

20084004/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

磁界の生体への影響とその機構の解明

平成20年度総括・分担研究報告書

研究代表者 久保田俊一郎

平成21（2009）年3月

目 次

I 総括研究報告

磁界の生体への影響とその機構の解明

久保田俊一郎

II 分担研究報告

1. 中間周波電磁界の健康影響・生体影響に関する文献調査

牛山 明

2. 磁界の脳への影響とその機構の解明

梅景 正

3. 磁界の発がんへの影響とその機構の解明

久保田俊一郎

4. 辺縁系神経回路オシレーションを指標とした中枢神経活動への磁場の影響

村越 隆之

5. 磁界の生殖機能への影響とその機構の解明

奥野 誠

6. 生体への磁場効果の物理的考察

鹿児島誠一

7. 磁場発生の時空間精密制御と非侵襲生体計測

深津 晋

III. 研究成果の刊行に関する一覧表

IV. 研究成果の刊行物・別刷

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)
総括研究報告書
磁界の生体への影響とその機構の解明

研究代表者 久保田俊一郎 東京大学大学院総合文化研究科教授

研究要旨

厚生労働行政の課題として、低周波磁界（送電線、家電など）および高周波のマイクロ波（携帯電話）曝露のヒトへの健康影響（発癌性、妊産婦とその児への影響、脳への影響）が挙げられる。IH 調理器（20kHz）の健康影響も重要な課題である。健康影響を明らかにして（安全域と影響域を明らかにする）、国民の漠然とした不安に回答を与え、かつその対策をとることが求められている。本研究は、実験的研究および文献調査・メタアナリシスにより、これらの課題に回答を出す研究である。20年度は、文献調査を行なった。2006年以降に発表された査読付き論文をその研究に用いた電磁界の周波数を限定せずに網羅的に文献の収集をおこなった。収集した文献を、疫学的研究、ヒトを対象にした実験研究に分類し、その研究動向に関してレビューをおこなった。その結果、影響がある、と結論している文献でも、実際は統計的な有意差を確認できない場合や、電磁界の曝露の推定方法や分類に疑問のあるものが多く、信頼性に乏しいものが多かった。以上より、現時点では居住（生活）空間の電磁界強度が健康リスクを発生するという明確な根拠はみられないと考えられる。また、脳部位、対象とする細胞、影響を起こすメカニズムに分けて文献研究をおこなった。今後、理論的に機序を考察することで実験的な研究を進めるにあたり参考となった。こうした研究には、分子生物学的なアプローチだけでなく、物理・化学的なアプローチも必要と考えられる。長期的な影響についての研究も重要であると考えられた。

さらに、低周波磁界曝露の生体影響を検討するため、強い磁界強度（50Hz, 80mT）から生活環境レベル（50Hz, μT レベル）の磁界強度について、細胞レベルおよび動物レベルで実験を計画した。今年度は、前者について実験を進めた。細胞レベルの実験に関して、まだ、N数が少なく、結論は得られていないが、低周波磁界曝露は、増殖性に関して、神経系の細胞の種類により、異なる反応を示した。増殖を促進、抑制、不変の3つの反応であった。細胞増殖・細胞増殖抑制（N数を増やして再現性を確認する必要がある）が、発癌性や脳へ影響するかどうかは、詳細な分子生物学的、病理学的検討を行わなければ結論は導けないと考えられる。生活環境レベルの磁束密度での磁界曝露の細胞増殖への影響は来年度実施し、その結果を含めて、生体への影響を評価し、結論を出す必要がある。動物レベルでは、2つのアプローチで実験を行った。第1は、中枢神経系、殊に情動・認知機能にとって重要な役割を担う大脳辺縁系機能に対する影響をシナプスレベルで検討した。ラットを低周波磁界に曝露させ（50Hz, 80mT）、これらの動物から作成した帯状回を含む脳スライス標本を用いて、帯状回皮質内興奮性シナプス伝達機能を電気生理学的に評価した。一日2時間ないし4時間を3日間暴露した動物において、グルタミン酸を伝達物質とする興奮性シナプス伝達が低下

する傾向が見られた。PPR (Paired-pulse ratio)が増大する傾向も見られたことから、この現象はシナプス前終末からの伝達物質放出低下の可能性を示唆するが、結論を出すには N 数を増やして実験を行う必要がある。また、生活環境レベルの磁束密度での磁界曝露の影響は来年度実施し、その結果を含めて、大脳辺縁系機能に対する影響を評価し、結論を出す必要がある。

第2は、低周波磁界曝露の生殖能への影響を検討した。成長期のオスマウスを用いて、影響が懸念される低周波磁界曝露の精子形成に対する作用について検討した。離乳後精子が出現するまでの3週間にわたって低周波磁界 (50Hz, 80mT, 1時間/日) に曝露させた。精子形成、精子運動率、精子運動性には影響が見られなかったが、さらにN数を増やして確認するとともに、今後は電磁場の種類、曝露期間、多世代にわたる影響などを検討する必要がある。また、生活環境レベルの磁束密度での磁界曝露の影響は来年度実施し、その結果を含めて、生殖能への影響を評価し、結論を出す必要がある。

分担研究者

久保田俊一郎	東京大学大学院総合文化研究科教授
鹿児島誠一	東京大学大学院総合文化研究科教授
奥野 誠	東京大学大学院総合文化研究科准教授
村越 隆之	東京大学大学院総合文化研究科准教授
梅景 正	東京大学環境安全本部准教授
深津 晋	東京大学大学院総合文化研究科准教授
牛山 明	国立保健医療科学院生活環境部快適性評価室長

中川秀紀 厚生労働科学研究リサーチレジデント (東京大学総合文化研究科)

A. 研究目的

低周波磁界曝露の健康影響については、白血病・発癌との関係が危惧されている。妊婦への曝露が、先天性奇形、流産、発達異常を惹起する危惧もある。携帯電話使用と脳腫瘍との関連性に関する報告がある。本研究は、低周波、中間周波、高周波磁界曝露による発癌性、脳神経系への影響、生殖系への影響を明らかにするため、文献調査・メタアナリシスおよび実験的研究を行なうことを目的とする。厚生労働行政の課題として、低周波磁界（送電線、家電など）および高周波のマイクロ波（携帯電話）曝露のヒトへの健康影響（発癌性、妊産婦とその児への影響、脳への影響）が挙げられる。IH調理器（20kHz）の健康影響も重要な課題である。健康影響を明らかにして（安全域と影響域を明らかにする）、国民の漠然とした不安に回答を与え、かつその対策をとることが求められている。本研究は、実験的研究および文献調査・メタアナリシスにより、これらの課題に回答を出す研究である。

B. 研究方法

文献調査の方法1（牛山）

・低周波および高周波電磁界に関する文献のレビューに関して

PubMed データベースから、【electromagnetic* or ELF or RF】 & 【epidemiology or provocation】 & 【2006-2008（発行年）】という条件で合致した文献を抽出した。各論文のタイトル、ならびに利用可能なアブストラクトから、生体影響または健康影響に直接関係してい

る一次文献を抽出し、内容に関して精査をおこなった。

・中間周波電磁界による文献のレビューに関して

PubMed データベースあるいは、CiNii データベースより、関連する文献を抽出した。

文献調査の方法2（梅景）

NCBI (National Center for Biotechnology Information) が一般公開している医学関係文献データベース PubMed から下記の趣旨で検索し論文を抽出した。

1. 文献調査をおこなう対象となる論文の発表年について

「平成17年度のWHO及び諸外国の電磁界の健康影響に関する動向についての報告」の第二部で、「電磁界の健康影響に係る最近の文献調査(2005)」において、主に商用周波数を中心とする電磁界について2005年までの報告がまとめられており、本文献研究は2006年から現在(2009年3月)までとした。

2. まず PubMed から分子生物学的な実験的アプローチをした論文を検索するために、「electromagnetic」 and 「DNA or gene」で検索を行った。その結果、136の論文が該当した。その中から、特に脳神経系に関する知見のある論文を以下のキーワードで抽出した。

1) 脳神経系の重要な部位である大脳皮質と海馬に注目して、「neuron and cortex」 or 「hippocampus」をキーワードとした。抽出された 55 論文の中から、分子生物学手法を用いて実験的アプローチをおこなった 21 論文を検討した (表 1)。

2) 実験的な研究対象とする組織試料として、幹細胞に注目して「stem cell」をキーワードとした。抽出された 47 論文の中から、分子生物学手法を用いて実験的アプローチをおこなった 14 論文を検討した (表 2)

3) 電磁界の生体影響を起こすメカニズムについて考察した論文のうち、特に分子生物学的な検討および物理化学的な検討をされている論文を抽出してまとめた。

実験的研究は、細胞レベルと動物レベルで低周波磁界曝露の影響を解析した。細胞レベルの実験 (久保田、中川、梅景、鹿児島、深津)

培養細胞レベルで解析した。

培養細胞：種々の培養細胞 (神経系、生殖系細胞、腫瘍細胞) を低周波磁界 (50Hz, 80mT) に 2 時間曝露後、あるいは、0.5-4 時間曝露し、4 8 時間後にトリパンブルー法で細胞数をカウントして、細胞生存率 (細胞死あるいは細胞増殖効果) を解析した。この 2 つの方法を用いた理由は、2 時間の磁界曝露で直接細胞死が惹起される可能性もあるため、また、0.5-4 時間の磁界曝露で情報が伝達されてそのシグナルが、4 8 時間後に細胞生存率 (細胞死あるいは細胞増殖効果) に影響する可能性があるためである。

神経系細胞として、神経芽細胞腫、ラット神経系 (グリア) 細胞、ヒトグリオーマ (T98G)、生殖系細胞として、ラット精巣腫瘍細胞、腫瘍細胞として、ヒト肝癌細胞、ヒト網膜芽細胞腫、ヒト横紋筋肉腫、ヒト乳癌細胞を用いた。培養および曝露方法：ヒトグリオーマ細胞 (T98G)、ラット精巣腫瘍細胞 (LC540)、ラット神経系 (グリア) 細胞、ヒト肝癌細胞、ヒト横紋筋肉腫細胞、ヒト乳癌細胞は 100mm 細胞培養ディッシュを用い 10%ウシ胎児血清 (FBS) を添加した Dulbecco's Modified Eagle's Medium (DMEM) 中で 37°C、5%炭酸ガスインキュベーター内で培養した。ヒト網膜芽細胞腫は 100mm 細胞培養ディッシュを用い 10% FBS を添加した RPMI-1640 Medium で培養した。ラットグリア細胞は、20% FBS 含有 DMEM で培養した。

5%炭酸ガスインキュベーター内に設置した低周波発生装置にディッシュを静置し、細胞を低周波磁界に曝露した。低周波磁界に 2 時間曝露後、あるいは、0.5-4 時間曝露し、4 8 時間後に細胞を回収し、トリパンブルー液で染色した。血球計算板を用い死細胞数、生細胞数を解析して生存率を算出した。

タンパク質定量：回収した細胞は、細胞破碎液に懸濁後、超音波破碎機で破碎した。破碎した細胞を 12,000rpm で遠心し、上清を得た。Bradford 法で、タンパク質を定量した。1.0mg/ml BSA 溶液を 0、0.1、0.2、0.4、0.5、0.6、0.8 mg/ml に調製し、標準溶液とした。分光光度計を用いて、595nm で吸光度を測定した。

ウェスタンブロッティング

種々の一次抗体および対応する二次抗体を用いてウェスタンブロッティングを行なった。シグナルの検出は化学発光法で解析した。

SDS ポリアクリルアミドゲル(10%)を用いて電気泳動後、ゲルを転写板に移し、ニトロセルロースメンブレンに転写した。メンブレンを2%スキムミルク溶液で1時間ブロッキング後、一次抗体と4°Cで、一晩反応させた。メンブレンをTris-Buffered-Saline(TBS)で10分、3回洗浄した後、HRP 標識二次抗体に浸し、1時間反応させた。TBSで15分、2回洗浄後、メンブレンを1分間発光液に浸し、ChemiDoc (BioRad)を用いてシグナルを検出した。

・一次抗体

actin Antibody (Santa Cruz)

phospho-p42/44 Mapkinase Antibody
(Santa Cruz)

phospho-JNK, p38 Antibody (Santa Cruz)

動物レベルの実験

1. 電気生理学的実験 (村越、久保田、中川)

磁界暴露条件

生後10日齢 Wistar 系ラットを母獣による哺育状態で購入し、1日間動物飼育施設において馴化する。11-13日齢の期間に以下に述べる条件で電磁場(50Hz, 80mT)に暴露した。また、対照群としては、同時間、同じ暴露槽に置いた動物を用いた。

・スライス標本作成

磁界暴露または非暴露後の生後14日齢で電気生理実験に供した。吸入麻酔

薬であるエンフルレンによる深麻酔下で断頭し、前脳部より冠状断にて帯状回を含む厚さ350-400 μm の脳スライスを複数枚作成した。損傷からの回復のため1-2時間待った後に、顕微鏡ステージ上の実験槽に配置した。標本を32.5度Cの人口脳脊髄液(ACSF)で毎分2.0mlの速度で灌流した。ACSFの組成は以下のとおりである(mM)。120 NaCl, 3 KCl, 2.5 CaCl₂, 1.3 MgCl₂, 26 NaHCO₃, 1.25 NaH₂PO₄, 15 glucose。また ACSFは95%O₂-5%CO₂により飽和され、pHは7.2に維持された。

・電気生理学実験

帯状回皮質浅層(第II-III層)より細胞外電場電位記録を行った。タングステン線双極刺激電極を同じ皮質カラムの深層(皮質第V-VI層)に置き、200 μs の矩形波電流(50, 100, 150 μA)を15秒に1回の頻度で与えた。記録電極はガラス微小電極に0.5MのNaCl溶液を満たした。

上の条件で記録されるフィールド興奮性シナプス後電位(fEPSP)波形より、刺激アーティファクト後の2つ目の陰性波の初期最大スローブをfEPSPの大きさとした。

通常、刺激は50, 100, 500ms間隔で2回連続して与え、これに対する2つのfEPSPの大きさの比(fEPSP2/fEPSP1)をPPR(Paired-pulse ratio)として記載した。

(倫理面への配慮)動物は愛護的に扱い、かつ苦痛のないよう麻酔下に実験を行なった。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に則って実験を実施した。

本研究は、東京大学動物実験倫理委員会の承認を得ている。

2. 生殖能への影響 (奥野、久保田、中川、鹿児島、深津)

(1) 実験生物

実験モデル生物として ICR 系統のマウスを用いた。生殖機能を評価するにはさまざまな方法があるが、今回はまずオスに焦点を絞り、精子形成において影響が現れるか否かを精子の運動率、運動性を調べた。

オスマウスの場合、出産後およそ 3 週間で離乳し、5~6 週で精子が輸精管に出現する。そこで独立した個体で最も影響を受けやすい期間として、3 週齢から 6 週齢の間、磁場に曝すこととした。

(2) 低周波磁場曝露

電磁場としては、生活に密着している交流 (50Hz) から発せられる低周波交流電磁場に焦点を絞った。マウスを、毎日 1 時間、13 時~14 時の間、曝露することとした。容器での平均磁場強度は 80mT で、地磁気の 100 倍以上高い。

・精子性状における低周波磁場の影響の評価

今回の実験では 3 週齢から 18 日間曝露をおこない、その間の体重の変化を記録した。18 日目にエーテル麻酔の後に解剖をおこない、臓器を摘出しそれらの重量を測定した。同時に摘出した精巣上体からは精液を採取し、運動性を評価した。

運動性の評価は Mukai & Okuno (7) と同様な方法で行った。まず精巣上体尾部に注射針で小孔を複数穿ち、指で加

圧して精巣上体精子を絞り出し、それを Sucrose 液 (300mM sucrose, 10mM 10 mM HEPES-NaOH, pH 7.4) に懸濁した。精子懸濁液をさらに Hanks 液 (150 mM NaCl, 5.5 mM KCl, 0.4 mM MgSO₄, 1 mM CaCl₂, 10 mM NaHCO₃, 5 mM glucose, 10 mM HEPES-NaOH, pH 7.4) に希釈し、位相差顕微鏡下で観察、ビデオ記録し、その画像を解析した。観察記録は全て 37°C で行った。

ビデオ記録から、精子運動率 (運動精子数/前精子数)、精子鞭毛振動数、鞭毛屈曲角を測定した。鞭毛屈曲角は鞭毛中央付近の一つの屈曲において、その両側の変曲点における接線のなす角で測定した。

C. D. 研究結果および考察

文献調査 1 の結果と考察

○低周波ならびに高周波領域の疫学・ヒト実験に関する文献調査

検索の結果、ヒットした論文数は 138 論文であった。それらをスクリーニングすると以下の通りとなった。①超低周波領域の研究 38 論文、②高周波 (RF) 領域の研究 29 論文、③レビュー 18 論文、④メタ解析・プール解析 5 論文、⑤その他 (コメント、関係なし、他の周波数など) 48 論文

本研究では、①と②を対象に解析を進めた。

まず、各文献を研究タイプ別にまとめた (表 1 および表 2)。これによると、ELF 領域では、ケースコントロール研究が多く、追って後ろ向きコホート研究、

ボランティア研究と続いた。一方、RF 領域に関しては、ボランティア研究が最も多く、ついでケースコントロール研究であった。なおケースコントロール研究計9報のうち、8報はインターフォン研究に関係する論文であった。また、対象論文を周波数・あるいはばく露発生源別に分けてみると、ELF 領域の文献については、ほとんど(35論文)がいわゆる商用周波(50Hz、60Hz)を対象とした研究であった。またスイスの研究者の論文で、鉄道周波(16.7Hz)の磁界に関する論文が3報あった。一方、RF 領域の文献を周波数別に見ると、表3のようになり、携帯電話の端末を対象とした研究が一番多かったが、発生源に関しては多岐にわたっていた。表には示さないが、研究の国別に見ると ELF 領域ではアメリカの研究が非常に多い(14論文)のに対して、RF 領域では、ドイツ、ノルウェーからの報告(各5論文)が多く、次いで日本、スウェーデンが各3論文となっており、アメリカからの報告がみられないことが特徴的であった。

各論文で指標としている項目について表4、表5にまとめた。文献で観察している指標別に見た場合は、ELF 領域では、小児白血病が多かったのに対して、RF 領域では、神経膠腫、髄膜腫、聴神経腫が多いことが特徴的であった。これらがRF 領域で多いのは、インターフォン研究によるものであり、これらの研究は一定のプロトコールで行われているため信頼性は高いと考えられた。

表6～表9に今回レビューした論文の要旨をまとめた。表6は低周波領域、表7は高周波領域で論文の筆者が「影

響あり」と述べている論文をまとめ、備考欄にはレビューの結果のコメントを付した。コメントに述べたとおり、多くの研究は研究デザインの不備あるいは例数が少ないなど信頼性が低い物であると考えられた。

また表8、表9はそれぞれ、低周波、高周波領域で「影響なし」あるいは健康リスクの記載のない(測定のみを含む)論文を一覧にした。

表1 ELF 領域研究論文の研究デザイン別論文数

ケースコントロール	15
後向きコホート	10
ボランティア研究	4
断面研究	3
ケースオンリー研究	2
前向きコホート	1
その他(実測など)	1

表2 RF 領域研究論文の研究デザイン別論文数

ボランティア研究	10
ケースコントロール	9
(うち インターフォン研究)	8)
断面研究	7
コホート研究	1
その他(実測など)	1

表3 RF 領域研究論文の中の電磁界発生源別による論文数

携帯電話端末	16
携帯電話基地局	4
テレビ・ラジオ塔電波	3

軍用設備 (レーダー等)	3
W-LAN	2
職業性 RF	2
コードレス電話	1

表4 ELF 領域の研究論文の評価指標と論文数

小児白血病	10
乳がん	6
成人白血病・リンパ腫	5
成人脳腫瘍	3
神経疾患 痴呆 心疾患	
甲状腺がん 子宮内膜腫	
小児脳腫瘍 聴神経腫	
がん一般 視覚運動野	
脳波 EHS 愁訴	
メンタルヘルス	各 1

表5 RF 領域の研究論文の評価指標と論文数

神経膠腫 髄膜腫	
聴神経腫	各 5
生理指標 (BP, HR, HRV)	各 5
EHS 症状 Well-Being	各 3
男性不妊 耳下腺がん	各 2
子の性比 出産リスク	
小児白血病 聴力・耳鳴	
脳波 頭痛 感知	各 1

表6 低周波 (ELF) 領域の論文で、論文筆者が影響ありとしている文献 (備考欄には、論文の限界や問題点などを記してある)

著者	研究分類	指標	RR, OR	備考
Svendsen et al. ⁽²⁾	Cohort	小児白血病診断後の生存	ベッドルームの磁界が高いほど生存に影響を与える	参加率が6割 調査の限界が多く、難しい
Foliart et al. ⁽³⁾	Case-Control	小児白血病の生存	環境中MF > 0.3uT 1.9(0.8-4.9)	症例19名中の4例の死亡にての計算 誤差が大きい。
Feizi et al. ⁽⁴⁾	Case-Control	小児白血病	磁界 > 0.45uT 3.6(1.11-12.39)	送電線近傍居住者(対遠隔地) 症例数少ない(60例のみ) 磁界は計算値を使用
Mejia-Arangure et al. ⁽⁵⁾	Case-Control	小児白血病	寝室内で > 0.6uT 3.7(1.05-13)	ダウン症の子どもに限定(対照群も) 実測しているが、例数がケースで42例と少ない 信頼区間が大きい。
Pearce et al. ⁽⁶⁾	Case-Control	小児白血病	父がEMFか放射線を受ける仕事 1.31(1.01-1.69)	父親の職業の関連をみている。 職種で推定
Kabuto et al. ⁽⁷⁾	Case-Control	小児白血病	6歳以下男児限定 1.81(1.19-2.75) 寝室の磁界 > 0.4uT ALL 4.67(1.15-19.0)	例数が少ない 誤差が大きい
Kheifets et al. ⁽⁶⁾	エコロジカル	小児白血病	小児白血病の罹患率のトレンドと 磁界ばく露のトレンドが同傾向	必ずしも直接の関係を示唆していない 交絡因子を考慮せず
Roosli et al. ⁽⁹⁾	Cohort	白血病	白血病トータル 1.43(0.74-2.77) MLL 4.74(1.04-21.6) Hodgkin disease 3.29(0.69-15.6)	列車運転手のリスク(対駅員) 誤差範囲が大きい → 人数が不明 職業のみで分類
Bunin et al. ⁽¹⁰⁾	Case-Control	子の脳腫瘍	親の電気毛布の利用 2.0(0.9-4.3) その他のEMFばく露 2.5(1.4-4.6)	自己申告 バイアスの混入の可能性あり その他のばく露の具体的な記述がない
Roosli et al. ⁽¹¹⁾	Cohort	神経疾患	鉄道運転手 (vs 駅員) 認知症 1.96(0.98-3.92) アルツハイマー 3.15(0.90-11.04)	有意差なし 職業分類のみの比較で実測していない

表6 つづき

著者	研究分類	指標	RR、OR	備考
McElroy et al. ⁽¹²⁾	Case-Control	乳がん	High群で 1.16(0.90-1.50)	有意差なし 職業分類のみの比較で実測していない
Peplonska et al. ⁽¹³⁾	Case-Control	乳がん	High群で 1.5(1.1-2.0)	職種のみで比較 Jobマトリクスを利用 人数が不明
Lope et al. ⁽¹⁴⁾	Cohort	甲状腺がん		RIばく露のみで有意,ELFは無関係
Karipidis et al. ⁽¹⁵⁾	Case-Control	非ホジキンス型 リンパ腫	高ばく露群 1.48(1.02-2.16)	職業分類のみで比較
Mester et al. ⁽¹⁶⁾	Case-Control	リンパ腫	濾胞性リンパ腫では電気工事者の リスクが高い 10年以上 9.3(2.7-32.4)	対象の症例数が少ない。
Abel et al. ⁽¹⁷⁾	Cohort	子宮内膜筋腫	電気毛布利用者 1.15(1.03-1.27) 20年以上利用限定 1.36(1.16-1.59)	上昇は僅か。統計上境界域である 思い出しバイアスの影響を言及
Eriksson et al. ⁽¹⁸⁾	Gross sectional	EHS症状	VDT作業者に症状が多い	比較対象が不明
Fadel et al. ⁽¹⁹⁾	Cohort	児の成長	送電線の近くの子どもは出生児体 重が低い 頭囲、胸囲、身長が低い 手根骨の骨化が遅れている	
Schrottner et al. ⁽²⁰⁾	ボランティア	電流感知	電流感知能力に差がある(p <0.001)	実験条件が不明

表7 高周波 (RF) 領域の論文で、論文筆者が影響ありとしている文献 (備考欄には、論文の限界や問題などを記してある)

著者	研究分類	指標	RR、OR	備考
Berg et al. ⁽²¹⁾	Case-Control	脳腫瘍	高ばく露の職業群 (vs 低ばく露) Glioma 1.21(0.69-2.13) Meningioma 1.34(0.64-2.81)	有意差なし 職業分類のみの比較で実測していない
Schuz et al. ⁽²²⁾	Case-Control	脳腫瘍	MP use more than 10 years Glioma 2.20(0.94-5.11) Meningioma 1.09(0.35-3.37)	10年以上に限定しない場合、増加傾向を認めない。 10年以上にした場合例数が極端に少ない。 統計的には有意ではない。
Ha et al. ⁽²³⁾	Case-Control	小児白血病	leukemia 2.15(1.00-4.67)	AMラジオ塔から2km 以内に居住した場合。 ただし電界の測定値 (推測値) では相関なし。 電界強度を横軸にとつてトレンドをみると、 $p=0.06$ タワーからの距離を横軸にとると $p=0.10$
Mollerlokken et al. ⁽²⁴⁾	Cross sectional	男性不妊	不妊 通信業務 1.72(1.04-2.85) レーダー/ソナー業務 2.28(1.27-4.09)	ノルウェーの現役軍人への調査 職業分類のみで実測はしていない。 交絡要因の検討が不十分
Preece et al. ⁽²⁵⁾	Cross sectional	愁訴	偏頭痛 OR 2.7 $p<0.001$ 頭痛 OR 3.7 $p<0.001$ めまい OR 2.7 $p<0.001$	軍用アンテナのある村とない村の比較。 軍用アンテナがあっても電磁界レベルは高くない。 航空機の騒音の影響等の可能性。
Mjoen et al. ⁽²⁶⁾	Cross sectional	妊娠出産異常	早産 1.08(1.03-1.15) OTHER DEFECT 2.40(1.22-4.70)	父親の職業によって分類しているが、ばく露量は 実測はしていない。項目によってはリスクが減少し ているものもある。
Stankiewicz et al. ⁽²⁷⁾	ボランティア	リンパ球単球の 分裂	分裂が促進される	実験条件が不明瞭
Vangelovia et al. ⁽²⁸⁾	Cross sectional	心疾患リスク	コレステロール値、血圧値が有意 に高い	ラジオ局の職員で高い。交絡などの調整は一切し ていない。ばく露量も測定していない。

表 8 低周波 (ELF) 領域で論文筆者が影響なしと結論している文献

著者	研究分類	指標	RR, OR	備考
Foliat et al. ⁽²⁸⁾	Case only	小児白血病	磁場のばく露強度と白血病発症時の病態指標との相関はない。	482人のcaseを分析 うち412人から磁場の実測データを取得
Mezei et al. ⁽³⁰⁾	Case-Control	小児白血病	Very High 1.3(0.8-2.1) (1999年論文では1.6(1.0-2.6)であった)	1999年のカナダ研究の再評価 参加率と所得の関連に注目し再計算すると有意差が否定される
Johansen et al. ⁽³¹⁾	Cohort	白血病 乳がん 脳腫瘍	ばく露 中レベル 大レベル 白血病 0.97 1.04 乳がん 0.80 0.69 脳腫瘍 0.77 1.04	電気事業従事者の調査 対象者:28224名、642108人年
Hoffmann et al. ⁽³²⁾	Case-Control	白血病・リンパ腫	電磁界の相関に関して記述なし ただし3.2%が家庭で0.2μT以上	Case 1430, Control 3041 農業、放射線、ELFなど総合的に検討
Vochet et al. ⁽³³⁾	ボランティア	視覚	影響なし	490Hz、50サイクル、20mT
Karipidis et al. ⁽³⁴⁾	Case-Control	脳腫瘍	ALL Glioma 1.4 (0.85-2.27) High grade Glioma 1.51 (0.90-2.53)	Case 414, Control 421 ELFのばく露はJob Exposure Matrixによる。
Davis et al. ⁽³⁵⁾	Case-Control	乳がん	有意差は認めない	Case 744, control 711 EMFはEMDEX IIで測定
O'Leary et al. ⁽³⁶⁾	Case-Control	乳がん	相関をみとめない	Case 576, Control 585 シフト制勤務の影響を調べた論文 寝ている間に明かりを点けた場合1.65(1.02-2.62)
Seider et al. ⁽³⁷⁾	Case-Control	神経疾患 痴呆	相関を認めない ただしBlueカラー労働者において増加	Case 195, control 229 職業性ばく露を職業で分類。

表 8 続き

著者	研究分類	指標	RR、OR	備考
Yamazaki et al. ⁽³⁸⁾	Cross-sectional	メンタルヘルス	poor Mental Health 1.87(0.35-10.13) (送電線から100m以内の人)	N=233 日本の小児白血病研究に参加した子の母親 SF-32Iによる。
Fan-Lin et al. ⁽³⁹⁾	Cross-sectional	電磁界強度	リスクの数値未計算	学校の電磁界調査
Evei et al. ⁽⁴⁰⁾	Cross-sectional	磁界測定のみ	実態調査	
Szabo et al. ⁽⁴¹⁾	Cross-sectional	磁界測定のみ	実態調査	ハンガリーのソーイングマシンオペレーター
Shuz et al. ⁽⁴²⁾	Cross-sectional	過敏症	実態調査	少数のパイロット的研究
Savitz et al. ⁽⁴³⁾	ボランティア	妊婦のばく露	実態調査	妊婦の行動が活発だと磁界のばく露が多い
Mezei et al. ⁽⁴⁴⁾	Case-Control	活動とばく露	実測調査	磁界ばく露の強さと行動に関して関連がある 流産に関与しているのは行動かもしれない

表9 高周波 (RF) 領域で論文筆者が影響なしと結論している文献

著者	研究分類	指標	RR, OR	備考
Marzenich et al. ⁽⁴⁵⁾	Case-Control	小児白血病	電場が強い場合 0.86(0.67-1.11) 距離が近い場合 1.04(0.65-1.67)	放送タワー近傍で小児白血病のリスクがあがるか 検証 Case 1959, Control 5848
Kleinlogel et al. ⁽⁴⁶⁾	ボランティア	Well being, EEG	影響なし	携帯端末によるばく露 健康人15人対象
Kleinlogel et al. ⁽⁴⁷⁾	ボランティア	認知	影響なし	携帯端末によるばく露 健康人15人対象
Thomas et al. ⁽⁴⁸⁾	Cross-sectional	Well being	影響なし	携帯周波数の個人ばく露(24H値)を調査 329人が対象
Takebayashi et al. ⁽⁴⁹⁾	Case-Control	脳腫瘍 神経膠腫	携帯電話のregular user Glioma 1.22 (0.63-2.37) Meningioma 0.70(0.42-1.16)	Interphone(日本) Glioma Case88, Meningioma Case 132, Pituitary adenoma Case102 total control 322 磁界強度で分けても影響なし
Hepworth et al. ⁽⁵⁰⁾	Case-Control	脳腫瘍	携帯電話の利用(対未利用者) 1.5-4年 GliomaのOR 0.9 (0.7-1.1) 5-9年 1.0 (0.8-1.3) 10年以上 0.9 (0.6-1.3)	Interphone(イギリス)
Klaeboe et al. ⁽⁵¹⁾	Case-Control	脳腫瘍 神経膠腫 聴神経腫	携帯電話のregular user Glioma 0.6(0.4-0.9) Meningioma 0.8(0.5-1.1) acoustic neuroma 0.5 (0.2-1.0)	ノルウェーの研究 Glioma case 289, Meningioma case 207, acoustic neuroma 45 control 358
Blettner et al. ⁽⁵²⁾	Case-Control	脳腫瘍	影響なし	Interphone(ドイツ)の関連研究 医用放射線ばく露ならびにRFばく露の関係 RFばく露と放射線の相互作用もない

表9 つづき

著者	研究分類	指標	RR, OR	備考
Schlehofer et al. ⁽⁵³⁾	Case-Control	聴神経腫	携帯電話のregular user Acoustic neuroma 0.67(0.38-1.19)	Interphone(ドイツ)の関連研究 case 97, control 194
Davidson et al. ⁽⁵⁴⁾	Cross-sectional	聴覚	携帯電話の影響なし	調査票による 117名の調査 携帯の使用率は98%
Lonn et al. ⁽⁵⁵⁾	Case-Control	耳下腺がん	携帯電話のregular user Malignant tumor 0.7(0.4-1.3) Benign tumor 0.9(0.5-1.5)	デンマーク、スウェーデンの共同研究 Malignant parotid gland tumor case 60 Benign parotid gland tumor case 112 control 681
Johansson et al. ⁽⁵⁶⁾	ボランティア	生理指標 HR, HRV, 他	影響なし	15名のアトピー患者、15名の対照者で携帯電話使用時に指標に変化があるか調べた。 通話時間はGSM携帯で30分
Furubayashi et al. ⁽⁵⁷⁾	ボランティア	反応時間 心理指標 生理指標	影響なし	携帯基地局を想定したばく露をおこなった。 WCDMA 30分間のばく露で影響なし。 11人のMPRSと43人のcontrol
Eltiti et al. ⁽⁵⁸⁾	ボランティア	反応時間 生理指標 hifuteikou	影響なし	携帯基地局(GSMとUMTS波)を想定したばく露をおこなった。 56人のEHSと120人のcontrol
Oftedal et al. ⁽⁵⁹⁾	ボランティア	頭痛	影響なし	携帯電話の使用で頭痛を感じると訴える人65人 30分間のばく露で、頭痛の程度と電波の関係を調べた
Nam et al. ⁽⁶⁰⁾	ボランティア	生理指標 皮膚抵抗	影響なし(ただし皮膚抵抗に一部 有意差有り)	CDMA携帯による影響 21人の若者(10代)および21人の成人
Wilen et al. ⁽⁶¹⁾	ボランティア	生理指標 記憶 反応時間	電波の有無による影響はなし	GSM基地局を想定したばく露 20人のMPRSと20人の対照。
Nieto-Hernandez ⁽⁶²⁾	ボランティア	電波の感知 症状	質的検討であり、統計的には不明	EHSの一部に他と異なるデータが見られたが、機序は不明

表10 人体に対する電流の作用(実験値)

電撃の影響	直流		交流				
			60Hz		10000Hz		
	男子	女子	男子	女子	男子	女子	
感知電流、少しちくちくする	5.2mA	3.5mA	1.1mA	0.7mA	12mA	8mA	
苦痛を伴わないショック、筋肉の自由がきく	9	6	1.8	1.2	17	11	
苦痛を伴うショック、ただし、筋肉の自由がきく	62	41	9	6	55	37	
苦痛を伴うショック、離脱の限界	74	50	16	10.5	75	50	
苦痛を伴うはげしいショック、筋肉硬直、呼吸困難	-	-	23	15	94	63	
心室細動の可能性あり、通電時間							
	0.03sec	1300	1300	1000	1000	1100	1100
	//						
	3.0sec	500	500	100	100	500	500
心室細動が確実に発生する			上記の値を 2.75 倍する。				

資料出典:電気工事士教科書 (社)日本電気協会

(財団法人省エネルギーセンターのHPより引用 <http://www.eccj.or.jp/>)

○中間周波電磁界の健康影響に関する研究動向について

中間周波領域においては生体に対する作用を直接的に示すデータが国際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)⁽¹⁾においても、中間周波領域の生体影響に関する研究の推進が第1番目に勧告されている。具体的には、EHCの「第1章、1.2 研究のための提言」では、「包括的なニーズとして、この分野では現在データが不足していることから、一般的に300 Hzから10 MHzまでの周波数を意味する中間周波数(IF)に関する詳細な研究が求められている。

中間周波電磁界の利用は、以前は工業用の誘導加熱と医療用のパルス磁気治療を除けば、余り目立っていなかった。しかし最近の電磁界利用の広がりとともに、様々な用途に使用されるようになってきている。

中間周波電磁界を使う物の中でも、近年、電磁(IH)調理器普及が著しく、その健康影響に関しても特に市民の関心が高い。家庭用IH調理器は主に20kHzの周波数帯を利用する物が主流であり、当然であるが、20kHzの電磁界が発生する。しかしながらIH調理器で使用する電磁界波形で生体影響を評価した論文は少ないがこれまでの知見をまとめることとする。

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⁽⁶³⁾⁽⁶⁴⁾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る。

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がある。彼らは20 kHzで6.5 μT(国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)のガイドライン)の鋸歯型波形(注: IH調理器の波形とは異なる)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時間のばく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⁽⁶⁵⁾。また、同様のばく露を、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⁽⁶⁶⁾⁽⁶⁷⁾。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、上記のばく露では影響がないことを示した⁽⁶⁸⁾。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、長時間ばく露とはいえ、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。

近年、我が国の財団法人電力中央研究所では中間周波の健康影響評価としていくつかの研究を報告している。多くはまだピアレビューされた論文として未発表であるが、結果はWeb上で公開されているので紹介する。細胞実験においては、2kHzで910 μT(国際ガ

イドラインの146倍)、20kHzでは、1.1mT (同176倍)、60Hzでは110 μ T (同18倍)の磁界をばく露し、指標としては、助変異原性⁽⁶⁹⁾、小核試験⁽⁷⁰⁾、マウスリンフォーマ試験⁽⁷¹⁾を行い、いずれも再現性のある有意なばく露の影響はなかったとしている。また、器官成長期鶏胚を用いた発生毒性評価を行い、20kHz、1.1mT(rms) (ICNIRP公衆ガイドラインの176倍)の垂直磁界をふ卵開始から11日間ばく露する実験を行ったが影響は見られなかった⁽⁷²⁾。一方で小動物に対して20kHz、0.20mT(rms) (ICNIRP公衆ガイドラインの32倍)または60kHz、0.10mT(rms)の正弦波の亜慢性ばく露が可能な専用の施設を設営⁽⁷³⁾し、ラットに20kHz、0.20mT(rms) (ICNIRP公衆ガイドラインの32倍)または60kHz、0.10mT(rms)の正弦波、垂直磁界を1日22時間、14日間ばく露したが急性毒性は見られないという結果であった⁽⁷⁴⁾。

以上のように、中間周波(特にIH調理器が使用している20kHz)の研究については未だに限定的な結果のみであり、今後、健康リスクを評価し、安全・安心を担保するためにはさらなる研究が必要である。

○IH調理器使用によるコンタクト電流による健康影響(特に心伝導系について)の発生リスクに関する調査

一般的に我々が電気を使用するに当たっては常に危険が伴っている。しかし、正しく設置された電気機器を使用する範囲においては、その危険リスク

は最小限に抑えられていると言っても過言ではない。電気機器の設置については、「電気設備に関する技術基準を定める省令(平成9年3月27日通商産業省令第52号)」の第4条では「電気設備は、感電、火災、その他人体に危害を及ぼし、又は物件に損傷を与えるおそれがないように施設しなければならない」とあり、同272条において、IEC60364規格の採用が唱われている。IEC60364規格とは国際電気標準会議(IEC)が定めた建築電気設備の国際規格であり、その中心となる部分に感電保護をはじめとする安全保護が述べられている。なお、このIEC60364はJIS規格にも反映されており、JIS C0364はIEC60364と同等である。JIS C0364では「人または動物の体を通ずる電流から引き起こされる生理学的効果」を「感電」と定義している。したがって感電とは厳密には人体を電流が通過しこれを知覚することをいうが、この知覚すること自体は必ずしも危険とはいえない。知覚される電流よりもさらに強い電流により、人体に影響が見られる反応を電撃反応といい区別する場合がある。このような背景から、感電保護は電撃保護のことを指す場合が多い。一般的に、感電の度合いには、「電流を感知して少しちくちくする」というレベルから、「心室細動が発生する」レベルまで、様々である。報告によると人体の電流感知に関しては、高周波になればなるほど感じにくくなることが知られており、おおよそ1kHzまでの周波数に対しては、ほぼ等しい反応を示すことが示されている。

表9には人体に対する電流の作用とし