測定を行った。原点における電流・磁場強度特性を図5に示す。この図から磁束密

度の強度 1mT を達成するためにはコイルに約 4A の電流を流す必要があることが分かる。図 6 に磁束密度の大きさの Y 軸上の分布を、図 7 に Y=0 において座標原点からの距離を r としたときの Z-X 平面上の分布をそれぞれ示す。座標系は図 3 に示すものを使用している。これらの実測値からも、

細胞を曝露する空間である $-10\text{cm} < x, y, z < 10\text{cm}$ の範囲内において、磁束密度の大きさは空間的にほぼ一様であることが分かる。実測においてもばく露空間内での磁束密度強度の空間的な変動は約 1%以内であった。



図 4 予備的な検討のために作成したコイル

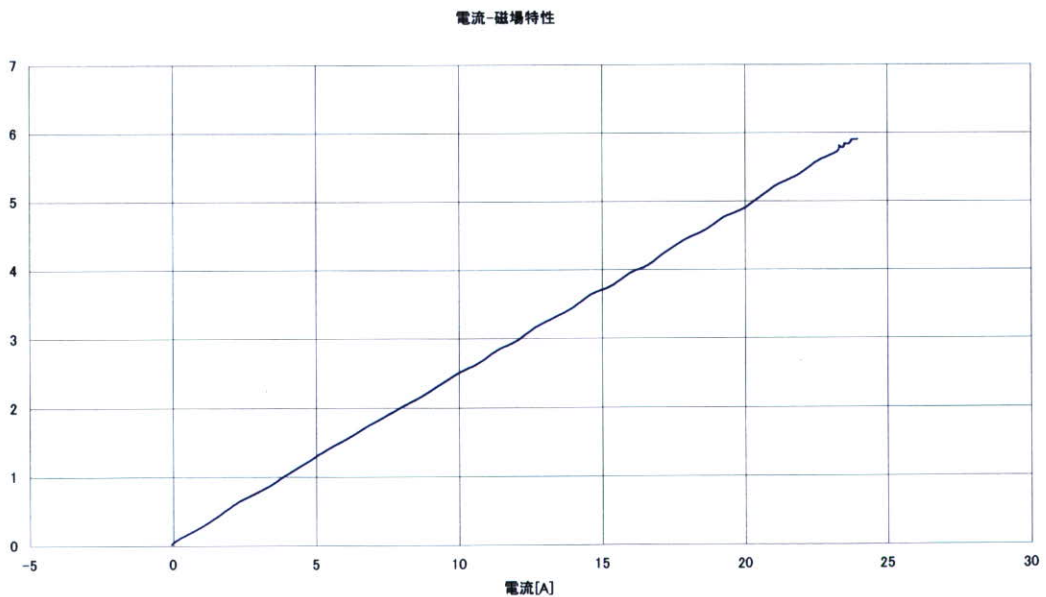


図 5 直流電流駆動により得られた電流-磁場強度特性

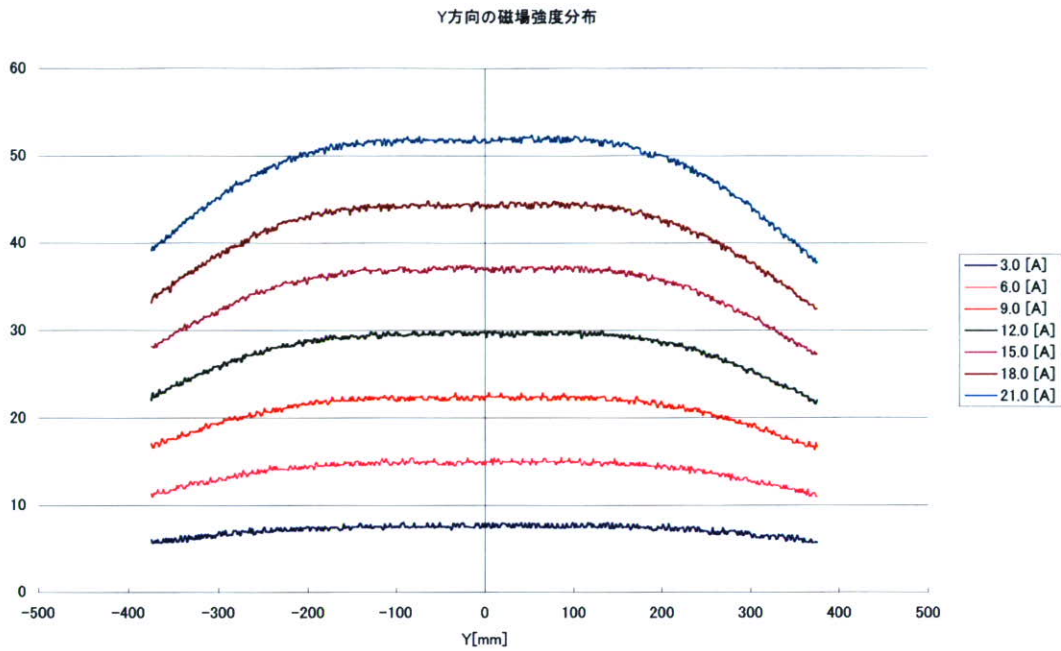


図6 Y方向の磁束密度の大きさの分布

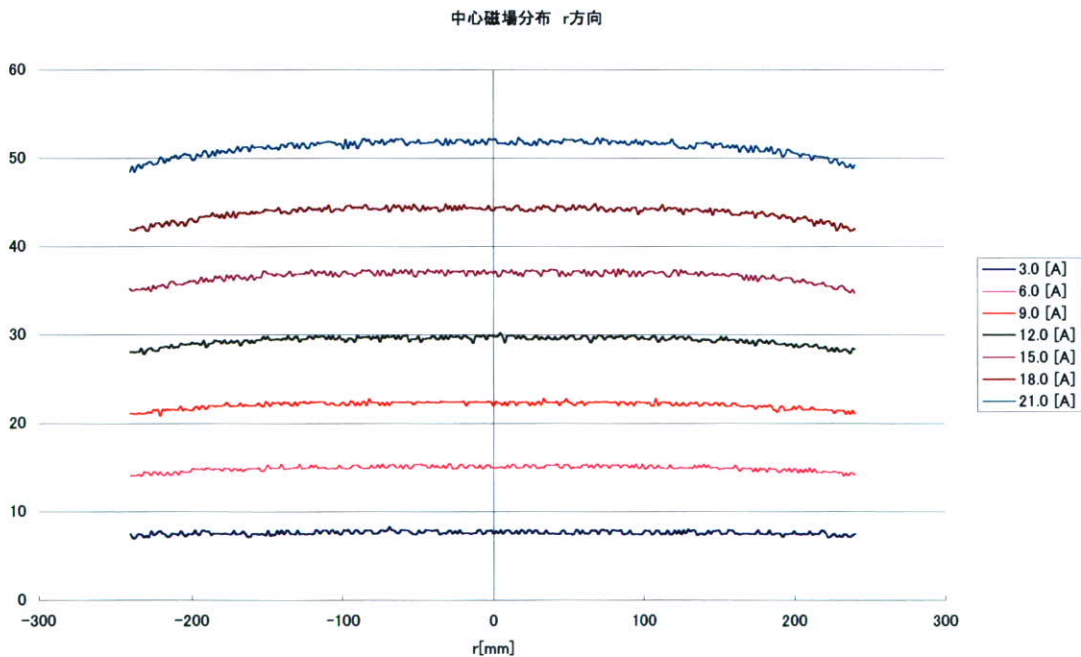


図7 $Y=0$ の Z-X 平面における磁束密度の大きさの分布。r は原点からの距離を示す。

2. 予備実験

前節で述べたように 1mT 以上の曝露条件を達成するためには少なくとも 4A 以上の電流を流す必要がある。図3における2

つのコイルを直列に接続し電源により直接駆動することを仮定すると、20kHz において設計したコイルのインダクタンスは約 100mH になる。このときコイルに 4A の電

流を流すとコイル両端の電圧は 12kV になる。従って 48kVA 以上の容量を持つ電源が必要であり電源側にはほぼ全電力が反射くる状況を想定しなければならない。このような電源を制作準備することは容易ではないので、コイルを駆動するためにコイル(L)とコンデンサ(C)の直列共振を利用した回路を検討し、必要な電源の仕様について考察を行う。

本研究ではインバータを用いた LC 直列共振によるコイルの駆動を行う予定であり、予備的な検討として図8のようなインバータ回路を使った実験を行った。実験では直流電圧 E を 70V、電力用半導体素子(MOSFET)のスイッチング周波数を 20kHz に設定して実験を行った。回路図中の L は

磁界発生用コイル、C は共振用コンデンサである。なお、コンデンサは 1.2nF、2000V 耐圧のフィルムコンデンサを使用した。図9に実際の実験の様子を示す。また図10はコイルによる磁場の測定の様子である。

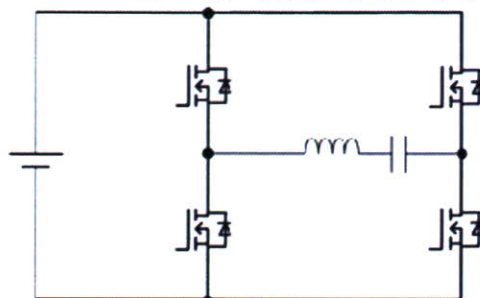


図8 予備実験で用いたインバータ回路

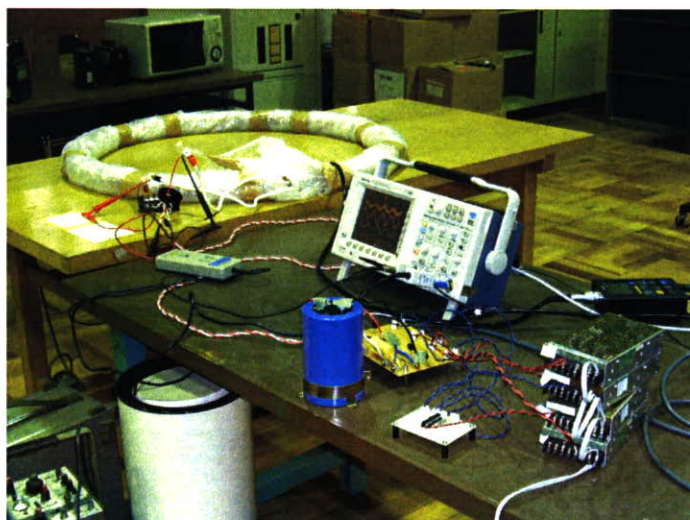


図9 コイル駆動のための予備実験の様子

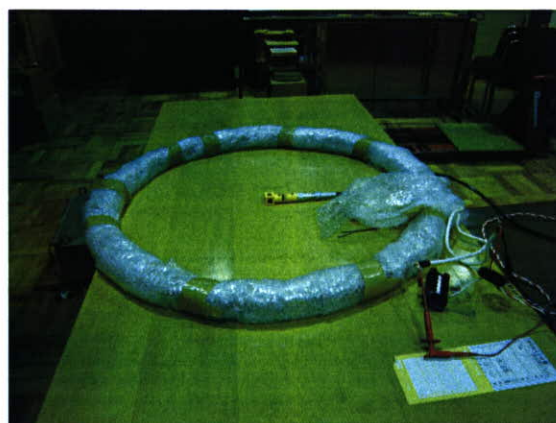


図10 コイルにより発生する磁場の測定

実験時のコイル両端の電圧波形、コイルに流れる電流波形、磁界中心付近の磁束密度を図 1 1 に示す。なお、実験ではオシロスコープを用いて各部の波形を観測した。

交流電流の測定には交流電流センサ(U_RD CTL-24-TE)、磁束密度の測定には磁界プローブ(HIOKI 3470)を用いた。

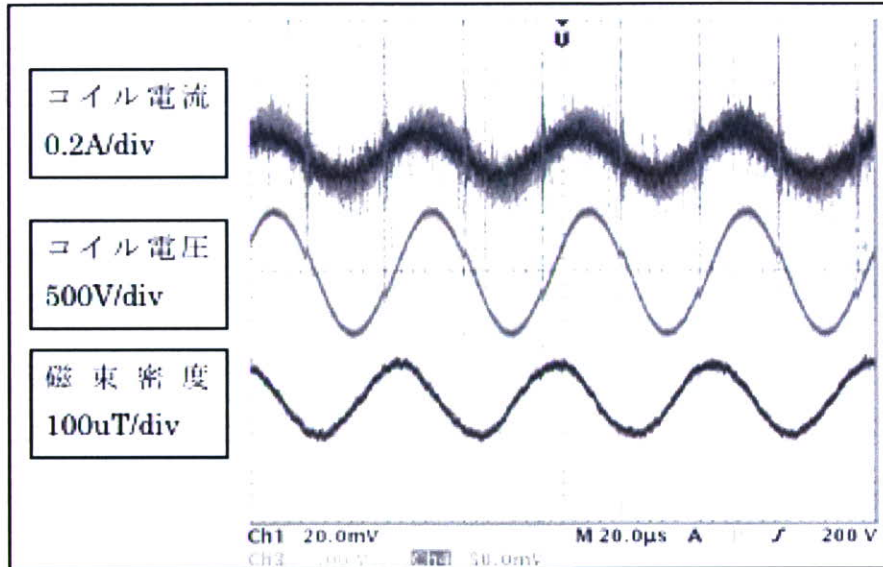


図 1 1 コイルに流れる電流、コイル両端の電圧、コイルが発生する磁界の測定結果

なお、この実験ではコイル中心付近の磁束密度の実効値は $20\mu\text{T}$ である。実際の試験ではさらに大きい値の磁界を発生させる必要があるが、試作インバータの MOSFET の電圧定格の関係上、これ以上の実験をすることはできない。また、本実験では共振用コンデンサの電圧も 400V 程度に上昇している。コンデンサの電圧定格としてはまだ余裕はあるが、 1mT 程度の磁界を発生させようとする場合には数十 kV 耐圧のコンデンサが必要となる。 20kHz の周波数で使用でき、かつ数十 kV のコンデンサの入手は容易ではなく、今後の課題と考えることができる。コイル電流に大きなスパイク上のサージが発生しているが、共振回路のインピーダンスが電源のスイッチング周波数成分に対しては容量性リアクタンス成分になっているためと考えられる。実験装置のスイッチング周波数成分は PIC マイコンを用いているため、プログラムの書き換えにより容易に周波数の変更は可能である。

以上の結果より、単相フルブリッジ

ンバータ回路を用いた磁界発生が可能であることを示した。ただし、より大きな磁界を得るためには半導体素子の定格を大きくする、コンデンサの電圧定格を高くする必要がある。

次に、正確な共振周波数での検討を行うための試験用電源装置を用いた模擬実験結果を示す。回路図は図 1 2 の通りである。

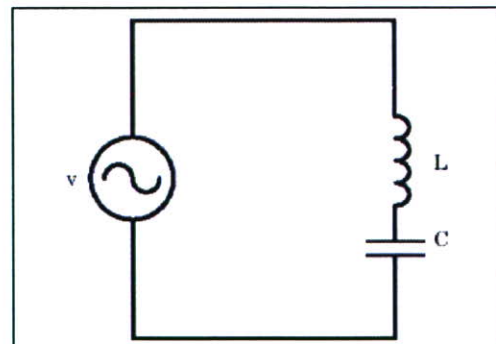


図 1 2 試験用電源装置を用いた予備実験のための回路

実験では交流電源として正弦波を発生する電源装置 (NF 回路設計ブロック) を用

いた。電源装置は、市販の装置であるため、高電圧を得ることはできないが電圧振幅と周波数を任意に変更できるため、上記のイ

ンバータに比べて試験には適していると考えられる。実験結果を図13に示す。

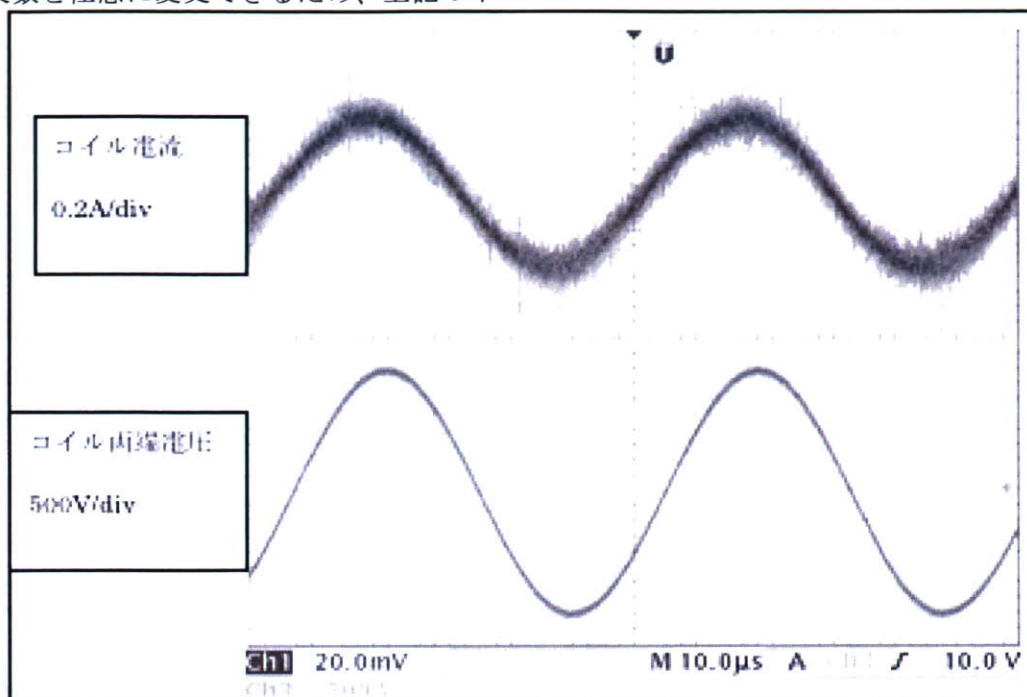


図13 試験用電源装置によるコイル駆動実験の結果

このときの交流電源の周波数は 20.7kHz、電源の出力電圧は 21V である。また、磁束密度の波形は掲載していないが、このときの磁束密度は 30 μ T であった。インバータを用いた場合に比べて、電圧が低いも関わらずインバータによる予備実験より大きな磁界が得られている。この理由としては、回路の共振周波数と電源の周波数が一致したために、大きな電流が流れ発生磁界も大きくすることができたからである。以上のことより、より大きな磁界を得るためには周波数の選択は重要である。すなわち、コイル発生用コイルはすでに決められて物であるため、電源装置の周波数もしくはコンデンサの設計はより重要なパラメータになる。以上の結果から周波数を精密に選択すれば 1mT の磁界強度を得るためには 20kVA 程度の電源があればよい。また回路の工夫として2つある各コイルをそれぞれ別電源で駆動すれば 10kVA 程度の容量でよく、このような回路構成にすると条件を満たす曝露システムを実現可能であると

考えられる。さらにそれぞれのコイルに関してもそのコイルを分割し並列駆動して磁界合成を行う方式にすれば、コイルを細分割することよりの各個のコイルのインダクタンスを低減することが出来るので、同一電源を複数用意することにより電源容量に対する要求が緩和される。ただし、このシステムを実現する場合個々の電源を精密に制御するような工夫が必要になる。

3. 予備実験に基づいた電源設計・制作

上述の予備検討を考慮し、実際にコイルを駆動するための電源の設計制作を行った。電源の回路図を図14に示す。今回制作を行った電源は並列駆動を想定したものであり、実際に必要になる電源のうちの1つである。つまり曝露システムを構成する場合には今回作成した電源を複数個用意する必要がある。今回作成した電源の仕様は以下のとおりである。出力周波数は 1-2kHz、18-22kHz で周波数が可変であり、入力 DC280V (仕様における最大電圧) の入力を行った場合 200Vrms 程度の出力電圧が

得られる。また出力定格電流は 20Arms である。電源の基本的な試験結果は付録 1 に示す。曝露システムとして必要な条件の

1mT を満たすためには今回制作した電源を 8 台並列駆動する必要があると考えられる。

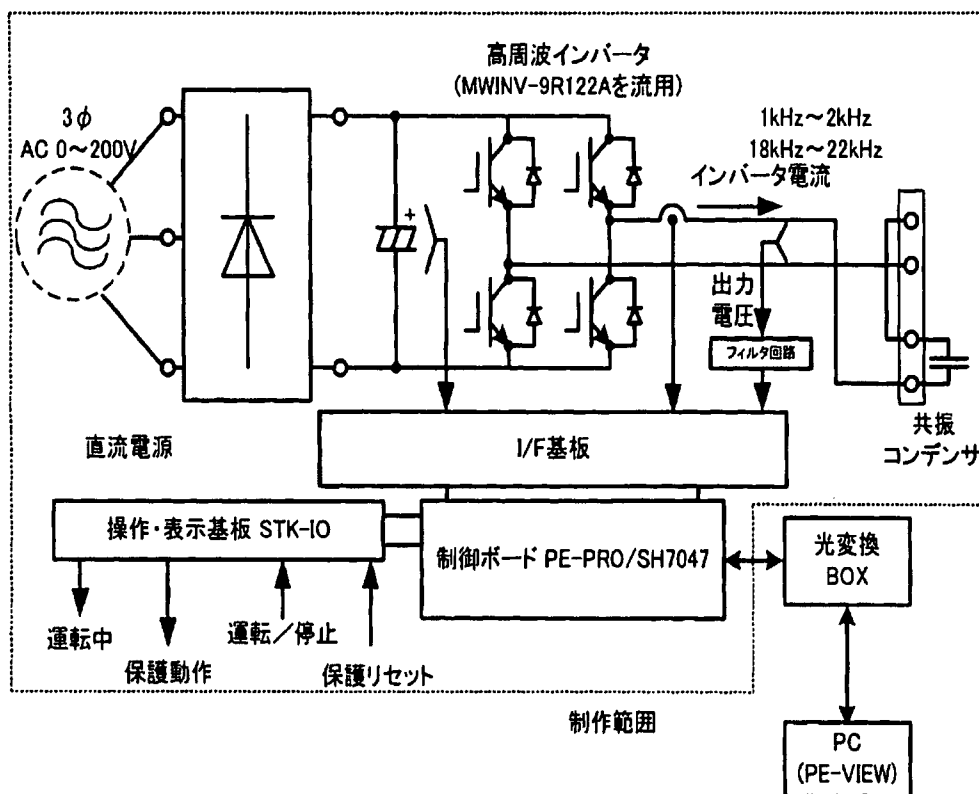


図 1 4 作成したインバータ電源の回路図

C 結論

本研究では中間周波数帯における細胞用曝露装置に必要な条件に関して検討し曝露システムを構成するための個々の要素について検討した。結論として必要条件を満たす曝露装置を実現するためには今回作成したコイルを並列化することが必要であり、並列化された回路にそれぞれインバー

タ電源を接続するようなシステムの構成を検討しなければならない。またそのようなシステムのための電源の制作を行い、基本的な動作試験を行った。今後今回作成した電源を用いて、中間周波数帯における細胞用曝露システムを作成する予定である。

厚生労働科学研究費補助金（厚生労働科学特別研究事業）
分担研究報告書

中間周波電磁界の健康リスク評価
～動物実験の研究デザインの検討～

分担研究者 牛山 明 国立保健医療科学院生活環境部快適性評価室長

研究要旨

IH 調理器の普及に伴って、国民が中間周波電磁界にさらされる機会が増加している。IH 調理器は、家庭内で妊婦を含む一般人が連日これを使用していることから、国民の IH 調理器への健康影響に対する懸念は非常に強いと考えられる。これらの理由から、安全・安心の社会の構築に向けて、中間周波電磁界の生体影響について科学的知見の蓄積が早急に必要であると考えられる。本研究課題では、動物実験における最近の研究報告をレビューし、研究のデザインについて、検討を行った。特に、電磁界暴露による免疫系への影響については、好中球の遊走能に着目して予備的な実験をおこなった。

A. 研究目的

20～50 k Hz という中間周波電磁界を使用する IH 調理器の普及が進んでいる。しかしながら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 の電磁界に関する環境保健基準（EHC）では研究の推進が勧告されている。本研究においては、現時点での動物実験を中心とした過去の知見をまとめ、今後の研究においてどのような研究デザインを適用するのがよいか検討を行った。

B. 研究の要旨

20kHz の中間周波電磁界に関する変異原性試験等の細胞実験については、我が国の宮越らが報告をおこなっている^{(1) (2)}が、ヒト細胞を用いた突然変異誘発につ

いては報告がなく、また、動物を使用した突然変異誘発の有無を検討した結果もない。したがって、これらを網羅的に検討することは必要であると考えられた。

ほ乳動物を用いた実験について最近の報告では、韓国の Lee YS らのグループによる一連の研究^{(3) (4) (5) (6)}がある。彼らは 20 k Hz で 6.5 μ T（ICNIRP のガイドライン）の鋸歯型波形を持つ磁場でラットをその影響を調べている。彼らの報告によれば、1日8時間の暴露を妊娠期間中におこなっても、仔数の変化や仔の奇形に影響はなかった⁽³⁾。また、同様の暴露を、90日、12ヶ月、18ヶ月おこなっても、体や臓器のサイズ、尿や血液の生化学的指標に差がないことを示した^{(4) (5)}。さらに、DMBA の塗布で誘発された乳がん、肺がん、皮膚がんのプロモーション効果について検討し、上記の暴露では影響がない

ことを示した⁶⁾。しかしながら一部の実験では、好中球やリンパ球数の変化があり検討が必要であると指摘している。彼らの実験での波形は IH 調理器からの電磁界の波形と異なることと、長時間暴露とはいえ、その強度がそれほど高くないこと考慮すると、IH 調理器の生体影響評価にそのまま適用することは妥当ではない。しかしながら、白血球系細胞への影響と発生への影響に着目して研究を進めるといふ点で、大いに参考になると考えられた。そこで我々は、IH 調理器で発生する 20 kHz 波形で、ICNIRP のガイドラインの数 100 倍である数ミリテスラの電磁界を、局所に 1 日 1 時間程度暴露した際の影響を見るための実験デザインをおこなった。指標としては、免疫系への影響および、発生毒性について検討を行うこととした。免疫系への影響に関する研究では、免疫システムをつかさどる白血球の機能に着目する。具体的には、動物（ラット）に電磁界を暴露した後に血液を採取し、*ex vivo* の系で、好中球の遊走能・貪食能への暴露影響、およびナチュラルキラー（NK）細胞の NK 活性に対する幼若期から成熟期に至る変化への影響を評価することとした。発生毒性については、OECD 毒性試験ガイドラインを参考に、胎児への影響を評価することとし、その方法を検討した。今年度は、電気工学班と共同して、暴露の際のコイルの形状について検討するとともに、*ex vivo* の系で、好中球の遊走能を評価する方法について、計測のためのプロトコールを完成させ、準備を進めた。

C. 文献

1. Miyakoshi J, Horiuchi E, Nakahara T,

Sakurai T. Magnetic fields generated by an induction heating (IH) cook top do not cause genotoxicity in vitro. *Bioelectromagnetics*. 2007 Oct;28(7):529-37.

2. Fujita A, Hirota I, Kawahara Y, Omori H. Development and evaluation of intermediate frequency magnetic field exposure system for studies of in vitro biological effects. *Bioelectromagnetics*. 2007 Oct;28(7):538-45.

3. Kim SH, Song JE, Kim SR, Oh H, Gimm YM, Yoo DS, et al. Teratological studies of prenatal exposure of mice to a 20 kHz sawtooth magnetic field. *Bioelectromagnetics*. 2004 Feb; 25(2):114-7.

4. Kim SH, Lee HJ, Choi SY, Gimm YM, Pack JK, Choi HD, et al. Toxicity bioassay in Sprague-Dawley rats exposed to 20 kHz triangular magnetic field for 90 days. *Bioelectromagnetics*. 2006 Feb;27(2):105-11.

5. Lee HJ, Kim SH, Choi SY, Gimm YM, Pack JK, Choi HD, et al. Long-term exposure of Sprague Dawley rats to 20 kHz triangular magnetic fields. *Int J Radiat Biol*. 2006 Apr; 82(4):285-91.

6. Lee HJ, Choi SY, Jang JJ, Gimm YM, Pack JK, Choi HD, et al. Lack of promotion of mammary, lung and skin tumorigenesis by 20 kHz triangular magnetic fields. *Bioelectromagnetics*. 2007 Sep; 28(6):446-53.

厚生労働科学研究費補助金（厚生労働科学特別研究事業）
分担研究報告書

中間周波電磁界の健康リスク評価 ～細胞実験の研究デザインの検討～

分担研究者	池畑政輝	(財)鉄道総合技術研究所 環境工学研究部 生物工学研究室 主任研究員
	吉江幸子	(財)鉄道総合技術研究所 環境工学研究部 生物工学研究室 研究員
	石井一行	明治薬科大学大学院 環境生体学研究室 准教授
	小笠原裕樹	明治薬科大学大学院 環境生体学研究室 専任講師

研究要旨

本研究では、中間周波の健康リスク評価のために、これまでの科学的知見をまとめた上で必要な細胞研究の要素を選定し、今後の研究のデザインを検討することを目的とした。

これまでの中間周波磁界の生物影響に関する報告は非常に少なく、特に IH 調理器を念頭に置いた研究は、世界規模で見ても日本における中園、宮越、中馬らの報告があるに過ぎず、基礎的な知見が不足していることが明らかとなった。これらのうち、中園らの研究は 2,20,60kHz の正弦波の遺伝毒性評価を微生物変異原性試験や酵母を用いた変異原性試験で評価しており、最大 1mT の磁界を評価しているが、変異原性ならびに助変異原性を認めないとの結果である。また、宮越らの研究では、DNA 切断、遺伝子変異等が IH 調理器実機を模擬した暴露波形 23kHz、0.5mT では認められなかったと報告しているが、暴露時間（2 時間）や模擬波形（高調波等を含む）など、特殊な要因が含まれていると考えられる。したがって、中間周波磁界に関しては、今後遺伝毒性をはじめとして、遺伝子発現なども含めた幅広い知見の蓄積が必要であると考えられた

A. 研究目的

近年、日本においては中間周波磁界（20～60kHz）を利用した IH 調理器の普及が著しい。しかしながら、この中間周波の磁界が生体に及ぼす作用については、未だ科学的に十分な評価がなされているわけでは

ない。そのため、国際保健機関（WHO）が 2007 年に発刊した環境保健クライテリア（EHC）では、今後実施すべき必要な研究プログラムとして中間周波が第一に勧告されており、実際に健康リスクに対する社会の関心も高い。本研究では、中間周波の健康リスク評価のために、これまでの科学的

知見をまとめた上で必要な研究要素を選定し、今後の研究のデザインを検討することを目的とした。

B. 研究結果

これまでの中間周波磁界の生物影響に関する報告は非常に少なく、特に IH 調理器を念頭に置いた研究は、世界規模で見ても日本における中園¹⁾、宮越²⁾、中馬³⁾らの報告があるに過ぎず、基礎的な知見が不足していることが明らかとなった。これらのうち、中園らの研究は 2,20,60kHz の正弦波の遺伝毒性評価を微生物変異原性試験や酵母を用いた変異原性試験で評価しており、最大 1mT の磁界を評価しているが、変異原性ならびに助変異原性を認めないとの結果である。また、宮越らの研究では、DNA 切断、遺伝子変異等が IH 調理器実機を模擬した暴露波形 23kHz、0.5mT では認められなかったと報告しているが、暴露時間（2時間）や模擬波形（高調波等を含む）など、特殊な要因が含まれていると考えられる。したがって、中間周波磁界に関しては、今後遺伝毒性をはじめとして、遺伝子発現なども含めた幅広い知見の蓄積が必要であると考えられた。

そこで、我々の研究として、これまでの研究報告を相補する遺伝毒性評価の研究により中間周波磁界の生物影響の有無を明らかにすること、さらには疫学班、動物実験班との相補性、すなわち発生に関わる生物影響を評価すること、この 2 点を通して健康リスク評価に資する知見を得ることを目標とした。この目標のため、これまでに検討されていない一般的な遺伝毒性試験として、CHL を用いた小核試験、また近年発がんとの関連で着目されているマイクロサテ

ライトにおける遺伝子変異またエピジェネティックスの評価系、エストロゲンの核内リセプターの応答性を指標とした評価系、さらには細胞分化誘導時の遺伝子発現を指標とした評価系が有効であると判断し、これらの実験系を導入して中間周波磁界の生物影響を評価することとした。今年度、CHL を用いた小核試験の具体的な暴露実験手順を考える一方、これらの実験系で中間周波磁界を暴露するために、既存研究と同等の磁界強度（～1 ミリテスラ）ならびに高強度（～10 ミリテスラ）を生物試料に暴露するための暴露装置について工学班と共同で検討を進めた。また、暴露指標に関しても磁界と磁界による誘導電界の双方を勘案し、暴露に用いる生物試料用の暴露容器に関する検討を進めた。

C. 参考文献

- [1] S. Nakasono, M. Ikehata, M. Dateki, S. Yoshie, T. Shigemitsu, T. Negishi, Intermediate frequency magnetic fields do not have mutagenic, co-mutagenic or gene conversion potentials in microbial genotoxicity tests, *Mut. Res.*, 2008, 649: 187-200
- [2] Miyakoshi J, Horiuchi E, Nakahara T, Sakurai T. Magnetic fields generated by an induction heating (IH) cook top do not cause genotoxicity in vitro. *Bioelectromagnetics*. 2007 Oct; 28(7):529-37
- [3] Chuman A, A. Nuruki, S. Tsujimura and K. Yunokuchi, "Study of electromagnetic effects of IH cooker on *Xenopus laevis*." *J Magn Soc Jpn*, 2007, 31; 263-267 (in Japanese)

厚生労働科学研究費補助金（厚生労働科学特別研究事業）
分担研究報告書

中間周波電磁界の健康リスク評価
～疫学研究デザインの検討～

分担研究者 笠島 茂 国立保健医療科学院公衆衛生政策部室長
杉森 裕樹 大東文化大学スポーツ・健康科学部健康科学科教授
毛利 一平 労働安全衛生総合 研究所研究企画調整部部長代理
高尾 総司 岡山大学大学院医歯薬学総合研究科講師

研究要旨

IH 調理器による 20Hz 付近の中間周波電磁界への曝露とヒトの流産に関する疫学研究の実施に際して必要と考えられる方法の検討を目的とした。本年度は中間周波電磁界の健康リスクに関する先行研究のレビュー、曝露測定についての検討、曝露を中間周波電磁波、アウトカムを流産とした場合の交絡因子についての検討を行った。先行研究のレビューについては、曝露評価の方法に焦点をあてたレビューを実施した。IH 調理器による中間周波電磁界の健康リスクに関する研究には疫学に関するものは少なく、動物実験が大部分であった。極低周波電磁界曝露と流産との疫学的関連性に関するものを先行研究として参考にしうが、現段階では IH 調理器による中間周波電磁界曝露と流産のリスクに関する疫学的知見は極めて乏しいと結論した。曝露測定についての検討では、家屋内外の電化製品による中間周波電磁波の発生源は多く、かつ、その曝露の頻度・強弱の時間変化やヒトの行動による発生源からの距離の変化が測定される磁束密度の強度に大きな変動をもたらしていることが明らかとなった。実測に関連づけて質問票を作成するには、中間周波電磁波曝露指標の作成に綿密な研究が必要であると考えられた。交絡因子については、悪阻によって調理機会が減少することがあれば当然、調理器に近づくことも減る。従って、悪阻が流産のリスクと関連している場合、それを中間周波電磁界への曝露によるものと誤って評価する可能性は否定できない。従って、行動記録ないし行動量のモニターが必要であると結論した。

A. 研究目的

IH 調理器による 20Hz 付近の中間周波電磁界への曝露とヒトの流産に関する疫学研究の実施に際して必要と考えられる方法の検討を目的とした。

B. 研究方法

①中間周波電磁界の健康リスクに関する先

行研究のレビュー

レビュー範囲の決定のためにキーワードを”intermediate frequency” ないし”magnetic field”等として先行研究のリストアップを試みた。検索対象には PubMed ならびに先行研究の参考文献を用いた。

②曝露測定についての検討

中間周波電磁界の携帯型測定装置を試用

して得た磁束密度の連続測定結果 (1Hz) を参考にして、屋内での電化製品による中間周波電磁界発生源をリストアップするとともに、その曝露頻度と強度について予備的検討を行った。また、それと関連して家屋における背景曝露ならびに屋外での曝露をどの程度まで研究対象に含めるべきか検討を行った。

③曝露を中間周波電磁波、アウトカムを流産とした場合の交絡因子についての検討

中間周波電磁界曝露と流産に関する潜在的交絡因子をリストアップした。特に、Savitz DA(2002)¹⁾によって提起された悪阻(つわり)による行動変化による曝露評価の変化について検討した。

C. 研究結果と考察

研究方法①について、曝露評価の方法に焦点をあてたレビューを実施した。IH調理器による中間周波電磁界の健康リスクに関する研究には疫学に関するものは少なく、動物実験が大部分であった。極低周波電磁界曝露と流産との疫学的関連性に関するものを先行研究として参考にしうるが、現段階では IH 調理器による中間周波電磁界曝露と流産のリスクに関する疫学的知見は極めて乏しいと結論した。

研究方法②について、家屋内外の電化製品による中間周波電磁波の発生源は多く、かつ、その曝露の頻度・強弱の時間変化やヒトの行動による発生源からの距離の変化が測定される磁束密度の強度に大きな変動をもたらしていることが明らかとなった。実測に関連づけて質問票を作成するには、中間周波電磁波曝露指標の作成に綿密な研究が必要であると考えられた。Li DK et al. (2002)²⁾は、その極低周波電磁界曝露と流産

のリスクに関する疫学的研究において、対象とした妊婦全員に携帯型装置による曝露測定を行っている。しかし、我国において、電磁界の健康影響の評価の研究という点についてインフォームド・コンセントを得て、携帯型装置を着用してもらうことは容易でない。また、仮に携帯型装置の着用に合意が得られたとしても、装置の着用時の行動に、強い変化を与える(具体的には、電磁界の発生源となるものに近づかない、あるいは、使用しない)ことが容易に予想できる。尤も、同様の行動変化は、装置の着用の有無にかかわらず、この種の研究に参加する場合に一般的な心理過程に基づく反応でもある。従って、行動心理学的に綿密に検討すれば曝露評価の解析に必要な調整因子を評価できる可能性もある。

研究方法③について、悪阻によって調理機会が減少することがあれば当然、調理器に近づくことも減る。従って、悪阻が流産のリスクと関連している場合、それを中間周波電磁界への曝露によるものと誤って評価する可能性は否定できない。従って、行動記録ないし行動量のモニターが必要であると結論した。

D. 参考文献

1. Savitz DA. Magnetic fields and miscarriage. *Epidemiology*. 2002; 13: 1-4.
2. Li DK, Odouli R, Wi S, Janevic T, Golditch I, Bracken TD, Senior R, Rankin R, Iriye R. A population-based prospective cohort study of personal exposure to magnetic fields during pregnancy and the risk of miscarriage. *Epidemiology*. 2002; 13:9-20