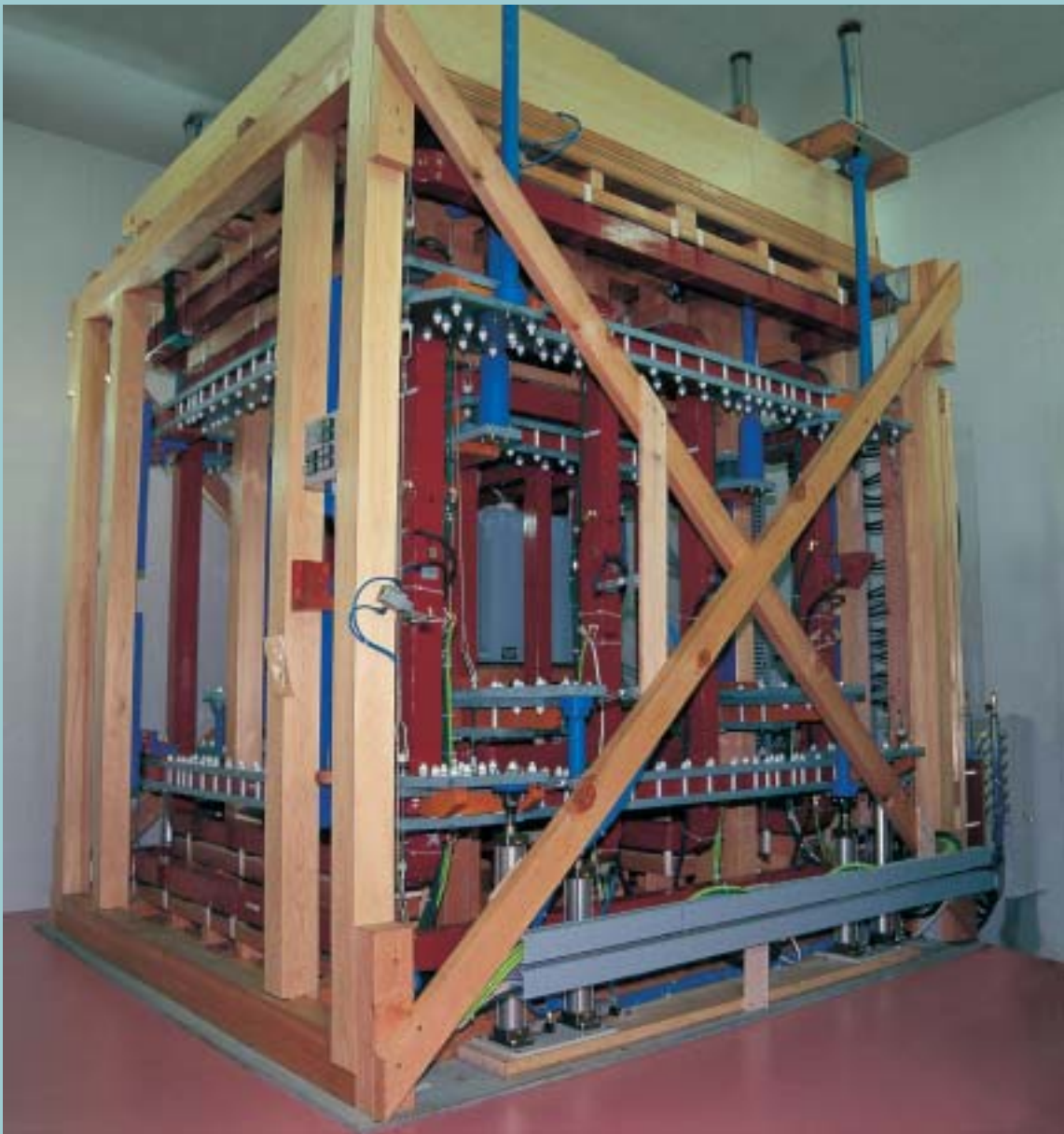


# DENCHUKEN REVIEW

## 商用周波磁界の生物影響研究

電中研レビュー No.47 2002.11



\* 細胞実験用ワイドレンジ磁界曝露設備

財団法人 電力中央研究所

巻頭言	北海道大学名誉教授 加藤 正道	2
「電磁界の生物影響研究」のあゆみ		4
はじめに	理事 我孫子研究所長 加藤 正進	6
第1章 電磁界問題の発端と経緯		7
1-1 電界問題		9
1-2 磁界問題		9
1-3 財電力中央研究所の研究		10
第2章 生物学研究		11
2-1 研究の経緯		14
2-2 研究作業仮説の設定		14
2-3 細胞内情報伝達機構への影響		15
2-4 微生物における遺伝子発現への影響		18
2-5 遺伝子変異への影響		20
2-6 免疫系への影響		20
2-7 中枢神経系ホルモンへの影響		23
2-8 霊長類(ヒヒ)を用いた社会・学習行動		25
2-9 生殖機能への影響		26
2-10 発がんに対する影響		26
2-11 まとめと今後の課題		29
第3章 電気工学研究		31
3-1 多機能型磁界測定器の開発		33
3-2 生体内誘導電流評価		34
3-3 生物実験用強磁界発生装置の開発		38
第4章 情報の分析・評価		43
4-1 研究の経緯		45
4-2 疫学研究の流れ		47

4 - 3	訴訟の流れ 米国の事例 .....	51
4 - 4	公的機関の評価 .....	54
4 - 5	まとめと今後の課題 .....	58
	コラム1：RAPID計画の成果に対する当所の評価 .....	59
	コラム2：コホート .....	59
	コラム3：国際がん研究機関（IARC）と発がん性評価 .....	60
	コラム4：予防原則 .....	61
	コラム5：電気過敏症 .....	61
	コラム6：研究の現状 グラフより .....	61
	第5章 総合評価 .....	63
	コラム7： .....	66
	コラム8： .....	66
	おわりに ===== 理事 狛江研究所長 福島 充男	67
	引用文献・資料集 .....	68

---

**表紙絵：細胞実験用ワイドレンジ磁界曝露設備**

商用周波磁界だけでなく、0～1 kHzまでの周波数の磁界を発生することができ、商用周波数では10mTまで発生可能。

現在、真核細胞の遺伝子発現、免疫細胞の各種機能への影響評価研究を実施中。

## 商用周波磁界の生物影響研究に期待すること



電気と生体との関係についての研究の流れを振り返ってみたい。大きく3つの分野に分けられるようである。

### 1．基礎的、神経生理学的研究

この研究の流れは1921年アメリカのGasserがブラウン管オシロスコープを神経生理学の研究に導入するに及んで急速に発展し、脳神経系における情報伝達が活動電位、その他の電気信号によって行われていることが明らかにされた。脳神経細胞の活動が本質的に電気現象であるなら、体外から脳の特定の部位に電気信号を送り込めば、その部位の活動を変えられるのではないかとこの考えのもとに、頭皮上に電極を当てて電気刺激を加える方法（脳表面しか刺激できない）及び、脳の深部のターゲットを狙って刺激を加える磁気刺激などが用いられている。特に、後者は東大上野照剛教授（1988）による8字型コイルによる刺激法が広く世界中で用いられており、脳の高次機能の解明（Day, Brown ; 2001）あるいは、ある種の精神疾患の治療の目的（Pascual-Leone et al. ; 1996）などに応用されている。

えられるのではないかとこの考えのもとに、頭皮上に電極を当てて電気刺激を加える方法（脳表面しか刺激できない）及び、脳の深部のターゲットを狙って刺激を加える磁気刺激などが用いられている。特に、後者は東大上野照剛教授（1988）による8字型コイルによる刺激法が広く世界中で用いられており、脳の高次機能の解明（Day, Brown ; 2001）あるいは、ある種の精神疾患の治療の目的（Pascual-Leone et al. ; 1996）などに応用されている。

### 2．主として骨折の治療など臨床応用

整形外科医安田（1954）により、骨が圧電現象を示すことが明らかにされた。この研究はアメリカの医師に注目され、骨折受傷後、長期間癒合しない難治性の症例に応用され、その後世界中で骨折治療促進に応用されている。

### 3．健康に対する関心

1973年ソ連政府は変電所などに勤務する作業者の電界値に関する労働基準を設け

---

た。これを契機として、電界が健康に影響するのではないかと懸念が広がり、1979年アメリカで Bioelectromagnetics Society が設立され、一般の人々の懸念とそれに応える研究者の関心が高まり、多くの研究が精力的に行われてきている。

日本におけるこの問題への取り組みは早く、ソ連政府の労働基準の策定をみて、電中研と北大（応電研松本伍良教授と医学部加藤）で、電界の小動物に対する影響を検討する共同研究を開始した。1979年アメリカの Wertheimer、Leeper（疫学者と電気工学者）が、「磁界が小児白血病と関連するのではないか」との論文を公表したが、これを契機として研究者の関心も一般の人々の懸念も、電界から磁界に移ってきた。

1984年から米国エネルギー省との連携の下に、電中研と Southwest Research Institute との共同研究プロジェクトを開始した。1992年まで続いたが類人猿ヒヒの行動、メラトニン分泌などの研究を行った。これと相前後して電中研 - 北大による 50Hz 磁界のラットメラトニン分泌に及ぼす影響の研究プロジェクトが始まった。まず、ラットの磁界曝露装置が電中研チーム（重光ら、1993）により開発されたが、この装置は回転円磁界、楕円磁界、直線磁界を任意に発生させることができる。この当時、世界中の研究者は磁界のことを単に「磁界」と言うのみで、円磁界とか水平磁界とかを区別して言う者はいなかった。しかし、この数年、世界中の研究者が動物実験でも、人体実験でも論文を書く時は回転円磁界か、直線磁界かなどを必ず明記するようになってきた。いわば世界標準となった。学会に対する電中研チームの大きな貢献である。

このように、上記3分野のいずれにも日本の研究者は積極的に貢献し、リードしてきている。今後とも、このペースで研究を推進していくことを期待したい。

北海道大学名誉教授

加 藤 正 道

## 電中研『電磁界の生物影響研究』のあゆみ

西 暦	当研究所および国内の状況	海 外 の 状 況
1966 年代		ソ連：超高压変電所従業員の不定愁訴報告（CIGRE）
1973		米国ニューヨーク州で電界問題に関して 765kV 送電線建設反対訴訟
1975	電界解析・測定手法の開発研究に着手	
1976	静電誘導電界の規制（3kV/m：電気設備技術基準）	
1978	UHV 送電特別委員会報告書 ・我が国の設計条件下での電界による生物影響の根拠はない	
1979		磁界と小児白血病の相関を示唆する米国デンバーでの疫学調査（Wertheimer と Leeper）
1980		電磁界の健康影響に関するニューヨーク州プロジェクト開始（～ 1987）
1981	電界の生殖影響研究（～ 1987）	
1982	UHV 送電実証試験委員会（電界の樹木影響 ～ 1985） 電界の生物影響文献調査（受託研究、～ 1988）	
1984	大規模送電線電界等調査検討会（資源エネルギー庁）報告書 ・居住環境で生じる電界が人体に影響を与えるという証拠はない 米国エネルギー省とのヒヒを用いた電磁界影響に関する共同研究を開始（～ 1992）	世界保健機関（WHO）：環境保健基準（EHC35）公表
1985	UHV 送電実証試験委員会報告書 ・我が国の設計条件下での電界による樹木への影響は観察されず	
1987		ニューヨーク州プロジェクト最終報告書 ・ほとんどの研究で影響なしとの結論 ・磁界と腫瘍（がん）との関連性に関する研究の必要性を指摘 WHO：磁界に関する環境保健基準（EHC69）公表 ・5mT（50G）以下の 50、60Hz 磁界では、有害な生物学的影響は認められないと評価
1988		反復調査により、小児白血病に関する Wertheimer の結果を定性的に確認（Savitz）
1989	北大との共同研究による中枢神経系ホルモンに関する磁界影響研究開始（～ 1993） EPRI との共同研究による米国電力従業員を対象とした疫学調査開始（～ 1995）	
1990		国際放射線防護学会（IRPA）：暫定ガイドライン提示 ・一般公衆の連続曝露は 100 μT（1G）以下を推奨
1992	米国エネルギー省の共同研究報告書 ・ヒヒの行動、学習機能への電磁界の影響は認められず 磁界の生殖影響研究開始 環境庁：調査研究報告書 ・WHO EHC69 を見直すべき新知見はない	英国放射線防護局（NRPB）評価報告書 ・電磁界の生物学的影響に科学的証拠はなく、曝露を制限する根拠なし スウェーデン・カロリンスカ研究所疫学報告書 ・送電線磁界と小児白血病の相関を示唆 米国包括エネルギー法案成立（米国 RAPID 計画）

西 暦	当研究所および国内の状況	海 外 の 状 況
1993	資源エネルギー庁：電磁界影響調査検討会報告書 ・居住環境の磁界による有害な健康影響の証拠はない ・より一層の研究推進と基礎的知見の蓄積が望ましい 受託研究フェイズ1（生殖影響試験；～1997） 細胞・分子レベルの研究開始	米国 RAPID 計画開始
1995	環境庁：再調査研究報告書 ・WHO EHC69 を見直すべき新知見はない ・疫学調査の具体的手法の確立が必要	米国物理学会（APS）：評価報告書 ・電磁界と腫瘍の関連性は科学的に立証されていない
1996	研究推進体制の強化	米国科学アカデミー（NAS/NRC）：評価報告書 ・生活環境電磁界の悪影響を示す明確で説得力のある証拠はない WHO：EMF プロジェクト開始（～2005）
1997	受託研究フェイズ2（腫瘍促進効果検証試験；～2004） 生体防御関連研究の開始	米国国立がん研究所（NCI）疫学報告書 ・商用周波磁界と小児白血病との相関なし
1998	電気学会：調査研究報告書 ・通常的环境電磁界が健康に悪影響を与えるという結果は得られていない	国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）ガイドライン ・WHO の見解を根拠とし、安全係数をとって一般公衆に対して、50Hz で 100 $\mu$ T（1G）以下を推奨 米国 RAPID 計画 Working Group 報告書 ・投票により、磁界を国際がん研究機関（IARC）の 2B に分類（発がん性の可能性がある）
1999	環境省：再々調査研究報告書 ・動物実験の整理、疫学調査研究の必要性を指摘 科学技術庁・わが国初の本格的疫学調査を開始（実施主体は国立環境研究所；～2002）	米国科学アカデミー（NAS/NRC）：RAPID 計画評価報告書 ・RAPID 計画の結果は、電磁界が公衆への健康障害を有するとの議論を支持しない 米国環境健康科学研究所（NIEHS）：RAPID 計画最終報告書 ・全体として、磁界曝露が健康にリスクをもたらす科学的根拠は弱い 欧州連合（EU）：ICNIRP 基準に準拠した勧告（強制力はなし）
2000	郵政省：携帯電話と脳腫瘍に関する疫学調査を開始（～2004）	
2001	総合報告書「商用周波磁界の生物影響研究」発表	英国 NRPB：再評価 ・一部の疫学調査から証拠としては弱いだが、磁界が小児白血病リスクを増加させる可能性は疑問として残る 国際がん研究機関（IARC）：静電磁界、商用周波電磁界評価 ・商用周波磁界は 2B、商用周波電界と静電界、静電界は「発がん性を分類できない(3)」
2002		IARC モノグラフ 80 発刊

# はじめに

理事 我孫子研究所長 加藤 正進



商用周波電磁界、特に、磁界問題は1970年代後半に健康影響が指摘され、欧米を中心に活発な研究が行われるとともに、磁界と健康影響との因果関係について国際的な科学論争が展開されてきた。当所は1970年代後半より、商用周波電磁界の研究に着手し、1990年代からは磁界の生物影響に関して関係部署の総力を挙げたプロジェクト型研究を推進し、「通常的生活環境における商用周波磁界が、健康に何らかの悪影響を与えていると考えるべき科学的根拠は得られなかった」との結論を得て、2001年4月に総合報告書を取りまとめた。また、米国

においても、国家プロジェクトであるEMF RAPIDプログラムの最終報告書が1999年に発表され、「磁界によるがんや他のヒトへの疾病の危険に関する証拠は弱い」と結論している。

現在、内外の関心は商用周波磁界（ELF）から携帯電話に代表される高周波領域（RF領域）の健康影響問題に移行しつつある。このような状況のもと、世界保健機関（WHO）は国際電磁界プロジェクトを立ち上げ、電磁界の健康影響に関する調査活動が進行中である。このプロジェクトでは、WHO、国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）、国際がん研究機関（IARC）とが共同で、0～300GHzの電磁界曝露によるヒトの健康への影響を再評価中である。このうち、商用周波磁界を含む極低周波領域については2003年に環境保健基準を刊行する予定で活動が進められている。これらの本問題に関する内外の情報については、今後とも科学的・客観的な分析・評価を行い、適時、社会に向けた情報発信を継続して実施する。

本レビューでは、総合報告書で取りまとめた内容を中心に紹介するが、総合報告書取りまとめ時以降の新たな知見や、上記の内外の動向に関しても紹介する。本レビューが電磁界問題の現状を御理解戴く上で多方面の関係者、ならびに、広く社会一般の方々に対し、いささかなりともお役に立てば幸いである。



第 1 章

1

電磁界問題の発端と経緯

## 第1章 電磁界問題の発端と経緯 目次

我孫子研究所 生物科学部 上席研究員 根岸 正

1 - 1	電界問題 .....	9
1 - 2	磁界問題 .....	9
1 - 3	電力中央研究所の研究 .....	10



根岸 正（1979年入所）

電磁界の生物影響研究のうち、実験動物を用いた生殖影響に関する研究に従事してきた。現在は、経済産業省資源エネルギー庁からの受託研究である「腫瘍に及ぼす影響」に関する研究に取り組んでいる。

生物は、この地球上で宇宙からの、あるいは、地球環境の中で発生する様々な電磁環境のもとに進化を遂げ続けている。また、我々人類を含む多くの生命体はその体内で神経電流や脳内での論理判断などきわめて高度な情報伝達、情報処理に電気現象を活用して、生命を維持し、健康を保っている。

19世紀産業革命以来の科学技術の発展のもと、マルコ・ニヤベルによる情報通信技術、ファラデー・やエジソンによる電力エネルギー・技術の開発・発展により、20世紀に入り、我々にとって電気は空気や水と同様に、日常生活に必要不可欠からざるものになってきている。

1966年に旧ソ連のAsanovaら<sup>(1)</sup>が世界大電力網会議(CIGRE)において、超高压変電所で日常の倦怠感を訴える従業員は、高電界の場所に立ち入ることが多い職種が多かったと報告したことに電界問題は端を発する。

本報告以前には、感電や電界の感知に関する研究や強くかつ管理・制御された電界を医療などに利用する例は散見されていたが、通常の職場環境における商用周波電界が、ヒトの健康に影響を与えるかも知れないとする問題提起に、世界の関係者は大きな関心を寄せた。この健康問題を根拠に、ニュ・ヨ・ク州の超高压送電線建設反対訴訟が起こされた。その訴訟調停では、「今後、電気事業者が中心となって、本問題を解明するための科学研究を実施すること」との裁定が下され、欧米で積極的な研究が開始された。その代表的なものがニュ・ヨ・ク州プロジェクトと呼ばれるもので、1970年代後半から80年代にかけて、細胞・動物実験、疫学調査や生活お

一方、電力系統の構成をめぐって行われたエジソンとヘルツの送電効率、利用効率に関する論争の中では、ヒトの健康に対する直流と交流の利害得失が議論されたと言われている。この電磁界の健康問題を主題として関連学協会では本格的な議論が始まり、一般公衆が懸念を示し始めたのは1960年代に入ってからである。現在に至るまで社会的にインパクトの大きかった内外の研究や公的機関による科学的根拠の検索や学術的評価活動などの主たるものを、4～5頁の「電磁界の生物影響に関する研究のあゆみ」に記載した。

## 1 - 1 電界問題

よび職場環境の電界の実態調査などの幅広い調査・研究が行われた。

このプロジェクトが行われている間、各国では電界感知および電界下の車両などに触れた場合の接触電流に対する安全性の観点から、送電線周辺の電界を現状維持もしくは抑制する規制が設けられた。日本の場合、1976年に送電線下の地上1mの電界を3 kV/m以下にするよう定められた<sup>(2)</sup>。

一方、このプロジェクトの一部では、通常の電界条件では有り得ないような強い電流を、培養細胞に曝露した実験や一貫性のない疫学調査結果などにより、多少の混乱はあったものの、1987年に公表された最終報告書<sup>(3)</sup>は、「通常的生活、職場環境における商用周波電界が健康に悪影響を与えるという科学的根拠は得られなかった」というものであった。

## 1 - 2 磁界問題

商用周波磁界と健康に関しては、米国の疫学者であるWertheimerとLeeper(1979)<sup>(4)</sup>による、磁界と小児白血病の相関を示唆したデンバーでの調査報告が初めてである。この時、本分野の関係者はもっぱら電界問題に関心を寄せており、この報告書はあまり注目されなかった。

しかし、前述のニュ・ヨ・ク州プロジェクトが「電界に問題なし」と結論したこと、同じ米国のSavitzら(1988)<sup>(5)</sup>が同じデンバーでの調査から、Wertheimerの結果と定性的に類似の結果を得たと報告したことなどから、関連学協会の関心は、電界問題から磁界問題に移行

した。

これらのきっかけとなった疫学調査報告書はいずれも、送配電線からの磁界と小児白血病との相関を直接示唆するものでないにも拘わらず、関係者の関心が大きく磁界に移ったのは、次のような理由によるものと思われる。

- (1) 電界問題は変電所従業員という職業者が対象であるのに対して、磁界問題は子供という一般公衆であったこと
- (2) 健康障害が前者は倦怠感という神経的障害であったのに対して、後者は小児白血病という人間の生命に関わる病気であったこと

その後、多方面にわたり多くの研究が実施されたが、科学的に再現性のある証拠が見出すことができず、1990

年代に入ると多くの公的機関が社会問題の一つとして、分析・評価した報告書を公表してきた<sup>(68)</sup>。

そして、現象の再現性確認を最大の目標とした米国 RAPID 計画が1993年に開始され、その最終報告書が1999年にまとめられた<sup>(69)</sup>。この最終報告書では、再現性のある科学的データはほとんど得られなかったものの、電磁界曝露が完全に安全とは認識できないとし、完全な問題解決に至っていない。

さらに、世界保健機関（WHO）は直流から超高周波（DC～300GHz）までの電磁界・電磁波の健康影響に関して、再評価を進めており<sup>(70)</sup>、今後も精力的な研究や評価活動が行われるものと考えられる。

## 1 - 3 (株)電力中央研究所の研究

(財)電力中央研究所（以下、当所）では、この生活環境における商用周波電磁界の生物への影響に関する科学的基礎資料を確保するための調査・研究を、4半世紀前から積極的に行ってきた。

すなわち、内外の関連学協会が電界問題に関心を示していた1970年代後半から、関連研究論文の収集・整理・分析を始め、電力設備周辺の電磁界の計算、測定技術の開発を進める一方、米国エネルギー省（DOE）とのヒビを用いた電磁界の行動、学習機能への影響実験<sup>(71)</sup>、米国電力研究所（EPRI）との米国電力従業員を対象とした疫学調査、北海道大学との実験動物を用いた中枢神経ホルモンへの磁界の影響実験<sup>(72)</sup>など、内外の専門機関との共同研究を進めた。これら共同研究の結果は、通常的生活・職場環境における電磁界が、われわれの健康に直接悪影響を与えることを示唆するものではなかった。

当所は、1990年代に入り、一部の疫学調査で示唆されている健康影響の科学的根拠を検索する自主研究、あるいは、資源エネルギー庁からの受託研究を精力的に進めた。特に、1990年代半ばからは、大幅な研究設備の増強と研究推進体制の強化を行い、関係部署が総力を結集して研究を進めてきた。

さらに、国内の幅広い学識経験者の協力を得て、関連学術情報の客観的な分析と評価を随時行い、その内容を関連学協会に発言すると共に、一般社会の不安感を払拭するために、科学的・客観的な情報の発信活動を行っている。

本レビューは、主として極低周波磁界を中心とした最近の当所の生物学的、電気工学的研究成果や内外の動向、公的機関の評価等<sup>(73)</sup>についてまとめたものである。

第 2 章

2

生物学研究

## 第2章 生物学研究 目次

我孫子研究所	生物科学部	上席研究員	根岸	正
我孫子研究所	生物科学部	主任研究員	西村	泉
我孫子研究所	生物科学部	主任研究員	小田	毅
我孫子研究所	生物科学部	主任研究員	中園	聡
我孫子研究所	生物科学部	主任研究員	窪田ひろみ	
我孫子研究所	生物科学部	上席研究員	重光	司
我孫子研究所	生物科学部	主任研究員	今井	節夫

2 - 1	研究の経緯	14
2 - 2	研究作業仮説の設定	14
2 - 3	細胞内情報伝達機構への影響	15
2 - 4	微生物における遺伝子発現への影響	18
2 - 5	遺伝子変異への影響	20
2 - 6	免疫系への影響	20
2 - 7	中枢神経系ホルモンへの影響	23
2 - 8	霊長類（ヒヒ）を用いた社会・学習行動	25
2 - 9	生殖機能への影響	26
2 - 10	発がんに対する影響	26
2 - 11	まとめと今後の課題	29

根岸 正（8ページに掲載）



小田 毅（1996年入所）  
低周波電磁界の生物影響に関する研究に従事。現在は、分子生物学的手法を用いて電磁界曝露による遺伝子発現の研究に取り組んでいる。



西村 泉（1984年入所）  
専門は毒性学。電磁界の生物研究では、細胞内カルシウム・免疫系への影響に関する研究を行った。現在は、粒子状物質の生物影響評価研究に取り組んでいる。



中園 聡（1993年入所）  
電磁界の生体影響について、遺伝子変異および遺伝子発現を指標に評価を行ってきた。現在は、DNAチップなどの手法を用いヒト全遺伝子レベルでの発現応答から、環境毒性因子の迅速スクリーニングおよび生体影響評価の研究に取り組んでいる。



窪田ひろみ（1997年入所）  
電磁界の免疫機能への影響に関する研究を  
分担してきた。現在、微量物質および粒子状  
物質の生物影響に関する研究を進めている。



今井 節夫（1996年 日本生物科学研究  
所より出向派遣）  
電磁界の生物影響研究のうち、実験動物を  
用いた生殖影響等に関する研究に従事してき  
た。現在は、経済産業省資源エネルギー庁か  
らの受託研究である「腫瘍に及ぼす影響」に  
関する研究に取り組んでいる。



重光 司（1980年入所）  
電磁界の生物影響研究のうち、電磁界曝露  
装置の開発等、工学的研究から実験動物を用  
いた研究、ならびにデータベースのとりま  
とめ等、広範囲の分野にわたって研究を進め  
ている。

## 2 - 1 研究の経緯

1990年代前半、関連学協会の極低周波磁界の健康に関わる生物学的研究の関心は、Katoら<sup>①</sup>（当所と北海道大学との共同研究による成果：本章「中枢神経系ホルモンへの影響」参照）やYellonら<sup>②</sup>によって示唆された松果体から分泌されるホルモンであるメラトニンの夜間の分泌抑制、Liburdy<sup>③</sup>らによる乳がん細胞 MCF - 7におけるメラトニンの作用低下、あるいは、Goodman<sup>④</sup>らによるがん関連遺伝子やストレス関連遺伝子などの遺伝子発現への影響などであった。

これらの研究結果は、いずれも再現ができなかったり、特定の培養細胞系にしか現象が確認できないなど、科学的証拠となるべき現象が見出せなかった。しかし、これらの断片的な論文発表は、米国を中心として、一般社会に不安感を提供することとなり、極低周波磁界問題が社会問題の一つになった。

このような背景のもと、膨大な研究資源を投入して、再現性のある科学的証拠を検索すべく開始されたのが、後述の米国によるRAPID計画(第4章参照)である。

当所では従来から積極的に関連研究情報の収集・分析・評価を行いつつ、生物学的研究および電気工学的研究を進めてきたが、1990年代中葉になると、我が国に

おいても磁界と健康に関する問題が社会問題の一つになる兆しが見え始めたこともあり、当所は所内に「電磁界検討委員会」を設け、当所の関連研究、主として生物学的研究の推進戦略を検討した。

この委員会の答申は、「商用周波微弱磁界の生物影響を科学的に解明し、影響の予測・評価を行う。このため、研究作業仮説を基に、細胞・分子レベルや、生理学的機能への再現性のある反応の探索を行うとともに、一部の疫学調査で影響が示唆されている生殖、腫瘍への影響については、実験動物を用いて実証的に検討するなど、総合的に生物学的研究を推進する。さらに、磁界計測手法の標準化、磁界曝露による生体内誘導電流の解析・評価技術の開発などの電気工学的研究を進めるとともに、疫学調査、内外の公的機関の本問題に関する評価等について分析・評価する。」というものであった。

当所ではこの答申を踏まえ、下記の研究作業仮説を設定するとともに、プロジェクト型の総合的実験研究を遂行するため、大幅な実験設備の整備と研究要員の充実を図り、細胞・遺伝子レベルから動物実験まで幅広い実験研究を開始した。

## 2 - 2 研究作業仮説の設定

当所の電磁界問題関係者は、上記の答申を踏まえ、これまでに発表された生物学的研究結果、疫学調査結果を精査し、「一部の疫学調査が示唆している腫瘍、中枢神経系障害、生殖障害が、真に科学的根拠のある現象であれば、げっし類などの実験動物に磁界を曝露することにより、影響を示唆する結果が得られるはずであり、それらの影響が発現するためには、発がんに関連した遺伝子の発現などの細胞・分子レベル、あるいは、免疫、ホルモンなどの生体防御、生体調節機能にも影響が現れるはずである。」という研究作業仮説（図2-2-1）を設定し、体系的に生物学的研究を展開させた。

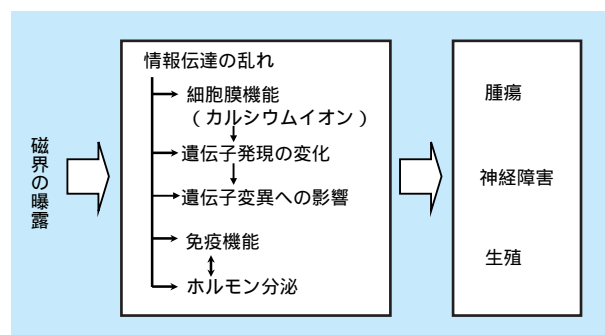


図2-2-1 研究作業仮説



## 2 - 3 細胞内情報伝達機構への影響

研究作業仮説における情報伝達の乱れの一つとして、細胞増殖や細胞の活性化など、細胞機能の引き金になっている細胞内カルシウムイオンと、細胞膜からの信号を細胞核に伝える情報伝達機構のひとつであるチロシンキナ - ゼのリン酸化反応について実験した。

### 2-3-1 細胞内カルシウムイオン

実験動物であるラットから取り出した胸腺、脾臓の細胞を培養しながら、50Hzの水平、垂直、回転円磁界を20～30分間、細胞に曝露した。実験によっては、曝露前に刺激を与えた細胞も用いた。細胞の機能に変化が現れるときには細胞内のカルシウム濃度が増加するため、それを測定することで磁界による影響の有無を検証した。細胞内のカルシウムイオン濃度の測定には、多数の細胞をごく短時間で測定可能なフロー - サイトメトリ - (FCM)法を採用し、磁界曝露する前、曝露中、曝露後と連続してその濃度変化を測定した。また、FCM用培養装置は磁界が乱されることなく細胞に達するように非磁性素材を用い、かつ、温度制御が可能な専用装置を開発した(図2-3-1)。

結果の一例を図2-3-2に示した。30分間の磁界曝露中に細胞内カルシウム濃度に変化はなかったが、曝露後に細胞内カルシウムイオンを増加させる試薬(カルシウムイオノフォア)を加えるとその濃度は著しく増加した。このことから、実験に使用した細胞には、正常に細胞内



図2-3-1 当所が開発した細胞培養器

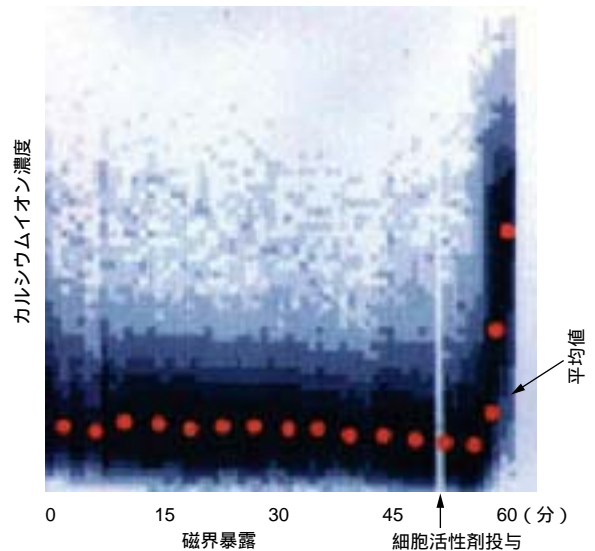


図2-3-2 細胞内カルシウムイオン濃度変化の例

カルシウムが増加する能力はあるが、磁界にはその作用のないことが明らかになった。全ての実験結果をまとめたものを表2-3-1に示した。

磁界の曝露により細胞内の遊離カルシウムイオン濃度が増加するという研究があり、細胞レベルでの磁界影響として議論されている。Liboffら<sup>(5)</sup>は、特定の周波数と強度の磁界が細胞に影響を与えるとし、その現象を説明するイオンサイクロトロン仮説を提唱した。測定法としてLiburdyら<sup>(6)</sup>は放射性同位元素( $^{45}\text{Ca}$ )を用い、Lindstromら<sup>(7)</sup>は蛍光顕微鏡を、Lyle<sup>(8)</sup>やFritzら<sup>(9)</sup>はFCMを用いている。当所の研究では高精度の測定を行うために、FCM法を採用した。また、Liburdyらが使用した磁界曝露用コイルと同一のものを米国エネルギー省より借用し、当所が開発したFCM用細胞培養装置をバツテル研究所のFritzらに提供するなど、国際的な協力のもとで研究を進めた。

磁界影響有りとする他所での研究との結果の相違については、測定法の違いに起因する可能性が考えられた。放射性同位元素法では曝露前と直後の時点でしか細胞内カルシウムを測定できず、細胞膜の外側に付着したカルシウムイオンも測定対象となる可能性がある。蛍光顕微鏡法では顕微鏡の視野に入る細胞のみが測定対象となり、必ずしも細胞集団全体の平均的な反応を評価していない

表2-3-1 細胞内カルシウムに関する実験結果

磁界強度 (mT)	磁界特性	曝露時間 (分)	繰り返し (回)	細胞 (刺激)	磁界反応	陽性反応
0.10	水平	30	3	胸腺 (無)	検出せず	反応あり
0.10	垂直	30	6	胸腺 (無)	検出せず	反応あり
0.10	水平 + 垂直	20 + 20	6	胸腺 (無)	検出せず	反応あり
0.14	回転円	30	6	胸腺 (無)	検出せず	反応あり
0.14	回転円	30	3	胸腺 (有)	検出せず	反応あり
5.00	垂直	30	6	胸腺 (無)	検出せず	反応あり
5.00	垂直	30	6	胸腺 (有)	検出せず	反応あり
5.00	垂直	30	6	脾臓 (有)	検出せず	反応あり
5.00	垂直	30	3	末梢血 (有)	検出せず	反応あり

可能性も考えられる。FCM法では細胞内のカルシウムイオンのみを選択的に測定し、多数の細胞を高速に処理するため、細胞を満遍なく網羅し、かつリアルタイムで測定できる。当所を含め、FCM法を用いたいずれの研究機関における実験でも磁界曝露による影響を見出していない。当所で繰り返し行った実験結果を総合すると、本実験条件下では磁界の細胞内カルシウムに対する影響はないことが示唆された<sup>(0001)</sup>。

### 2-3-2 チロシンキナーゼのリン酸化反応

細胞内情報伝達機構の一部を担うチロシンキナーゼは、細胞膜表面で認識された信号をチロシンリン酸化により細胞内に伝達し、細胞の機能発現等の重要な働きを制御する酵素の一つである (図2-3-3)。磁界が細胞に何らかの刺激を与えていると仮定した場合、このリン酸化反応に変化が生じることが考えられる。一般的に、神経細胞は電気的な信号により感覚、認識、学習、行動といった生命現象を司っていることから中枢神経系への影響が推測される。

このため、本実験では生後7日齢のラット小脳顆粒細胞を供試し、水平、垂直磁界がそれぞれ10mT発生可能な細胞実験用磁界発生装置 (図2-3-4) を用いて、磁界曝露強度は最大で14mTまでの50Hz回転円磁界とした。細胞は、4日程度培養し、電気的な応答に鋭敏な神経突起が伸展した状態で、磁界を曝露した (図2-3-5)。

図2-3-6、図2-3-7に実験結果の例を示すように、14mT、1時間曝露の場合に分子量約60kDa付近のチロシンキナーゼのリン酸が、対照 (非曝露) に対して再現性のある増加を示した。これに対して強度は十分の一の



図2-3-4 細胞実験用磁界発生装置

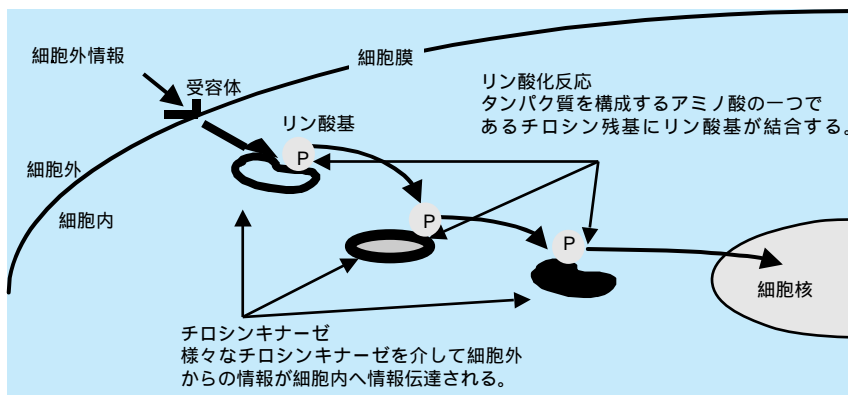


図2-3-3 チロシンキナーゼによる情報伝達の模式図

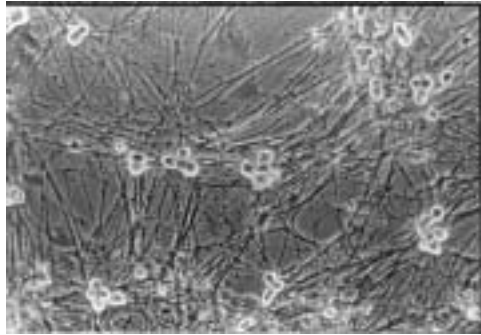


図2-3-5 実験に用いたラット小脳顆粒細胞

1.4mTの場合、この有意な変化は観察されなかった。すなわち、非常に強力な磁界強度においては、細胞の応答が観察されたが、その十分の一程度の強度では、この反応が起こらないことが明らかとなった。これらの結果は、日常生活や職場環境レベルの磁界では、今回の実験に用いた小脳顆粒細胞の細胞内情報伝達機構の一部であるチロシンキナーゼのリン酸反応に影響を与えることはない<sup>42)</sup>と推定される。

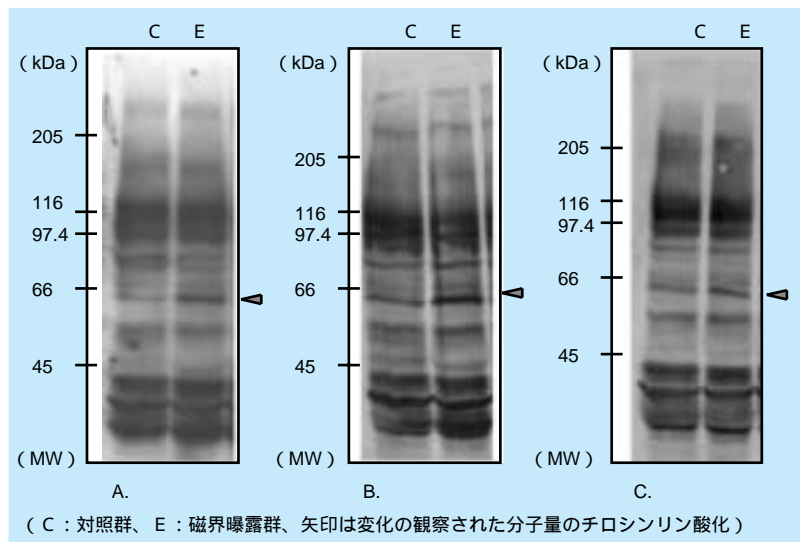


図2-3-6 14mT、60分磁界曝露後のチロシンリン酸化のX線フィルム画像

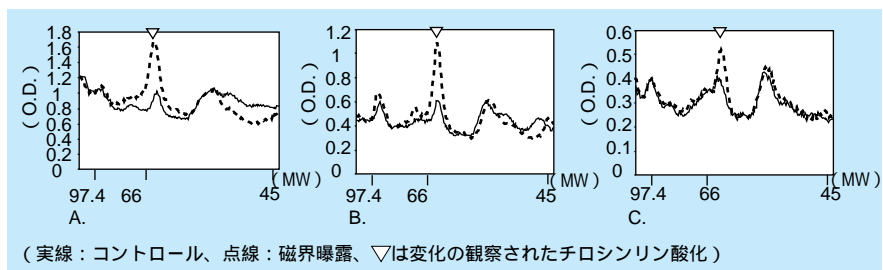


図2-3-7 X線フィルム画像のデンストメーターでの解析

## 2 - 4 微生物における遺伝子発現への影響

前節の実験結果は、通常の生活・職場環境の極低周波磁界が、細胞膜機能の一つである細胞内のカルシウムイオン濃度や細胞膜から細胞核への情報伝達機構のチロシンキナゼのリン酸化反応に影響を与えそうもないことを示したが、通常環境の数千倍から数万倍の強い磁界を曝露すると、後者の反応が増大することなどが分かった。

そこで、本節ではモデル生物である大腸菌あるいは酵母といった微生物を用いて、細胞内情報伝達機構の下流に位置する、ストレス応答遺伝子を含む広範な遺伝子の発現について検討した。

### 2-4-1 大腸菌の熱刺激タンパク質の発現

大腸菌に外部刺激として熱を与えると、環境温度の上昇に対応すべく、その細胞は特定のタンパク質を産生することが良く知られている。また、このタンパク質は他の様々な外部刺激に対しても産生されることが知られている。もし、外部からの強力な磁界が大腸菌にストレスを与えるのであれば、磁界の曝露によって、この種のタンパク質を産生することが想定される。そこで、細胞実験用磁界発生装置の磁界曝露空間に、今回特に試作した大腸菌用培養器を設置し、大腸菌を培養しつつ、磁界を曝露した。同時に、別に準備した磁界を発生させない細胞実験用磁界発生装置を用いて、対照データを確保すると共に、培養温度を30 から50 に上昇させて陽性対照とした。さらに、培養条件として、通気なし16時間と通気下6.5時間の2種類で実験を行った。それぞれの

条件で培養した大腸菌は、所定時間後に回収して、2次元電気泳動法で、タンパク質発現パターンおよび発現量を測定した。この方法は、既知のタンパク質のみでなく、未知のタンパク質でも検出が可能である。すなわち、磁界に対して未知のタンパク質が産生された場合でも、生体影響を検出することが出来るという利点がある。

図2-4-1は、30、磁界なしの培養条件、すなわち対照条件、30、14 mT円磁界の曝露条件及び50、磁界なしの条件すなわち熱刺激陽性対照条件での発現タンパク質に関する2次元電気泳動法による出力データの例である。この図は、横軸を等電点、縦軸を分子量とし、黒い斑点の部分は、その等電点と分子量を有するタンパク質が多く発現していることを示す。この例からも明らかのように、50の熱刺激を与えて培養した場合、対照培養である30での培養の時に比べて、多くのタンパク質が増加したり、減少していた。それに対して、14 mTの磁界を曝露しつつ培養しても、対照培養の時とほとんど差はなく、どのタンパク質をとってみても、その増減に統計的な有意差はなかった。つまり、最も単純なモデルとしての大腸菌は、強力な磁界でも、それをストレスと受け止めていないことが分かった<sup>(13)</sup>。

### 2-4-2 真核細胞の共通遺伝子

本項ではヒトと同類の真核細胞で、多くの共通の遺伝子を持ち、かつ、全ての遺伝子配列が明確になっている酵母細胞を用いた。酵母を培養しつつ、50Hz、10 mT

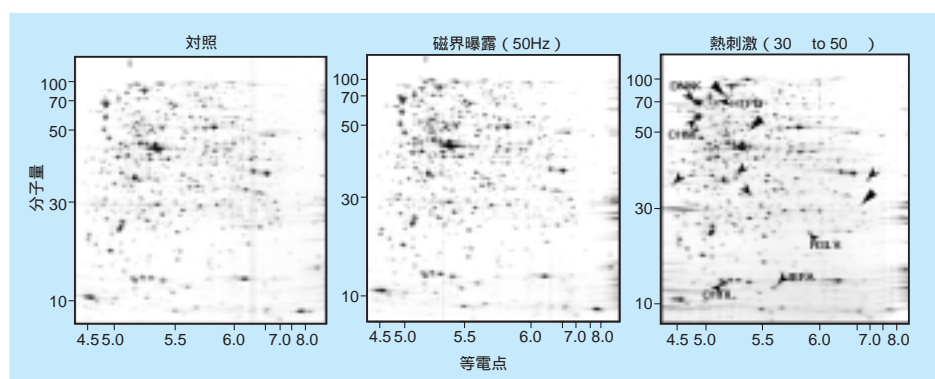


図2-4-1 大腸菌のタンパク質発現特性の例

～300mTという強力な磁界を曝露し、タンパク質のみならず、ほぼ全ての遺伝子への影響を検討した。

通気なしの通常培養を対照条件とし、陽性対照として通気培養での実験も同時に行った。それぞれの条件での培養の後、2次元電気泳動法により、約1000種類のタンパク質（全タンパクの約1/6）の発現パターンを図2-4-2に示す。同図中の矢印は、画像分析の結果、対照に比べて有意に増減したタンパク質を示している。一方、磁界を曝露した群では、そのようなタンパク質の発現変化は確認できなかった。また、DNAマイクロアレイ法により、約5900種類の遺伝子（全遺伝子の約95%）のmRNA合成パターンを分析した。その結果を図2-4-3に示す。同図において、一つ一つのスポットが遺伝子を

示し、赤いスポットは、左の条件に対して、右の条件で合成量が減少したものの、緑色は増加したものの、黄色は変化が無かったものを示す。これらの図から、対照に対して、熱刺激や好気条件の陽性対照では、多くのmRNAの合成量に変化があったのに対して、磁界を曝露したのものには、それらの変化が見られなかった。つまり、ヒトの細胞に近い、真核細胞である酵母細胞は50 Hz、300mTという強力な磁界環境下でも、そのタンパク質発現や遺伝子発現に影響を受けないことが分かった。

以上の結果、通常的生活、職場環境における磁界に比べ強力な10～300mT程度の磁界においても、細胞が直接磁界の影響を受けて、遺伝子の発現に変化が生じることはないものと推定された<sup>1)</sup>。

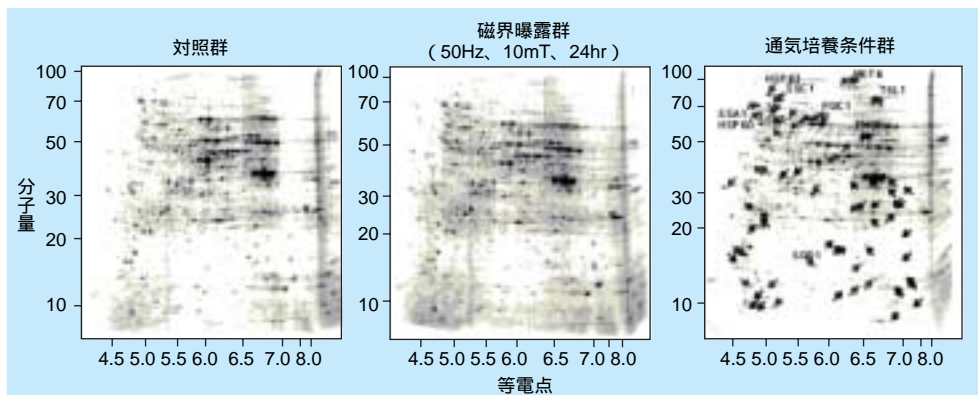


図2-4-2 酵母細胞のタンパク質合成パターン

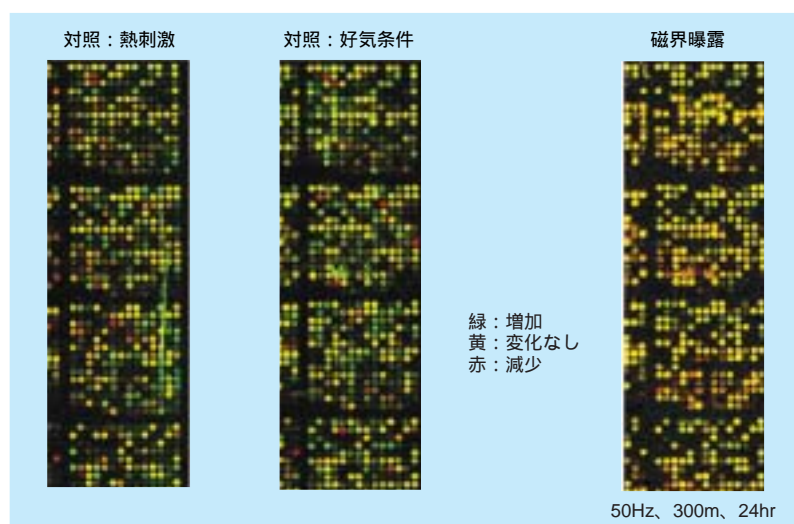


図2-4-3 酵母細胞のmRNA合成パターン

## 2 - 5 遺伝子変異への影響

遺伝子の損傷に与える影響は、発がん過程において最も重要なステップであるが、極低周波磁界は、そのエネルギー - があまりにも小さいため、遺伝子の変異原性、つまり遺伝子を直接傷つける作用はないものとされていた。しかし、特定の処理を施したヒト由来のメラノ - マ細胞に60Hz、400mTという極めて強力な磁界を曝露すると、この変異原性を示すことが報告されたり<sup>86)</sup>、大腸菌に5 Tの定常磁界を曝露すると、化学物質などの変異原に対する感受性が増加する助変異原性を示す<sup>87)</sup>ことなども報告されている。このため、当所ではサルモネラ菌及び大腸菌を用いて、この変異原性を生じる可能性及びラジカルなど変異原物質に対する助変異原性に関する実験を行った。

まず、変異原性の実験では、増殖に必要なアミノ酸を合成するための遺伝子が欠損しているサルモネラ菌と大腸菌を用い、14mTの円磁界を曝露することにより、増殖を始めてしまう、つまり復帰変異に変化が生じるかを確認した。

表2-5-1は、その実験結果の一覧表で、この表から明らかのように、3～4回繰り返し実験を行ったが、変異原性を全く観察することができなかった。さらに、ラジカルなどの遺伝子(DNA)との反応性に磁界が影響することが報告されている様々な化学変異原に対する助変異原性を検討した。

表2-5-1 変異原性の実験結果

サルモネラ菌

菌株	TA1535	TA1537	TA98	TA199
復帰変異	0/3	0/3	0/4	0/4

大腸菌

菌株	WP2uvrA	WP2uvrA/pkM101
復帰変異	0/4	0/4

注) 復帰変異: 変異原性に有意な差のあった回数/実験数

その結果は、表2-5-2に示す通りで、中には有意な差を生じた場合もあるが、いずれも一貫した有意差を生じることがなかった。

以上の結果、懸念されている化学物質の発ガン作用を増加させるような作用が、通常環境に比べ極めて強い磁界においても見られないことが分かった<sup>88)9)</sup>。

表2-5-2 助変異原性の実験結果

	サルモネラ菌		大腸菌		
	TA98	TA100	WP2uvrA	WP2uvrA/Pkm101	
DNA反応性変異原	ENNG	0/4	0/4	0/4	0/4
	AF-2	0/4	1/4	0/4	0/4
	4-NQO	1/4	0/4	0/4	0/4
代謝活性化されるDNA反応性変異原	2AA	1/4	1/4	0/4	0/4
	AC		0/4	1/4	2/4
フレームシフト型変異原	AO	1/4	1/4	1/4	1/7
ラジカル型変異原	CH	0/4	0/4	1/4	1/4
	BH	0/4	0/4	2/4	0/4

注) 有意な差があった回数/実験回数

## 2 - 6 免疫系への影響

免疫系は、生体内への異物の進入の阻止や進入した異物を処理して生体の恒常性を維持する生体防御系に含まれ、リンパ球やマクロファージなどの免疫担当細胞による抗原抗体反応、免疫情報伝達物質の産生や分泌、異物の貪食などの機能が重要な役割を担っている<sup>90)</sup>。

本節では、免疫系に対する磁界の影響を細胞・動物レベルで明らかにするため、これら産生・分泌・貪食機能に着目し、正常な免疫機能が磁界曝露により変化するかどうかを検討した。実験では、予め培養液中や動物体内の

免疫担当細胞を刺激し活性化させて応答性を高めた上で、それらの免疫機能に与える磁界影響の有無を検討した。

### 2-6-1 マクロファージの機能への影響

マクロファージは、生体内に侵入した微生物に対し免疫情報伝達物質を産生する分泌能や異物を取り込んで処理する貪食能等の役割を担い、様々な生物に共通した免疫担当細胞である。マクロファージの機能のうち、分泌

能と貪食能が磁界曝露により変化するか否かを調べた。

実験は、特定病原菌のいないマウスの腹腔から採取したマクロファージに、50Hz磁界を曝露した。無曝露条件の対照群を同時に実験し、盲検法により実験者の先入観を避けると共に、同一実験を最低3回繰り返してデータの再現性を確認した。結果は群間で統計学的に比較し有意差の有無を調べた。分泌能は、情報伝達物質として重要な一酸化窒素(NO)とサイトカイン(TNF- $\alpha$ 、IL-1 $\beta$ 、IL-6)産生量を指標とし、分泌能を働かせる刺激物質を添加した条件下で、細胞を14mTrms回転円磁界に24時間曝露後、培養液中に分泌された各物質を測定した(図2-6-1)。その結果、再現性のある変化はみられなかった<sup>(2)</sup>。マクロファージのNO、サイトカイン分泌能は磁界の影響がないとする報告が殆どであり<sup>(2)</sup>、本研究はこれらの報告をさらに裏付ける結果であった。

貪食能は、異物を模擬したビーズと共に細胞を培養しながら1.4~14mTrms回転円および1~10mTrms垂直磁界に1、2時間曝露し、細胞に貪食されたビーズ数を測定した(図2-6-2)。一部に有意差がみられたが、変化の増減は一貫せず再現性のある変化はなかった<sup>(3)</sup>。これまで報告された貪食能の研究では磁界影響の有無が混在している<sup>(4)</sup>。本実験ではそれらも考慮した上で実験条件を設定し定量性の高い計測手法を用いて解析・評価したが、磁界特性、強度や曝露時間に依存した反応はみられなかった。

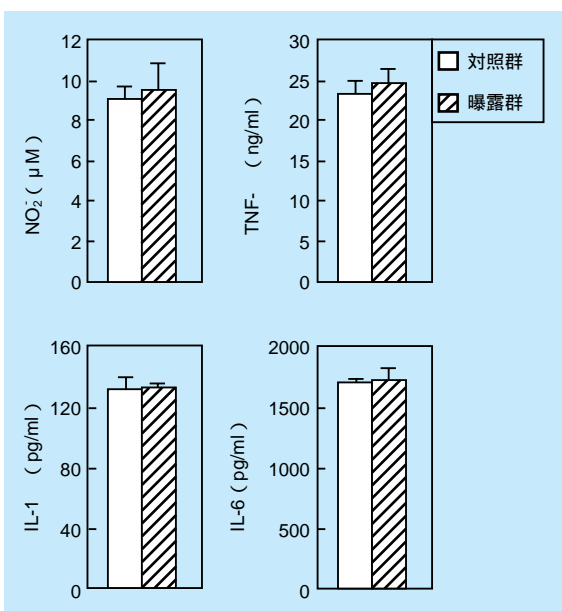


図2-6-1 分泌能の結果例

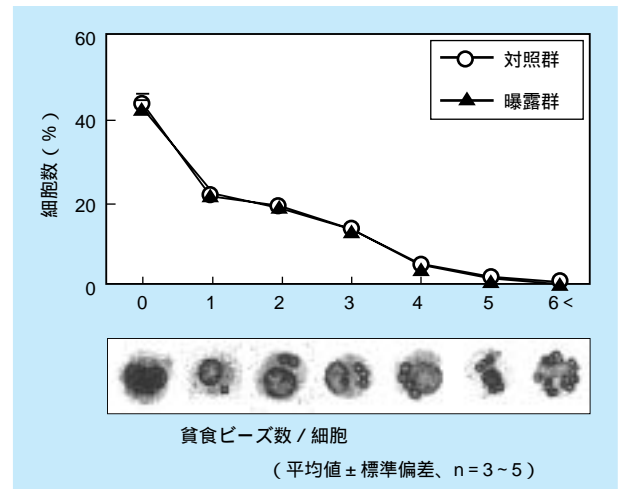


図2-6-2 貪食能の結果例(14mTrms、1時間曝露)

以上の結果から、商用周波磁界曝露はマクロファージの機能に影響しないことが示唆された。

## 2-6-2 免疫物質(サイトカイン)の産生量への影響

免疫系の作用は、T・Bリンパ球、マクロファージなどの免疫細胞とそれらの細胞から産生される細胞どうしの免疫情報を伝えるサイトカインの働きにより調節されている。細胞や動物を用いた磁界曝露実験ではサイトカイン分泌量への影響を示唆する研究があるため、2種類の免疫刺激により産生されるサイトカイン量に磁界の影響があるか否かを検討した。

初めに、正常動物を免疫学的に刺激した実験では、SPFの2系統の雄性マウス(C57BL/6とddY)に、50Hz、最大350 $\mu$ Trmsの回転円もしくは水平磁界を、最長12週間連続曝露した。曝露終了直後に、Tリンパ球のみを刺激する抗体(anti-CD3 mAb)、もしくはBリンパ球、マクロファージを刺激する大腸菌由来の毒素(LPS)を静脈に投与した。各サイトカインごとにその産生量が最大になる一定時間後にそのマウスから血清と脾臓を採取して、Tリンパ球から産生された5種類のサイトカイン(IFN-、TNF-、IL-4、IL-6、IL-10) Bリンパ球、マクロファージからの5種類のサイトカイン(TNF-、IL-1-、IL-6、IL-10、IL-12)の量をELISA法で測定した。

磁界の曝露実験に先立ち、実験に使う動物の均一性と当所の4つの磁界曝露室(図2-6-3)における飼育環境

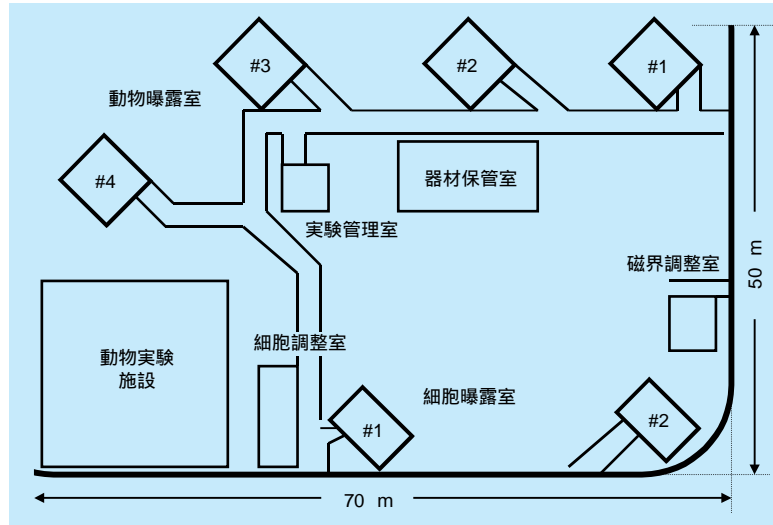


図2-6-3 研究設備の配置図

の均一性を確認するため、全ての曝露室の磁界を  $0 \mu\text{T}$  として1群12匹のマウスを6週間飼育し、血清と脾臓中のサイトカイン量を測定した。その結果、全ての群間で統計学的に有意な差はなく、群間で実験条件に差のないことが確認された。

上記を確認後、動物用磁界発生装置（図2-6-4）を用い、マウスにさまざまな磁界を曝露してサイトカイン産生を測定した。実験結果をまとめたものを表2-6-1に示した。一部の条件下では磁界による有意なサイトカイン産生の変化があったが、その変化は曝露強度や曝露期間とは無関係で、再実験では再現性がなかった。また、系統の異なるマウス間でも磁界に対する反応の差異はなかった<sup>(25)(26)</sup>。

サイトカイン産生と磁界の関係は、細胞曝露実験で Petrini ら<sup>(27)</sup>がヒト末梢血細胞における IFN- $\gamma$  や TNF-

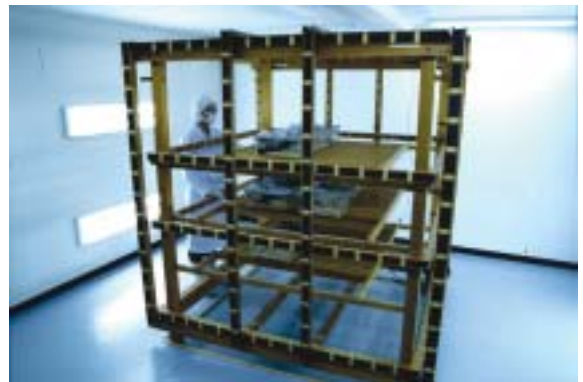


図2-6-4 動物用磁界発生用装置

表2-6-1 磁界に曝露した免疫刺激マウスのサイトカイン産出

刺激方法	抗CD3抗体投与			LPS投与			
	3週間	6週間		3週間	6週間	12週間	12週間曝露後、1週間休止
無曝露	-	変化なし		変化なし	変化なし	変化なし	変化なし
回転円磁界	1.4 $\mu\text{T}$	変化なし	変化なし	血清のIL-6に3回中1回のみ変化あり	変化なし	変化なし	脾臓のIL-1に3回中1回のみ変化あり
	70 $\mu\text{T}$	-	血清のTNF- $\alpha$ 、脾臓のIL-6に3回中1回のみ変化あり	変化なし	変化なし	脾臓のIL-12に3回中1回のみ変化あり	変化なし
	350 $\mu\text{T}$	変化なし	血清のIL-6に3回中1回のみ変化あり12週間曝露で変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし
水平磁界	250 $\mu\text{T}$	-	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし

注記：無曝露条件以外は各実験を3回繰り返し行った。  
- 印は実験をしていないことを示す。



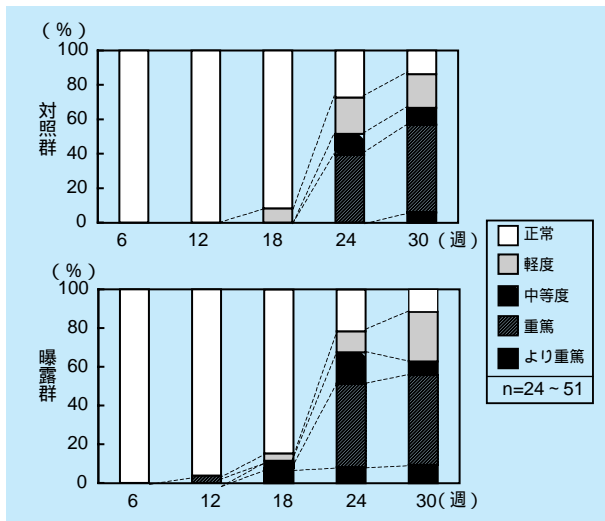


図2-6-5 50Hz、350 μ Trmsの回転磁界に6～30週間曝露したAKRマウスにおける白血病の発生と進行

の低下を、動物曝露実験ではBPAが送電線下で飼育したヒツジの血清IL-1の低下<sup>(2)</sup>を報告しているが、必ずしも一貫した結果とはなっていない。

次に、遺伝的に白血病になる性質を持ったマウス（AKR/Jマウス）に磁界を曝露することで、白血病の発病が促進されるか否かを検討した。実験は、5週齢の雌性AKR/Jマウスを、50 Hz、350 μ Tの回転円磁界に30週間曝露し、6、12、18、24、30週目で解剖して白血病の進行を病理組織学的に評価した。その結果を図2-6-5に示した。曝露群の方が若干進行は速かったが、両群間に統計学的に有意な差はなかった。また、同じ磁界条件下で行った別の24週間の実験ではむしろ曝露群の白血病進行が遅い傾向にあり、結果を総合すると本実験条件下では磁界曝露は白血病の発症・進行に影響を与えないことが示唆された<sup>(2)</sup>。当所以外でも白血病の動物実験は行われている<sup>(3)(31)</sup>が、ほとんどの実験で磁界の影響は認められていない。当所の実験では白血病に対抗する免疫系の機能として、臓器や血清中のサイトカイン量も同時に測定したが磁界による影響はなく、免疫機能にも影響がないことが示唆された<sup>(2)</sup>。

## 2-7 中枢神経系ホルモンへの影響

極低周波電磁界の中枢神経系ホルモンへの影響は、第1章で述べたように、本問題の発端が変電所従業員の不定愁訴という中枢神経系障害が、電界のためではないかとされたことに始まる。

当所における中枢神経系ホルモンに対する取り組みは早く、1980年代から米国エネルギー省との共同研究として、霊長類であるヒヒを用いた社会・学習行動及びメラトニン分泌への影響研究、北海道大学とのメラトニンに関する共同研究があり、さらに所内研究として、尿中の中枢神経系ホルモンを分析する手法の開発研究等を進めた。

### 2-7-1 米国エネルギー省との共同研究

ヒヒを用いた実験では、対照群、電磁界複合曝露群の各3頭の雄ヒヒに血液自動採取装置を装着し、電磁界曝露前、曝露中、曝露後のそれぞれ6週間にわたって、2時間毎に血液を採取し、血清中のメラトニン濃度の経時変化を測定した。電磁界の曝露は、変電所従業員の勤務

時間を考慮して、昼間のみの1日12時間とし、30 kV/m、100 μ Tおよび6kV/m、50 μ Tの2つのケースを採用した。

1日の時間変化として整理した測定結果の例を図2-7-1に示す。この図から明らかなように、ヒヒメラトニンの分泌量は、昼間に比べて夜間の方が多という概日リズムを有しているが、電磁界の曝露による影響はみられなかった<sup>(2)</sup>。

### 2-7-2 北海道大学との共同研究<sup>(33)-(42)</sup>

当所で開発した正方形多重コイル内で、Wistar-King雄性ラットに1～250 μ Tの回転円磁界、楕円、あるいは、垂直磁界を6週間磁界曝露した後、12時と24時に松果体及び血液を採取して、メラトニン濃度を測定した。一部の実験では、供試動物にLong Evans雄性ラットを用い、メラトニンの下位ホルモンであるテストステロン濃度も測定した。

回転円磁界を曝露した時の血漿中のメラトニン濃度の

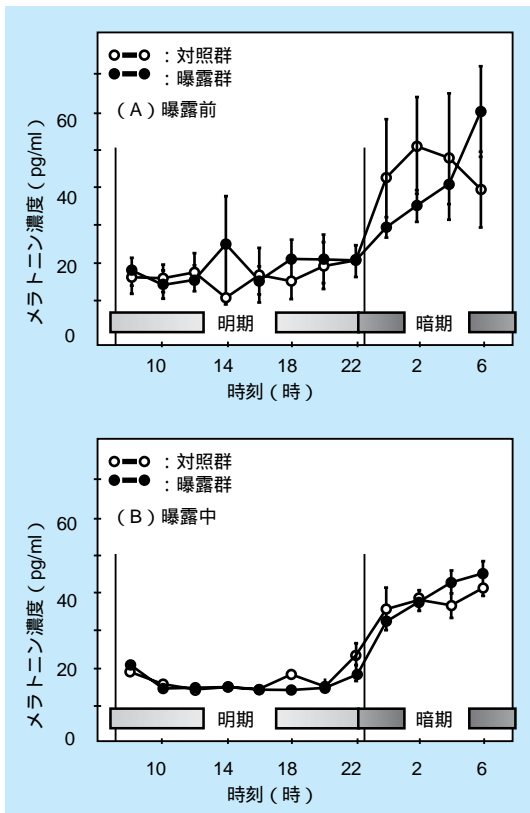


図2-7-1 ヒヒの血清中メラトニン濃度

例を図2-7-2に示す。この図から明らかなように、対照群に比べて、磁界曝露群のメラトニン濃度は昼夜ともに有意に減少した。しかし、楕円磁界や垂直磁界では、この抑制現象は観察されなかった。また、テストステロン濃度は、どの実験においても磁界の影響を受けなかった。

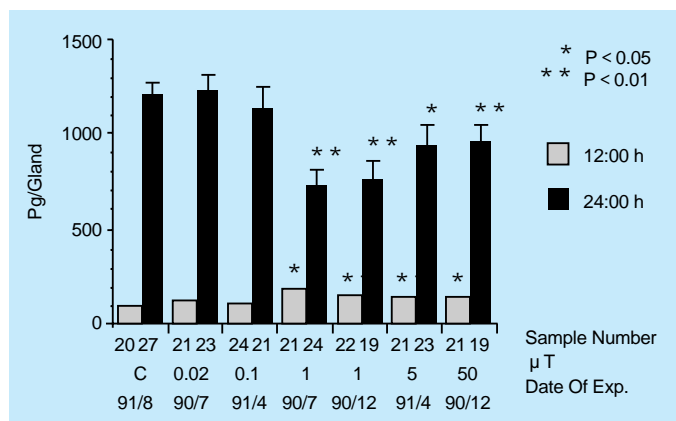


図2-7-2 回転円磁界曝露とラットのメラニン濃度

さらに、磁界曝露停止後のメラトニン分泌の回復期間を知るために、6週間回転円磁界を曝露した後、曝露停止後4週間にわたって深夜(24時)の血漿中メラトニン濃度を測定した結果、1週間以内に曝露前の状態に復帰することを確認した。

このメラトニンへの影響は回転円磁界固有の影響かどうか、さらに検討される必要があるものの、下位ホルモンであるテストステロンには影響がみられないことから、後述するような生殖障害や性ホルモンの影響を受ける腫瘍への関与を主張する仮説を支持するものではない。

### 2-7-3 所内研究の経緯

米国エネルギー省との共同研究では、大型実験動物であるヒヒから血液自動採取装置を用いて経時的データを確保したが、北大との共同研究では、実験動物が小型げっし類であることから、血液を定期的に採取し、同一個体での経時的変化を明らかにすることができなかった。

当所では、小型実験動物を用いた磁界曝露と中枢神経系ホルモン分泌との関連性についての研究結果が関連学協会で混乱している原因の一つが、個々の供試動物の経時的データが少ないことにもあり得ると考え、実験動物の自発運動の検出システムを開発した後<sup>43,44</sup>、尿自動採取装置を開発し、実験を行っている。

## 2 - 8 霊長類（ヒヒ）を用いた社会・学習行動<sup>(32)</sup>

当所と米国エネルギー省との共同研究では、霊長類であるヒヒを用いた社会・学習行動の実験を米国サウスウエスト研究所に委託して実施した。

本共同研究は、職業者の電界曝露による中枢神経系への影響検証を目的として実施されたため、前半は電界単独曝露実験、後半は電界と磁界を重畳した電磁界複合曝露実験が行われた。前節で紹介したメラトニン分泌に関する実験は、本共同研究の後半に行われたものである。

### 2-8-1 電界単独曝露実験

まず、65kV/mまでの電界を曝露しても、ヒヒは忌避あるいは回避行動を起こさないことを確認した後、6頭のヒヒに対して電界の感知実験を行った。その結果、電界の感知レベルは平均12kV/m(6~16kV/m)で、これはヒトやラットで得られている強度とほぼ同じであった。以上の実験の後、社会・学習行動に関する実験を実施した。

社会行動に関する実験は、雄性ヒヒ8頭を1群として、2群のグループに十分な馴化期間を置いて、グループの社会構造を安定化させ、その後一方は電界を曝露し、他方は電界を曝露せずに、両者の社会行動の変化を継続的に観察した。一例として、30kV/mの電界を曝露している時の受動的親和行動の実験結果を図2-8-1に示す。この図から明らかなように、電界を曝露した直後ののみ、

曝露群の受動的親和行動が多くなったが、その後の変化は認められなかった。以上の結果は、初めて電界を曝露されると、静電誘導による体毛の振動により、ムズムズ感を感じ、互いによりそってこれを緩和しようとする行動するが、しばらくすると順応してしまうことを示している。

学習実験では、6頭のヒヒを質問に対する正答を出すと餌がもらえることを事前に十分に理解させる訓練をした上で、3頭に電界を曝露し、残り3頭を対照群として実験を行った。その結果、曝露直後は質問に対する正答率は変化しないものの、社会行動の場合と同様に、質問に答えようとする行動が減少した。これは、社会行動と同様に、ムズムズ感の方に意識が集中したことによるものと思われる。

### 2-8-2 電磁界複合曝露実験

電力設備保守従業員は、電界のみならず磁界にも曝露されていることから、共同研究の後半は電磁界複合曝露の条件で実験を行った。

社会行動は電界単独曝露実験の時と同一の方法が取られたが、電磁界曝露直後および曝露期間中を通して電界の時のような一過性の行動変化は観察されなかった。また、学習行動に関しても電磁界の複合曝露の有害な影響は認められなかった(図2-8-2)。

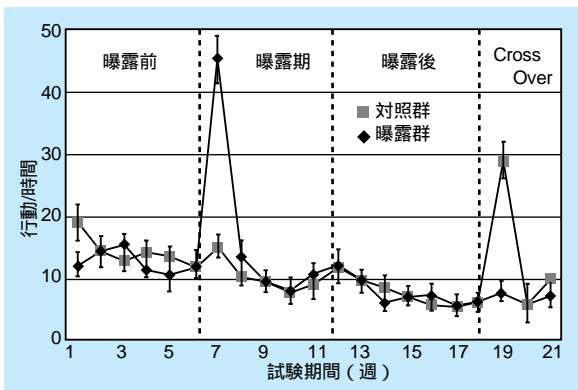


図2-8-1 受動的親和行動の経時変化

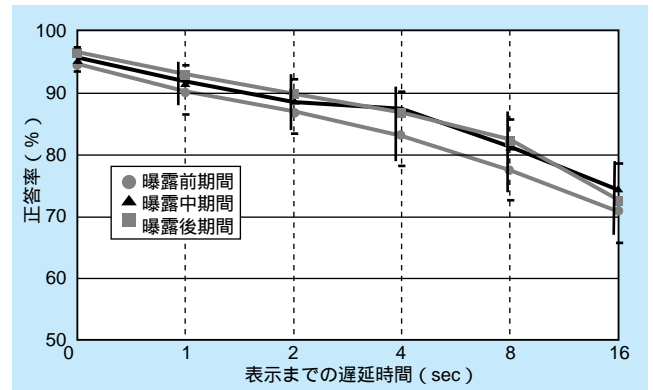


図2-8-2 短期記憶能力の実験結果

## 2 - 9 生殖機能への影響

生殖は動物が種を維持・繁殖させる上で最も基本的、かつ、重要な機能である。この生殖機能に対し、一部の疫学調査が影響を示唆していたことから、当所では早くから商用周波電界および磁界の生殖への影響を実験動物を用いて調べてきた。

最初に、商用周波電界の影響について調べた。卵子が受精し、母親の体内で盛んに細胞分裂をしている胚・胎児期間は、外部からの刺激の影響を生物学的に最も受けやすいため、妊娠したハムスターに商用周波電界を曝露して、妊娠動物及び胎児への影響に関する動物実験に取り組み、1980年代後半には、商用周波電界が、妊娠動物の生殖機能及び胚・胎児の発育・発達に影響を与えないことを確認した。

引き続き、免疫機能に及ぼす影響実験で使用した動物用磁界曝露設備を用いて、妊娠動物及びその胎児への磁界影響実験を実施した。受精したラット及びハムスター

を用い、様々な期間に0 (sham)、7、70、350  $\mu$ Tの回転磁界を曝露した。さらに、実施環境や実験動物の観察・検査内容、方法は、国の定める毒性試験法に関するガイドラインに準じて実施した。1群の動物数は25匹以上とし、胎児を摘出して、外表、臓器、骨格などを検査した。観察結果に研究者の主観が入ることを避けるため、各群の磁界曝露強度は研究者には伏せたままで実験を行い、データの再現性の確認のため、原則として、実験はそれぞれ2回以上繰り返して実施した。6年間にわたる実験結果は表2-9-1の通りであった。なお、ラットを用いての試験は資源エネルギー庁からの受託研究として実施したものである。

この表から分かるように、ハムスター及びラットに、妊娠前後の様々な期間に磁界を曝露しても、その胎児には全く影響がみられなかった。また、雄親および母動物の生殖機能にも磁界曝露の影響はみられなかった<sup>(6)-(7)</sup>。

表2-9-1 生殖に関する動物実験結果

供試動物	曝露時期	実施回数	磁界曝露の影響			
			雄親	雌親	胚・胎児の発育	胎児の器官形成
ハムスター	精子形成期～出産前日	3	なし	なし	なし	なし
ハムスター	器官形成期	2	-	なし	なし	なし
ラット	器官形成期	2	-	なし	なし	なし
ラット	着床前期	2	-	なし	なし	なし

- : 検査を実施せず

## 2 - 10 発がんに対する影響

がんに至る過程は複雑であるが、イニシエーション、プロモーション、プログレッションの3段階に整理されて論じられることが多い(発がんの多段階仮説)。イニシエーションとは、何らかの刺激により遺伝子が損傷を受け、細胞が潜在的にがん細胞化する過程をいう。プロモーションとは潜在的にがん化した細胞が増殖を始め、顕在化する過程をいう。プログレッションとは、がん細胞が浸潤・転移などの性質を示し、悪性化する過程をい

う。本節では、実験動物を用い、イニシエーションおよびプロモーションの両過程への影響を調べた発がん性試験、および、発がん物質によって誘発した乳腺腫瘍および発がん物質とプロモーターにより誘発した皮膚腫瘍に対するプロモーション作用に関する影響試験について述べる。なお、以下に記載の発がんに関する試験は、資源エネルギー庁からの受託研究として実施したものである。

がんに関する試験では、多数の動物を一度に試験出来

るように、生殖試験で用いたコイルと同機構で、容積で2倍以上の均一磁界が発生可能な4つの正方形多重コイルを同一建屋内（図2-10-1）に設置して実験を行った。また、生殖に関する試験と同様に、実験の実施環境は、国の定める毒性試験法に関するガイドラインに準じ、動物の観察、分析に当たっては、結果に研究者の主観が入らないよう、被実験動物個体と磁界曝露強度との関係は研究者には伏せたままで実施した。

### 2-10-1 乳がんを指標にした発がん性試験

極低周波磁界は、その量子としてのエネルギー - レベルがあまりにも低く、直接遺伝子（DNA）に作用して損傷を与えることはなく、従って、単独ではがんを引き起こさないというのが、関連学協会の共通した認識である。本節は、これを動物実験を通して検証した試験結果について取りまとめたものである。

試験では7週齢の雌ラットを用い、0（sham）、7、70、350  $\mu$  Tの円磁界曝露4群に加えて、発がん物質であるDMBAを90mg/kg投与した陽性対照群、無処置の陰性対照群の6群を準備し、磁界曝露群は8週齢から30週間にわたって、磁界を曝露した。各群は60匹とし、毎週触診により乳腺の結節（しこり）の発生状況を測定すると共に、曝露後に解剖検査を行った。

図2-10-2に、その結果を示す通り、発がん物質であるDMBAを投与した陽性対照群では、投与から6週目に最初の結節が観測され、30週経過すると、約98%のラットの乳腺にしこり、すなわち、乳腺腫瘍が観察され

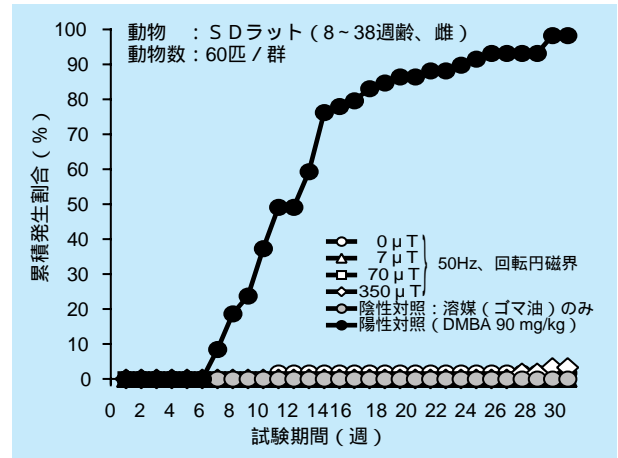


図2-10-2 発がん性試験結果

た。これに対して、磁界を曝露した群では、30週経っても通常の発生率に相当する5%未満であり、かつ、その頻度は曝露磁界の強さに依存していなかった<sup>(4)(8)</sup>。

商用周波磁界曝露による発がん性試験は、これまで米国毒性試験プログラム（NTP）<sup>(5)</sup>やわが国<sup>(5)</sup>においても行われており、我々の結果と同様に磁界の影響を全く観察していない。すなわち、極低周波磁界は実験動物であるラットにおいて、単独ではがんを引き起こさないものと推定される。

### 2-10-2 乳腺腫瘍に対するプロモ - タ - 効果検証試験

続いて、発がん性試験と同様に、雌ラットを用いて、乳腺腫瘍に関するプロモ - タ - 効果検証試験を実施した。イニシエーターとして発がん性試験の陽性対照群と同様

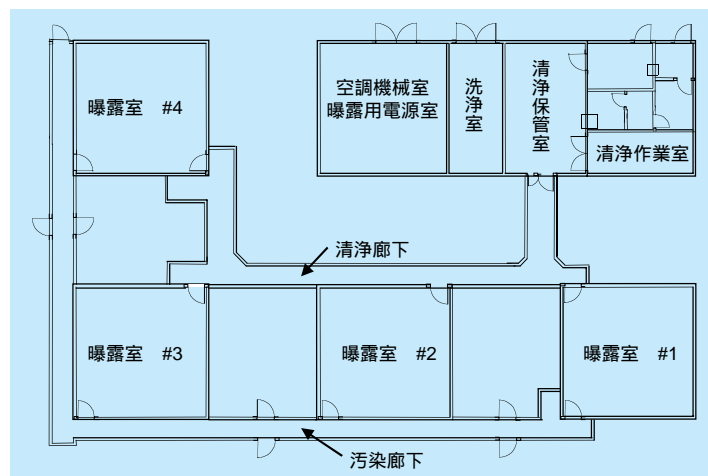


図2-10-1 動物用大型磁界発生コイルのレイアウト図

にDMBAを用いた。プロモ - タ - 効果の評価に適した用量として、最大反応を得る用量の約1/3の用量を採用した。磁界曝露群は0 (sham)、5、50、250  $\mu$ T 水平磁界の4群とし、磁界曝露前にDMBAを投与した。さらに、無処置の陰性対照群、磁界曝露群と同量のDMBAを投与の後、プロモ - タ - としてよく知られているコ - ノオイルを餌に混入して飼育した陽性対照群の合計6群 (各群60匹) を準備して、磁界曝露群には、所定の磁界を曝露しつつ、26週間にわたって、毎週結節の発生を観察した。そして、26週間後には、全例を解剖して、詳細な病理検査、組織学的検査を行った。

図2-10-3にDMBA投与時からの触診による乳腺部結節の累積発生割合の推移を示した。観察期間中、結節の発生に磁界曝露の影響はみられなかった。なお、本実験では、陽性対照物質であるコーン油投与の影響は明瞭でなかったため、図には含めていない。また、表2-10-1に病理組織学的検査結果を示した。観察された結節の90%以上は腺癌であり、これらの発生に磁界曝露の影響はみられなかった。また、少数の動物にみられたその他の腫瘍の発生率にも曝露磁界の強さに依存した変化は

みられず、他の臓器への転移等の悪性の兆候もみられなかった。

以上の結果から、極低周波磁界にはラットの乳腺腫瘍の発生・成長に対するプロモ - タ - 効果はないものと推定された<sup>(52)~(54)</sup>。

極低周波磁界が、腫瘍の発生・成長に対してプロモーター効果を持つのではないかと、という議論は、Löscherらが行った実験結果<sup>(55)</sup>に端を発している。この結果に関心を持ったBoormanらは、米国毒性試験プログラム(NTP)の一環として、これの再現性確認実験を行ったが、この効果を再現できなかったと報告している<sup>(56)</sup>。今回、我々の行った実験とあわせて、3ヶ所でほぼ同一の手法を用いて、DMBAをイニシエ - タ - として投与したラットに対する約半年間の極低周波磁界のプロモ - タ - 効果検索試験が行われたことになる。しかし、Löscherらが影響ありと示唆し、Boormanらと当所は影響なしとの結果を得ており、一致していない。このように結果が一致していないことに対する理由を断定する段階には至っていないが、今後、細かな実験条件の違いや、用いた動物の遺伝的背景の違いについて議論を進め、Löscherらの報告が再現性のある現象なのかどうかについて確認する必要がある。

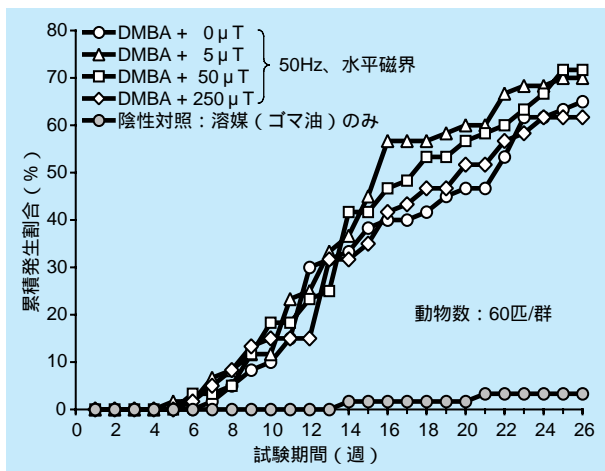


図2-10-3 乳腺腫瘍プロモーター作用検索試験結果

表2-10-1 乳腺の病理組織検査結果

群	0 $\mu$ T	5 $\mu$ T	50 $\mu$ T	250 $\mu$ T	陰性対照	陽性対照
動物数 (匹)	60	60	60	60	60	60
前腫瘍性病変 (%)	18	10	17	20	10	25
腫瘍性病変 (%)	68	65	72	58	5	58
腺腫 (%)	8	7	5	5	3	7
線維腺腫 (%)	5	15	3	12	0	10
腺癌 (%)	63	62	72	53	3	70

### 2-10-3 皮膚腫瘍に対するプロモ - タ - 効果検証試験

化学発がん物質による皮膚腫瘍の発生・成長に関し、特に感受性の高いマウスを用いて実験を行った。このモデルでは、発がん物質DMBAの1回の塗布だけでは皮膚腫瘍はほとんど生じない。その後、定期的にプロモーター作用を持つ物質を塗布することにより、皮膚腫瘍が発生する。プロモ - タ - 作用を持つ物質であるTPAの用量は、プロモ - タ - 効果の評価に適した用量として、最大反応を得る用量の1/2 ~ 1/3に相当する用量を採用した。実験では、6 ~ 7週齢の雌マウスの皮膚にDMBAを1回塗布し、翌週から既知のプロモーターであるTPAを週1回、25週間にわたり塗布した。磁界曝露群は0 (sham)、7、70、350  $\mu$ T 回転円磁界の4群とし、溶媒であるアセトンのみを塗布した溶媒対照群の合計5群 (各群100匹) を準備して、磁界曝露群には、所定の磁界を曝露しつつ、25週間にわたって、毎週結節

の発生を観察した。25週間後には、全例を解剖して、詳細な病理検査、組織学的検査を行った。

図2-10-4に皮膚結節（腫瘍）の累積発生割合の推移を示した。観察期間中、結節の発生に磁界曝露の影響はみられなかった。また、表2-10-2に皮膚の病理組織学的検査結果を示した。観察された結節の98%以上は良

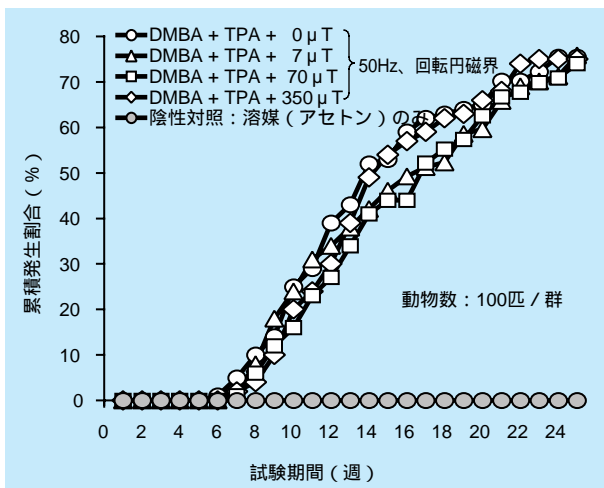


図2-10-4 皮膚腫瘍プロモーター作用検索試験結果

表2-10-2 皮膚の病理組織検査結果

群	0 μT	7 μT	70 μT	350 μT	陰性対照
動物数 (匹)	100	100	100	100	99
前腫瘍性病変 (%)	16	19	10	18	0
腫瘍性病変 (%)	68	72	71	67	0
乳頭腫 (%)	67	70	70	66	0
扁平上皮癌 (%)	3	4	2	3	0
角化棘細胞腫 (%)	2	1	3	0	0

性の乳頭腫であり、これらの発生・成長に磁界曝露の影響はみられず、これらが悪化する兆候もみられなかった<sup>(57)</sup>。

皮膚腫瘍の発生・成長に対する磁界曝露のプロモーター効果に関する影響については、これまでにスウェーデン<sup>(58)</sup>、カナダ<sup>(59)</sup>、米国<sup>(60)</sup>においても行われており、我々の結果と同様に、磁界の影響はないとしている。

以上の結果から、皮膚腫瘍の発生・成長に関しても、極低周波磁界にプロモーター効果がないことが明らかとなった。

## 2 - 11 まとめと今後の課題

これまで一部の疫学調査が示唆している健康影響に科学的根拠があるのであれば、実験動物に極低周波磁界を曝露することにより、それを示唆するような生物学的変化が観察されるはずであり、細胞・分子レベルあるいは生体防御、生体調節機能などの生理学的諸機能のどこかに、磁界が直接影響を与えるはずである、という研究仮説の基に、当所は、培養細胞や実験動物を用いた磁界曝露実験を実施してきた。本章で紹介した様々な生物学的研究で得られた結果を集約すると表2-11-1のようになる。

細胞・分子レベルの研究では、14mTという強力な磁界環境下で、細胞内情報伝達に関わっているチロシンキナーゼのリン酸化反応の増加が観測されたが、その十分の一の1.4mTでは、その現象は引き起こされず、その他の細胞内カルシウムイオン濃度や、大腸菌、酵母菌の遺伝子発現には磁界の影響を見出せなかった。

生体防御機能については免疫機能を対象として細胞レ

ベルあるいは動物曝露実験を実施したが、免疫機能発現の上流に位置するマクロファージの機能や、免疫担当細胞間での情報伝達に重要なサイトカインの産生量には時折り影響を示唆するようなデータもみられたが、繰り返した実験では再現されず、しかも、磁界の強さにも依存していなかった。また、中枢神経系ホルモンの分泌では、ラットを用いた実験で回転円磁界という特殊な磁界の曝露でメラトニンの分泌が抑制される現象が観察されたが、楕円磁界や直線磁界での変化は観察されず、性ホルモンの一つであるテストステロンの分泌にも影響は認められなかった。以上のように、様々な曝露実験を行っていたが、磁界の生物影響を説明できるような一貫性のあるデータは得られなかった。

また、霊長類であるヒヒを用いた社会・学習行動といった中枢神経系に関する研究、実証的研究として実施したラットなどのげっし類を用いた生殖、腫瘍に関する研究では、極低周波磁界がこれらの生体指標に影響を与え

表2-11-1 当所における商用周波磁界の生物影響研究結果のまとめ

研究分野	研究内容	対 象	供試材料	磁界強度、特性	結 果
細胞・分子レベル	情報伝達	細胞内カルシウムイオン濃度	ラット脾臓、胸腺細胞	0.1～5mT、垂直	影響なし
		チロシンキナーゼのリン酸化反応	小脳顆粒細胞	1.4、14mT、円	14mT増加 1.4mTなし
	遺伝子	熱刺激タンパク質発現	大腸菌	14mT、円	影響なし
		mRNA発現	酵 母	300mT、垂直	影響なし
		タンパク質発現			影響なし
		変異原性、助変異原性	大腸菌	14mT、円	影響なし
サルモネラ菌	影響なし				
生体防御・調節系レベル	免 疫	食食、分泌機能	マウスマクロファージ	1～14mT、円、垂直	影響なし
		サイトカイン	マウス	1～350μT、円、水平	影響なし
	内分泌	メラトニン	ラット	1～350μT、円、水平、楕円	円磁界でやや抑制 楕円、水平磁界で影響なし
			ヒビ	50～100μT、水平	影響なし
	テストステロン	ラット	1～350μT、水平	影響なし	
疫病/障害	中枢神経	社会・学習行動	ヒビ	50～100μT、水平	影響なし
	生 殖	妊娠障害、胎児奇形	ラット	7～350μT、円	影響なし
			ハムスター	7～350μT、円	影響なし
	腫 瘍	発がん性	ラット	7～350μT、円	影響なし
乳腺腫瘍促進		7～350μT、水平		影響なし	

るという何らの科学的証拠も得ることができなかった。これらの結果は、米国RAPID計画の中で実施された研究結果と同様であった。

しかし、学術的に全てが解明された訳ではなく、前述のように、生物学的には説明できない実験結果や、再現性は全くないものの、統計的に有意な差を示すデータも

混在する。これらを明らかにするため、学術的な研究により、より信頼性の高い知見を得る努力が必要である。

また、一部の疫学調査で示唆されている様々な種類の腫瘍（例えば、脳腫瘍、白血病）の促進効果に関しても動物実験を実施し、疫学調査結果と生物学的知見の乖離の解明が求められている。



第 3 章

3

電気工学研究

狛江研究所電気絶縁部 主任研究員 山崎 健一  
 狛江研究所電気絶縁部 主任研究員 河本 正  
 狛江研究所電気絶縁部長 上席研究員 藤波 秀雄  
 我孫子研究所生物科学部 上席研究員 重光 司

3 - 1 多機能型磁界測定器の開発 ..... 33  
 3 - 2 生体内誘導電流評価 ..... 34  
 3 - 3 生物実験用強磁界発生装置の開発 ..... 38



山崎 健一（1992年入所）  
 電磁界の生物影響研究の電気工学研究に従事している。これまでに、生体内誘導電流評価、多機能型磁界測定器の開発、生物実験用磁界曝露装置の開発、ならびに磁界低減手法の確立に携わった。



河本 正（1974年入所）  
 電力機器、送変電設備の電界・磁界解析に関する研究に従事している。電磁界の生物影響研究においては、生体内誘導電流および磁界低減方策の数値計算評価を担当してきた。



藤波 秀雄（1978年入所）  
 ガス絶縁機器の絶縁技術、送変電設備の電磁環境に関する研究に従事している。電磁界研究では、電力設備周辺磁界評価および低減方策、多機能型磁界測定器の開発、ならびに生物実験用磁界曝露装置の開発に取り組んだ。

重光 司（13ページに掲載）

## 3 - 1 多機能型磁界測定器の開発

### 3-1-1 はじめに

磁界の生物影響を解明する上で、工学研究は生物学的研究、疫学研究と密接なつながりをもっている。工学研究の果たす役割として、各種環境における磁界特性の評価、生体内誘導電流評価、生物実験用磁界曝露装置の設計などが挙げられ、当所の工学研究においては、これらの課題の研究を遂行し、前述の生物学的研究と併せて磁界の生物影響の総合的解明を目指した。本章では、磁界の生物影響研究における電気工学研究の概要を紹介する。また、本節では、電力設備周辺等、環境磁界の測定に用いられる多機能型磁界測定器の開発研究について述べる。なお、本研究で対象とした周波数領域は、商用周波数を中心とする極低周波領域（ELF：Extremely Low Frequency）である。

### 3-1-2 環境磁界の特徴

環境磁界の発生要因としては、送配電線や屋内配線に代表される電力設備からの商用周波磁界、家電機器や産業用電気機器の使用に伴う磁界、および電気鉄道等の輸送システムから生じる磁界、建築物の鉄筋の残留磁気、などが挙げられる。

電流の存在により周囲に磁界が生じ、磁界と電流との関係は、よく知られたビオ・サバルの法則により表される。磁界発生源の形態により、磁界強度は、発生源と磁界観測点との距離の1乗から3乗に逆比例して減衰する。電流路の形態が単線の直線電流の場合、周辺磁界の大きさは、電流の大きさに比例し、距離に逆比例する。また、3相電力線からの磁界は2乗～3乗に、電気製品からの磁界は3乗に逆比例することが知られている<sup>(1)(2)</sup>。

交流磁界の発生源が複数箇所ある場合、ある観測点における磁界は、各磁界発生源からの磁界の寄与のベクトル和となる。3相電力線のように、各発生源からの磁界成分の位相が異なる場合、観測点における磁界の直交3軸の各成分間には位相差が生じる。このとき、磁界ベクトル軌跡は、**図3-1-1**に示すように、ある平面上に存在

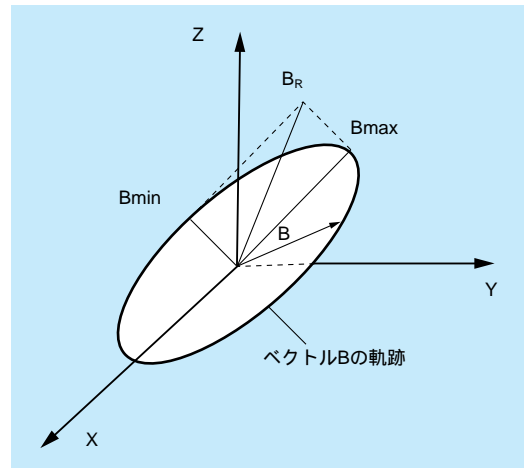


図3-1-1 3次元磁界ベクトルのパラメータの関係

し、単一周波数の場合、楕円状の軌跡を描く<sup>(3)</sup>。これを回転磁界と呼ぶことがある。

このような特徴を有する3相電力線周辺磁界を正確に記述するためには、楕円ベクトルに関連する各パラメータ、すなわち、合成磁界 $B_R$ 、楕円半長径の実効値 $B_{max}$ 、楕円半短径の実効値 $B_{min}$ 、および直交各軸の実効値 $B_x$ 、 $B_y$ 、 $B_z$ などを知る必要がある。

### 3-1-3 多機能型磁界測定器の開発<sup>(4)</sup>

先に、3相電力線周辺磁界を正確に記述するためのパラメータについて述べた。これらのパラメータを知るために、磁界測定器には、これらのパラメータを測定可能であることが要求される。しかしながら、各パラメータを簡便に測定可能な測定器はなかったことから、本研究では、新たに多機能型磁界測定器として開発を行うことにした。

磁界測定センサ方式として、誘導コイル（サーチコイル）方式、ホール素子方式、フラックスゲート方式、磁気抵抗方式、磁気発振方式、磁気共鳴方式、量子干渉素子（SQUID）方式などがあるが、回路が簡素で小型化できることから、ここでは誘導コイル方式を用いることとした。

誘導コイル方式は、電磁誘導作用により誘導コイル（サーチコイル）に鎖交する磁束の大きさの時間変化に

対応した誘起電圧を測定するもので、周波数、コイルの巻数、磁束密度のコイル面に垂直な成分、およびコイルの面積にそれぞれ比例した出力が誘導電圧として得られる。微小な環境磁界の測定に十分な感度を得るために、巻数を増やし、強磁性体である鉄をコイルの心に用いた。また、出力は周波数に比例するため、積分器を用いてフラットな周波数特性となるように信号処理をしている。

センサコイルは直交3軸方式を採用し、演算によりBmaxおよびBminを測定可能とした。開発した測定器の外観を図3-1-2に、仕様を表3-1-1に示す。本測定器



図3-1-2 開発した多機能型磁界計の外観

により、合成磁界の実効値  $B_R$ 、各軸成分およびBmax、Bminなど図3-1-1に示した3次元磁界ベクトルを記述するためのパラメータが測定可能であり、楕円磁界の形状を知ることができる。なお、周波数帯域は、商用周波数のみの狭帯域を基本とし、10kHzまでの広帯域モードも機能に追加している。

表3-1-1 開発した多機能型磁界計の仕様

センサ部	3軸直交コイル内蔵（鉄心）
測定強度	0.01 $\mu$ T (0.1mG) ~ 2 mT (20G) (自動レンジ切替)
分解能	最小レンジで0.01 $\mu$ T (0.1mG)
周波数（選択）	1) 商用周波狭帯域 (50 Hzまたは60 Hzを選択可能) 2) 広帯域 (10Hz ~ 1 kHz)
測定パラメータ	各種実効値 周波数 (Z軸) 軸間相差 (Z軸-X軸、Z軸-Y軸)
演算パラメータ	Bmax, Bmin (狭帯域時のみ) $B_R$ (Resultant磁界)
表示パラメータ	1) Bx, By, Bz 2) $B_R$ , Bmax, Bmin (Bmax, Bminは狭帯域時のみ)
電源	006P9V電池 1個 バッテリー残量表示付
サイズ	200mm * 80mm * 55mm
重量	750g (電池含む)

## 3 - 2 生体内誘導電流評価

### 3-2-1 研究の経緯

低周波電磁界の生体作用を明らかにする研究においては、生物試料を用いて直接的に影響の有無を調べる際に、電磁界の物理的性質のうち、何が指標となり、生体のどの部位あるいは機能に作用するかということに着目する必要がある。また、各機関で行われる生物実験結果の比較や解釈の際、作用量（ドーズ）としての磁界暴露条件が十分に明確化されることが求められる。このため、電磁界の大きさや特性および2次的に体内に誘導される電界・電流の特性を正確に把握することの重要性が認識されている。

現在考え得る磁界の生体作用メカニズムとしては、磁界が直接生体に作用するとする考え方よりも、2次的に生体中に誘導される電流の効果によるものとする仮説が多く受け入れられており、各機関によって暫定的に定められているガイドライン等<sup>5)</sup>においても、外部磁界の生体影響の指標として体内誘導電流が用いられている。すなわち、生体中の情報伝達に電気が用いられているため、誘導電流密度が10mA/m<sup>2</sup>を超えると情報伝達に何らかの影響を与えるとするもので、許容磁界の基準値を決定する際にこの誘導電流密度から安全率を見込んで外部磁界が算出される。この際の人体の模擬としては、単純な単一媒質モデルが想定されることが多いが、実際の人体内部は臓器や組織ごとに導電率が異なり、電流分布もそ

これらの影響を受け、複雑なものとなっていることが予想される。

このように、人体中の誘導電流分布を正確に把握することが強く求められているものの、これを生体中で計測することは現状では不可能なため、多くは数値計算に頼っている状況である。これまでに、インピーダンス法<sup>(6)</sup>境界要素法<sup>(7)</sup>、有限差分法<sup>(8)</sup>、TRIFOUコード（有限要素法+境界要素法）<sup>(9)</sup>などの数値計算手法を人体モデルに適用した多くの論文が発表されており、生体内の誘導電流分布の計算結果が示されてきた。これらの数値計算における問題点は、人体のモデル化についての妥当性であり、計算結果の実証ができないことに由来する。ラットなど動物に対して微小プローブを用いて誘導電流の実測を行っている Miller らの研究<sup>(10)</sup>もあるが、数値計算との対比はなされていない。数値計算における人体モデルのうち、解剖学的な3次元形状についてはMRI画像に基づく数値データなど確かなものも用いられているものの、最も重要と考えられる各臓器、組織の電気的性質すなわち導電率については、論文ごとに大きな差異が見受けられ、人体のモデリングにおける根本的な問題が解決していない。なお、Gabrielらにより統一的な手法により各臓器の導電率の実測を行った論文が発表されているが<sup>(11)</sup>、低周波領域においては、誤差が大きいことが指摘されている。

当所の研究においては、はじめに微小プローブを用いて、2媒質モデル中の誘導電流分布の把握を行い、また同モデルに対する電荷重畳法の適用による数値計算手法の開発などを行い、生体内誘導電流評価のための測定・数値計算手法を整備するとともに、単純な多媒質系での誘導電流特性を明らかにした<sup>(12)</sup>。次のターゲットとして人体全体に対する誘導電流分布を明らかにすることを目標とし、多媒質系における誘導電流分布の基本的な特徴を把握するための検討を行なった。以下にその内容について述べる。検討事項は以下の通りである。

- 1) 数値計算手法の開発（3次元表面電荷法）
- 2) 回転対称形状により模擬した人体モデル構築
- 3) 人体内誘導電流分布評価

### 3-2-2 数値計算手法

当所の研究では、磁界による誘導電流の計算に、表面

電荷法<sup>(13)</sup>を適用した。これに基づき、新たに三角形表面電荷法による3次元誘導電流計算コードを開発し<sup>(14)</sup>、これを人体モデルへ適用することにした。電荷重畳法や表面電荷法による計算手法は、境界分割型の計算手法であり、各臓器などの人体構成要素の表面のみを模擬すればよく、人体内全体を3次元要素により分割する必要がある領域分割型の計算手法である有限要素法と比較して、入力データ数が少なく、入力データの作成が容易である。また、構成要素の位置の移動や大きさを変化させて計算することも容易である。一方、曲面を三角形要素で模擬するため、表面近傍では誤差が大きくなることに注意が必要となる。

本数値計算手法による誘導電流計算において基礎となる方程式は、マクスウェルの方程式および構成方程式より導かれる電界の式であり、これに媒質間の境界条件を与えて解く<sup>(15)</sup>。表面電荷法では、電気スカラーポテンシャルとその勾配を表面電荷による作用として表わし、表面電荷の電荷量を未知数として計算する。今回開発した計算コードにおいては、電界も同時に存在する場に対しても適用可能である。

### 3-2-3 人体モデルの構築

人体内部のような多媒質系における誘導電流分布の基本的な特徴を把握するために、表面電荷法の適用に適した形状である回転対称形の要素の組み合わせによる人体モデルを構築した。模擬した臓器は、脳、心臓、肺、肝臓、腸の5臓器であり、それぞれ回転楕円体で模擬した。また頭部は球、胴体は回転楕円体で模擬した。肺については、実際は心臓を取り囲むように配置されているが、今回は心臓の両側に独立して存在するものとして模擬した。また、身長は1.7mとし、両腕は省略し、脚部は1本の円筒により模擬した。胴体の腹まわりの外径は270mmとした。すなわち胴体部に仮定できる最大の円ループは半径135mmのループである。構築したモデルと各臓器の形状とメッシュ形状を図3-2-1に示す。人体モデル全体の節点数は2265個、三角形要素数は4400個、未知数の数は2265個である。計算位置としては、磁界方向と直交する指定断面全体において、10mm間隔で計算点を設けた。

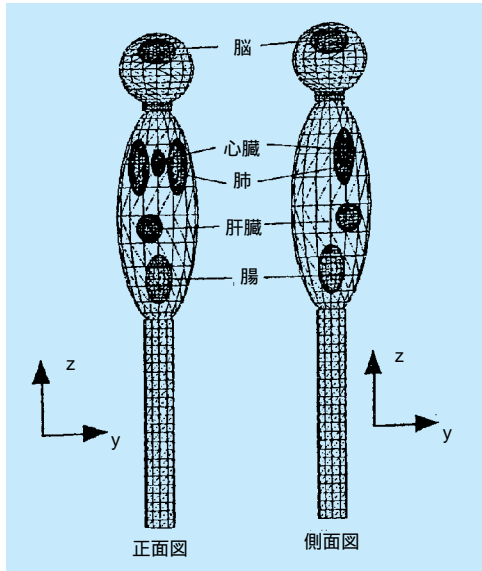


図3-2-1 人体モデルの形状

### 3-2-4 人体モデル内誘導電流評価

先に述べたように、生体各部位の導電率の値については種々の出典が混在しているため、誘導電流分布に対して大きな影響を与えることが予想され、本研究では人体モデル内誘導電流の評価として、導電率の違いが誘導電流分布に与える影響に着目した検討を行なった。

人体モデルの各部位に与える導電率の値として、代表的な3つの文献<sup>(6)~(8)</sup>において用いられている生体各部位の導電率の値を用いて比較を行うことにした。これらの導電率の値を表3-2-1に示す。比較のために一様媒質モデルとして、人体全体に同一の導電率0.2S/mを与えた。次に、モデルAとしては、文献<sup>(7)</sup>に用いられている値を基本的に用いた。この値は、文献<sup>(9)</sup>で用いられている値とほぼ同一である。これらの文献では、臓器部分以外の導電率として0.1S/mが用いられているが、この値は肺と肝臓の導電率と同一であり、見かけ上臓器が存在しな

表3-2-1 計算に用いた人体各部位の導電率

単位：S/m

	一様媒質	モデルA	モデルB	モデルC
脳	0.2	0.75	0.06	0.10
心臓	0.2	0.70	0.10	0.11
肺	0.2	0.10	0.08	0.04
肝臓	0.2	0.10	0.07	0.13
腸	0.2	0.03	0.50	0.11
他部位	0.2	0.11	0.35 (筋肉)	0.52 (筋肉)

いことになるため、ここでは臓器部分以外の導電率を0.11S/mに変更して用いた。モデルBは、Dawson・Stuchlyらの後期の文献<sup>(8)</sup>で用いられている値であり、Gabrielらの測定結果を一部引用したものである。モデルCは、ユタ大学のデータに基づくもので、文献<sup>(6)</sup>において用いられているものである。引用する導電率のデータの違いによって、生体各部位の導電率の値は大きく異なっており、特にモデルAと他の2つ(モデルB,C)との差が際立っている。

磁界条件および評価項目は以下の通りである。まず、磁界条件として、図3-2-1に示した直交3軸を定義し(X軸：人体の正面 - うしろ方向、Y軸：人体の側面 - 側面方向、Z軸：人体の直立方向)、それぞれの軸方向の一樣磁界を別々に考えた。すべて磁束密度は1 $\mu$ T(実効値)とし、周波数は50Hzとした。

はじめに、人体全体の誘導電界・電流分布を把握するために、磁界方向に直交する断面における誘導電界分布を求めた。次に各臓器に着目し、モデルの違いに対する誘導電流の大きさの比較を行った。

人体全体の誘導電界・電流分布の計算結果の一例を図3-2-2に示す。これは、磁界方向がY軸方向の時、これに直交する人体断面における人体全体の誘導電界分布を等高線(等電界位置を結んだもの)により3軸方向の磁界に対して示すものであり、4種類のモデルについて比較している。断面の位置は人体の中心断面(Y=0面)とした。計算位置の断面には心臓が存在するため、この周囲の電界分布が乱れているのが特徴である。

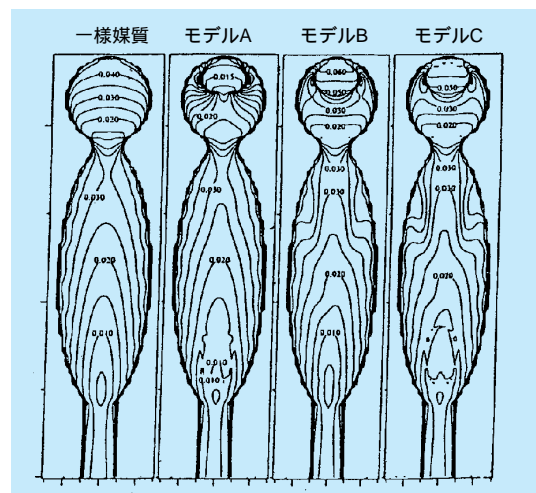


図3-2-2 磁界の直交する断面における誘導電界分布の例

もう一例の図3-2-3は、Z方向磁界に対し、モデルAの心臓中心断面（Z=1250mm）における誘導電界ベクトルの分布を示したものである。誘導電流ベクトルはこれらの電界ベクトルに導電率を乗じたものとなり、ベクトルの方向は同じである。このケースでは、心臓へ集中する成分が示されており、すなわち臓器の膜にぶつかる誘導電流成分があり、今回模擬していない膜の電気的特性によっては、分布に大きな変化が生じる可能性を示唆するものである。

次に、各臓器の誘導電流の大きさに着目した検討を行った。磁界方向はこれまでの検討と同じように3軸方向をそれぞれ独立に考えた。対象とする臓器は、人体モデルにおいて考慮した、脳、心臓、肺、肝臓、腸の5臓器である。検討する臓器モデルとして、3章において構築したモデルに、一様媒質モデル、モデルA、モデルB、モデルCの4通りの導電率を与えたものに加えて、IEC文書に示されている誘導電流計算結果との比較も検討に加えた。同文書においては、外部磁界として1.26  $\mu$ T、50Hzを用い、人体を一様媒質（0.1S/m）で模擬した場合と、各臓器（12臓器）に異なる導電率を与えた場合について検討が行われているが、ここでは比較の条件を同じにするため、一様媒質の導電率を0.2S/mに変更し、外部磁界の条件を1  $\mu$ Tに変更して、誘導電流計算結果を換算した。各臓器の回転楕円体中心の楕円断面における各軸上の平均値の比較を図3-2-4に示す。脳や心臓のように、モデルに与える導電率の値が大きく異なる臓器において、誘導電流分布のばらつきが大きくなっている。

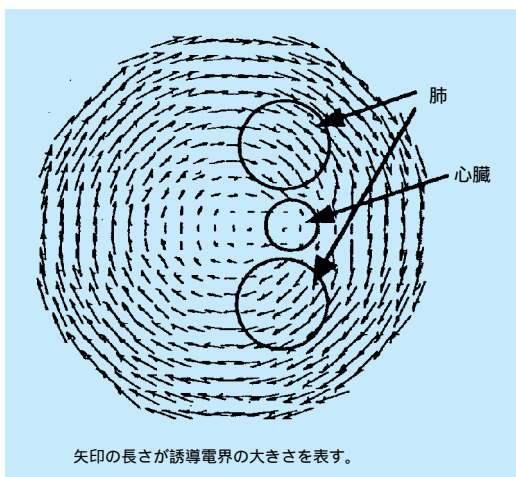


図3-2-3 心臓、肺断面での誘導電界分布

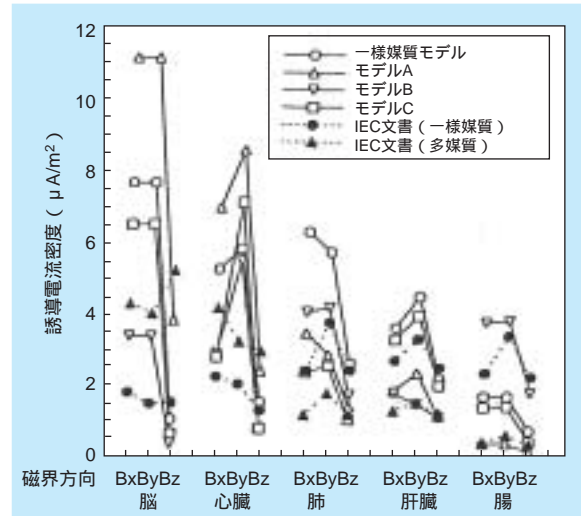


図3-2-4 各臓器への誘導電流の平均値

また、磁界方向の違いについては、今回の検討で用いたモデルにおいては、人体正面あるいは側面方向に存在する磁界による誘導電流が、直立方向の磁界による誘導電流よりも大きくなっているのが特徴である。

### 3-2-5 生体内誘導電流評価研究の課題<sup>(6)</sup>

本節では、当所にて行った生体内誘導電流評価研究の概要について述べた。現在のところ、各種人体モデルの妥当性についての合意は得られていないが、今後の発展が見込まれる分野である。本分野における今後の課題として、以下が挙げられる。

- ・統一モデルによる数値計算手法間の精度比較
- ・結果の評価手法の統一（誘導電流か誘導電界か、最大値か平均値か、人体全体か特定の臓器に着目するか、など）
- ・細胞膜のモデル化、および膜内外に誘導される電位差計算法の確立とその評価
- ・磁界と電界の重畳場における誘導電流計算法の確立とその評価
- ・電磁界の生体への作用メカニズムに向けた、生物学的研究と工学的研究の相互補完

先に述べたように、人体内誘導電流評価は、防護指針の根拠となるものであり重要であるため、今後の動向に注視する必要がある。

## 3 - 3 生物実験用強磁界発生装置の開発

### 3-3-1 設計仕様

低周波磁界の環境への影響に関する研究において、動物あるいは細胞などの生物試料に標準磁界を曝露させるための装置が必要となる。特に、生物試料を配置する比較的広い空間に対して、一様な磁界を発生させる技術については関心が高く、これまでも様々な方式が提案され、適用されてきた<sup>17)</sup>。当所においても、小動物への磁界曝露装置として、5重正方形コイル方式の多重コイルの開発<sup>18)</sup>や、これまでに提案されている正方形多重コイルの一様性の比較に基づく Merritt 型3重および4重正方形コイルの製作などを行ってきた。

その後当所では、細胞曝露用の強磁界発生装置を導入することになり、設計手法の高度化、特に漏洩磁界計算および電源容量計算における設計の簡便化・高度化を行い、装置開発に適用した<sup>19)</sup>。

本装置の特徴は、磁界の生体作用メカニズムの解明を目標として、磁界強度や周波数等、パラメータを大きく振ろうとするものであり、1辺400mmの広い立方空間に対して、水平方向および垂直方向のそれぞれ最大10mT（100 Gauss、50Hz時）の高レベルの磁界を発生させること、また限られた実験スペースに対照実験を行う空間を置くため、ここへの漏洩磁界が厳しく制限されていることなどの仕様が示された。本装置の設計仕様を表3-3-1に示す。

このうち、本装置実現のために困難な点は、以下の2点に集約される。第1に400mm立方という大きな空間

に、最大10mTという大きな、かつ一様な磁界を得ることである。これまでに報告されている例では、電磁石の微小ギャップなどを利用し、比較的容積の小さい曝露空間（例えば、シャーレ1個に対する曝露）に対して、10mT以上の磁界を発生させる装置が存在する<sup>20)21)</sup>が、本件のような広い空間に対する磁界曝露装置としては、同時に数個のシャーレを用いる細胞実験、あるいは小動物を用いた実験に用いられるもので、最大5mT<sup>22)</sup>や2mT<sup>23)</sup>などの報告があるのみであった。曝露コイルの駆動に必要な電源容量は、磁界一様空間の辺長の3乗に比例し、さらに発生磁界強度の2乗に比例して増加するため、実現のためには電源方式にも工夫が必要となる。第2の点は、対照空間への漏洩磁界条件の厳しさであり、要求仕様は、25m離れた点の対照空間での、磁界上昇分が0.01  $\mu$ T以下である。また、設置箇所においては、対照空間と異なる方向の35mの位置に動物飼育室があり、ここでの磁界上昇分も0.01  $\mu$ T以下とする必要がある。これまでに製作した多重コイルの延長では、この仕様に示された一様空間および磁界レベルと同時に漏洩磁界の条件を満たすことはできない。このため、漏洩磁界低減のための新たな方策が必要となった。

### 3-3-2 磁界発生装置の設計・製作

採用したコイル方式は、Merrittらの提案による4重正方形コイルである<sup>24)</sup>。これは、磁界一様性に優れ、低周波磁界の生物影響研究の分野における磁界曝露装置の標準として多く用いられているコイル方式である。水

表3-3-1 設計仕様

磁界曝露装置	
曝露空間容積	400mm × 400mm × 400mm（磁界一様性：± 3%以内、インキュベ - タ外寸は600mm × 570mm × 600mm）
発生磁界の種類	水平磁界、垂直磁界、回転磁界
最大磁界	10mT（50Hzにおいて）
周波数	DC ~ 1kHz（交流磁界の波形は正弦波）
水平磁界方向	地磁気と直交方向
対照実験空間	
位置	曝露コイル中心より25m
許容漏洩磁界	上昇分0.01 $\mu$ T以内



平・垂直磁界を発生させるために2組の多重コイルを、水平方向および垂直方向に直交配置するものとした。Merritt 4重コイルでは、中心磁界に対して3%以内の磁界一様性を持つ立方空間の大きさはコイル辺長の60%であり、今回の仕様では、一様立方空間の辺長が400mmであるので、必要なコイル辺長は667mmとなる。

次に漏洩磁界対策として、磁界発生源側に補償コイルを設ける方法を採用した。補償コイル方式は、能動型磁気シールド（アクティブシールド）として知られ、内側コイルの電流に対して、外側コイルに適切な大きさの逆方向の電流を流すことによって、遠方での漏洩磁界を低減させようとするものである。補償コイルによる能動シールドの利点として、強磁性体を用いた磁気シールドと比較して、より効率的な設計が可能であり、かつシールド効果が磁界の大きさに依存しないため高磁界のシールドが効果的に行えるという点がある。一方、補償コイルを設けることにより中心磁界も目減りするるので、所定の中心磁界強度を得るためには主コイル、補償コイルとも電流を増やす必要があり、それに伴い必要電源容量が増加するという不利な点がある。

磁界の生体影響研究の分野では、Wilsonらの論文<sup>(3)</sup>にMerritt型4重コイルを用いた同心型および隣接型の補償コイルの概念が示されている。また、Harvey<sup>(5)</sup>らの提案による「8の字コイル」は隣接コイルも曝露空間として利用するもので、隣接型補償の一種と考えることができる。ここでは、同心型の補償コイルを採用した。これは、全方向に対して効果的に漏洩磁界が低減可能であ

ること、および水平・垂直2方向磁界の発生が可能であることによる理由による。

以上の検討をもとに、水平・垂直それぞれの曝露コイルおよび補償コイルの設計を行った。設計値を表3-3-2に、概念図を図3-3-1に示す。内側コイルを水平、外側を垂直磁界発生用のコイルとした。辺長667mmに対し、コイル内に配置するインキュベータ寸法を考慮し水平曝露コイル辺長を860mm、水平補償コイル辺長を2倍の1720mmとした。垂直コイルは水平コイルにかぶせて配置するものとし、曝露コイル、補償コイルとも、コイル巻線部の厚みを考慮して、辺長を水平コイルより300mm大きくした。それぞれのコイルの必要実効電流に対し、巻線数はすべて52/22/22/52とし、通電電流値

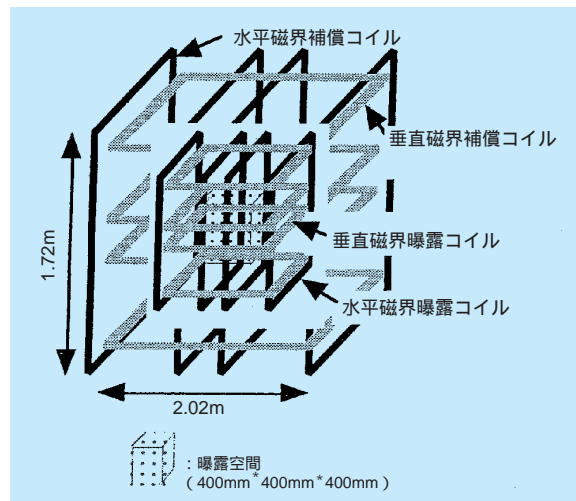


図3-3-1 設計したコイルの概念図

表3-3-2 設計した磁界曝露装置のパラメータ

	曝露用コイル		補償用コイル	
	水平磁界用	垂直磁界用	水平磁界用	垂直磁界用
コイル方式	正方形4重コイル		正方形4重コイル	
コイル辺長	860mm	1160mm	1720mm	2020mm
巻線数	52巻(外側)、22巻(内側)		52巻(外側)、22巻(内側)	
コイル位置	±435mm/±110mm	±586mm/±149mm	±870mm/±220mm	±1021mm/±259mm
最大発生磁界	10mT (50Hz)			
一様磁界空間	400mm x 400mm x 400mm (< 3%)			
最大磁界発生時(50Hz)の				
コイル通電電流	110A	155A	- 32A	- 52A
コイルインピーダンス	5.6	7.2	13.3	14.8
コイル端子電圧	616V	1116V	426V	770V
必要電源容量	67.8kVA	173.0kVA	13.6kVA	40.0kVA

により調整した。最大通電電流は、垂直曝露コイルの155Aである。50Hzにおける必要電源容量の合計は、251.3kVAと見積もられた。

設置箇所における漏洩磁界分布と補償コイルなしの場合の比較を図3-3-2に示す。水平・垂直とも10mTの中心磁界を発生させるものとし、計算位置の高さはコイル中心軸上とした。この計算においては、コイル辺長を全て模擬した精密計算を行った。同図に示すように、補償コイルを適切に配置することにより漏洩磁界が大幅に低減されていることがわかる。なお、設計仕様により、水平磁界方向は地磁気と直交方向となるように配置するものとした。

本装置の製作にあたり、コイル部では、コイルの電磁力に伴う振動を抑制するために、巻線間にエポキシ樹脂を充填して固定した。硬化した樹脂中のわずかな空隙(ポイド)の存在も振動の原因となるため、樹脂の注入は真空中で行った。また、コイル振動がインキュベータへ伝わるのを防ぐため、インキュベータの支持台は、コイル部分の床からは独立した基礎とした。コイルの発熱対策としては、水冷方式を用いた。コイル巻線として、断面が正方形(8mm×8mm)の銅線(純銅)の断面中心に同じく正方形(5mm×5mm)の空隙を設けたものを用い(断面積39mm<sup>2</sup>)、その空隙に純水を循環させるものとした(冷却能力19000kcal/hour、設定水温20度)。

また、作業性の面から、インキュベータへの試料の出し入れ時に障害となる、垂直磁界補償コイルおよび垂直

磁界曝露コイルのそれぞれ内側2本のコイルについては、作業時に上下方向へ退避可能なものとした(エアシリンダーを用いた自動昇降機構。スイッチによる操作)。なお、エアシリンダーは磁性材料を含んでいるため、磁界の一様性を乱さないように、コイルの外側に設置した。

電源部としては、小型高効率の特徴を有するスイッチングアンプ方式(エヌエフ回路設計ブロック社製)を採用した。回転磁界は、発振器の2出力の位相差を移相器により調整することにより得るものとした。従来、4重コイルの各コイル間を直列に接続し、同一のアンプにより駆動していたものを、今回は使用したアンプモジュールの定格電圧の制限により、各コイルを別々に駆動するものとした。なお垂直曝露コイルを除き、内側2本の巻線の少ないコイルについては2コイル直列接続による同時駆動とした。採用した方式では、各コイルの通電電流が同一であることの確認が重要となる。なお、補償コイルへの通電電流は、半固定抵抗を用いて、曝露コイルへの通電電流に対する規定の割合で供給するものとし、磁界レベルに関わらず、1つのボリューム操作のみで適切な電流が補償コイルに流れるようにした。電源部の発熱対策としては、装置内部の空冷ファンおよび室内冷房で対処するものとした。

その他の考慮点として、以下の点に留意した。

- 1) 対照実験区画には、曝露コイルと同一の外観および寸法の木製のダミーコイルを製作し、この中にインキュベータを設置した。作業時のコイルの昇降機構も、

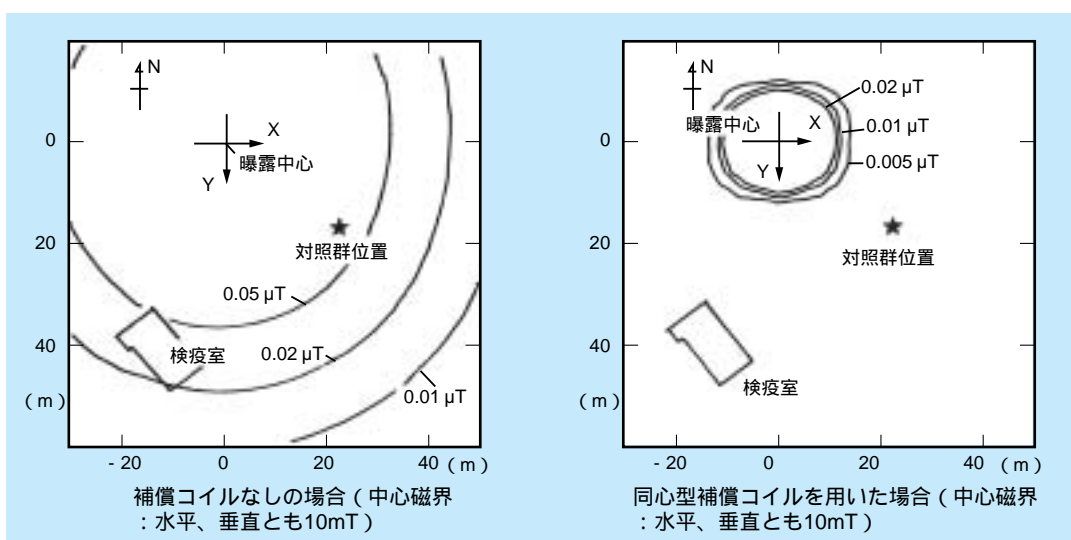


図3-3-2 補償コイルの有無による漏洩磁界の比較

曝露装置と同一とした。

- 2) インキュベータとして、磁界一様性を乱さぬよう金属は用いず外板を塩ビで製作し、内部の放熱板としては強化ガラスを用いた。また温度の管理は温水を循環する方式とした。また、温度とCO<sub>2</sub>濃度のコントロールは遠隔操作可能とした。
- 3) 曝露室および対照実験室における漏洩磁界やコイル冷却水の水温を随時、電源室でモニタ可能とした。
- 4) 磁界一様性を乱さぬよう建物の建材として鉄筋の使用を避けた。

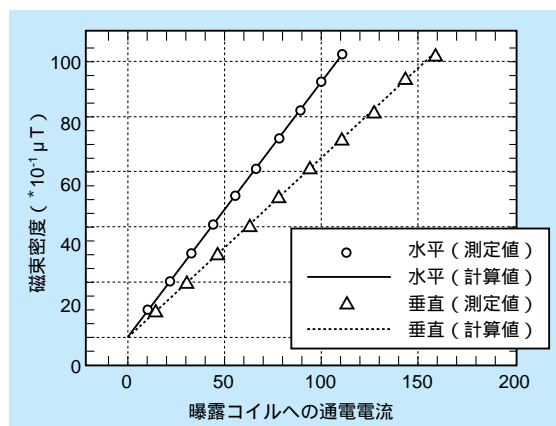


図3-3-3 コイル通電電流に対する発生磁界

### 3-3-3 特性評価

製作した磁界発生装置に対し、所定の要求仕様を満足することを確認するために、特性評価を行った。評価項目と結果は以下の通りである。

- 1) 強度特性・・・コイル通電電流に対する発生磁界の線形性、および所定の最大磁界強度(10mT)が得られることを確認した(図3-3-3)。消費電力54.1kWに対し、皮相電力は、236.6kVA(設計値251.3kVA)であった。
- 2) 磁界一様性・・・インキュベータ設置前の状態でコイル内の400mm×400mm×400mmの立方空間において磁界の一様性が±3%以内であることを確認した。

- 3) インキュベータ内磁界一様性・・・インキュベータを設置したことによる磁界の乱れがないことの確認した。
  - 4) 漏洩磁界・・・所定の漏洩磁界低減効果が得られていることを確認した。
  - 5) その他・・・設備設置場所における背景磁界は、0.02 μT ~ 0.04 μTであり、地磁気の大きさは34 μT程度であった。また、コイル部の振動がインキュベータへは伝達されていないことを確認した。
- 以上の特性評価結果より、製作した磁界曝露装置は、設計仕様を満たしていることが確認された。



第 4 章

# 4

情報の分析・評価

第4章 情報の分析・評価 目次

情報研究所 主任研究員 大屋 隆生  
 我孫子研究所生物科学部 主任研究員 川原 慶喜  
 我孫子研究所生物科学部 上席研究員 重光 司  
 経済社会研究所 主任研究員 丸山 真弘

4 - 1 研究の経緯 ..... 45  
 4 - 2 疫学研究の流れ ..... 47  
 4 - 3 訴訟の流れ 米国の事例 ..... 51  
 4 - 4 公的機関の評価 ..... 54  
 4 - 5 まとめと今後の課題 ..... 58  
 コラム1：RAPID計画の成果に対する当所の評価 ..... 59  
 コラム2：コホート ..... 59  
 コラム3：国際がん研究機関（IARC）と発がん性評価 ..... 60  
 コラム4：予防原則 ..... 61  
 コラム5：電気過敏症 ..... 61  
 コラム6：研究の現状 グラフより ..... 62



大屋 隆生（1983年入所）  
 発電限界費用計算手法、経営情報システム、システム導入効果評価、技術選択手法、IT活用地域ビジネスなど、OR、統計処理など情報数理に関する研究に従事。平成元年以降、電磁界の健康影響に関する疫学調査の動向分析に関する研究にも取り組んでいる。

重光 司（13ページに掲載）



川原 慶喜（2001年東京電力より出向）  
 入所以来、電磁界研究全般の情報収集および分析を主に進めてきた。最近では、電磁界研究の電気工学的な部分のサポートに努めている。



丸山 真弘（1990年入所）  
 電磁界関連の訴訟動向等、法律関係の問題についての調査、分析を担当している。また、電気事業の制度改革に伴う法律上の諸問題についての研究にも従事している。

## 4 - 1 研究の経緯

1980年代初頭より、電磁界の生物影響に関する研究・調査を積極的に進め、国内外の研究、また社会的な動向について情報の分析、評価を行ってきた。

電磁界研究はヒトの健康影響を扱うことから、医学、物理学、化学、電気工学、生物学、社会科学と広範な学問分野にまたがる学際領域に位置しており、研究も幅広い範囲で行われている。そのため、ヒトを対象にした研究に加え、動物・植物を対象とした研究、野外での実験・調査に至る広範囲の研究を取りまとめてきた。さらに、各種電気設備から発生する電磁界の実測結果、計算結果や計算手法の開発、低減方法、ヒトがどの程度電磁界に曝されているか、電磁界と生物との相互作用、スケールリングファクタ等の研究が行われてきた。またこれらの研究に必要な曝露装置の設計・製作、環境中や実験設備の電磁界レベルを測定するための測定器、曝露されている量を求める曝露量計の開発などが並行して進められた。

### 4-1-1 研究情報から見た研究の推移

ヒトの健康に電磁界が影響するかどうかを明らかにする研究に関連する様々な論文を中心に、研究の経緯、動向を紹介する。

#### 健康問題以前 1960年代

カリフォルニア大学の Krueger 教授らの研究グループが直流電界・空気イオンのプラスの効果を明らかにする実験を行った。また、ドイツ（西ドイツ）、ミュンヘン工科大学の König 教授らを中心とした研究グループも同様な研究を進めてきた。空電を含めた自然電磁現象がヒトにどのような作用を及ぼすか、特に、反応時間など生理的な側面に与える影響を明らかにする研究などである。ドイツの研究グループは発展的に商用周波電界のヒトへの影響を明らかにする直接曝露実験を行い（フライブルグ大学、アーヘン工科大学等）、それらの結果の一部は WHO の環境保健基準 35 にも引用されている。

このような自然電磁現象の生体への影響を明らかにする研究に始まり、1960年代後半からは商用周波電界の

影響研究が見られるようになった。

#### 電界影響研究期 1970～1980年中葉

1966年、国際大電力網会議（CIGRE）において Asanova ら（旧ソ連）が商用周波電界と不定愁訴との関連性の可能性を示唆したの<sup>1)</sup>をきっかけとして、電界による健康影響に関する研究が進められた。

1980年に入ると、米国のニュ・ヨ・ク州送電線プロジェクトが計画され、電界の生体に与える影響を明らかにするため動物による実験研究を中心にして、ヒトを対象とした疫学研究も幾つか進められた。

#### 磁界問題への移行 1980年代後半

1979年に磁界曝露と白血病との関連性を示唆する疫学調査結果が発表され、その後その結果が再現されたことから、1980年代になると、磁界問題が電界問題に取って変わった。ニューヨーク州送電線プロジェクトは1988年に最終報告書が公にされた。磁界の問題は一般公衆の健康問題として取り上げられことから、欧米を中心に一つの社会問題になり、磁界が生体に与える影響に関する研究が急速に増加していった。米国では1993年に RAPID 計画がスタートした。以下、研究動向の概要をみってみる。

#### 1) 疫学調査

電界の疫学調査は、特定の疾病を対象とするよりも、その発端が電力会社従業員の不定愁訴であったことから、職業者の健康診断をもとに一般的な医学調査を行って、その影響を明らかにする方法が用いられた。しかし、磁界に関しては、その発端が配電線と小児白血病であったことから<sup>2)</sup>、一般公衆が対象となり疾病として白血病、脳腫瘍や乳がんなどが取り上げられ、アルツハイマ・症や筋萎縮性側索硬化症なども調査対象となった。磁界についての疫学調査は、米国、カナダやスウェーデンを始めとした北欧三国で多くの研究がなされている。最近では、イギリスやドイツなどで居住曝露を中心とした疫学調査が進められた。

一方、職業者に対する疫学調査も、磁界に曝露されて

いると考えられる電力会社従業員や電気作業者が、主たる対象となっているのが特徴である。

## 2) 解析

1970年代後半より1980年代前半にかけては電界の生体影響問題が中心であった。同時にペースメーカーを中心に医用電子機器に対する電界の影響を調べた結果も報告されている。特に、誤動作を生じさせる電界のいき値などがWHOの文書で取り上げられている。その後、携帯電話の普及に伴ない、携帯電話からの電磁界がペースメーカー機能に及ぼす影響を中心として医用電子機器への影響問題に関する研究結果が、EMC（電磁両立性）の観点で踏まえて1990年代前半より報告されるようになった。

電界の作用メカニズムを明らかにする研究、電界と生体とのカップリング問題を中心にしたドジメトリ - についての解析研究が進められた。特に生体を球状、回転楕円体などの簡単なモデルに置き換えて、それらに誘導される電流や電界強度（電界による増強係数：Enhancement factor）を求める研究が盛んに行われた。これは動物を用いた電界曝露実験結果をヒトに外挿する場合にスケ - リング・ファクタ - として重要な係数である。その後、磁界の生体影響問題が取り上げられるに伴い、磁界と生体との相互作用、生体内誘導電流を中心としたパラメ - タを解析対象とした研究が進められている。

問題点は、商用周波領域における生体各部位での電気定数（生体の誘電率、電気抵抗）の正確な値がないことから、モデル計算に限界が見られることである。

商用周波領域で生体は導体とみなすことができるので、電界とのカップリングを考えると、生体表面に電荷が集中する。電界中では体表に垂直に電気力線が入り、生体内に電流が誘導される。磁界とのカップリングにおいては磁界中で生体内に電流が誘導され、磁界の方向に垂直な面にル - ブ状に流れる。しかし、一部の疫学調査結果からは、外部磁界による誘導電流があまりにも小さく、これまでに知られている現象では説明できないため、生物学、物理学の原理に基づいた様々なメカニズムの仮説が提案されている。

## 3) 計 装

細胞培養器に細胞を入れ、あるいはケ - ジに動物を入

れ、電磁界を曝露する実験では、培養器の金属部分による磁界のひずみ、動物からの導電性の体液、尿などにより非導電性のケ - ジが汚染されることによる電界のひずみなど、所定の安定した電磁界を長時間一定に保持することが困難でまた時間的な経時変化も見られる。そこで、これらの問題点を考慮した曝露装置の設計が必要である。電磁界問題が学際分野の研究になり、様々な分野の研究者が参画するようになった結果、電気工学的に実験装置が明確にされ、信頼度の高い実験結果が得られるようになった。

## 4) 基準・規則

科学的根拠に基づいて基準の設定がなされるようになったのは比較的新しいことである。特に、電磁界曝露による健康リスクの可能性に関する公衆の関心が高まったため、保健関係当局や放射線防護機関が一般公衆、職業者への基準・規則の作成を進めている。

1980年中葉には、WHO（世界保健機関）は電界及び、磁界に関する環境保健基準<sup>(30)</sup>を公表した。その後、IRPA（国際放射線防護学会）が基準作成の活動を開始し、50/60Hzの商用周波電磁界について1990年にIRPA/ICNIRPがガイドラインを発行した<sup>(31)</sup>。その後、1998年に、300GHzまでの周波数帯をカバーするICNIRPのガイドラインが発行され、現在に至っている。特に、ICNIRPのガイドラインはその内容、必要性、他の基準・規則との整合性などについて様々な視点から議論がなされている。その他、CENELECによる欧州基準案、EUの勧告などが報告されている。

最近の曝露制限基準は、できるだけ科学的知見に基づいて開発するように考えられている。例えば、ICNIRPのガイドラインでは、基準制限と参考レベルの2通りで制限されている。前者は科学的な知見により設定され、後者は測定可能な電界、磁界強度で表現されている。疫学調査は慢性影響の問題を扱うが、その結果からは影響の有無について未だ明確な結論は得られておらず、実験研究でも明確な結論が得られていないことから、現在の基準は急性曝露影響の防止のみを取り上げている。そのため、各国での取り組み姿勢、防護クライテリアには相違点が見られ、商用周波電界については、我が国では静電誘導による規制のみが設けられている。

直流電界・磁界については防護対策がなされている。



直流電界は放電破壊電圧を基準にすべきと考えられるが、電界強度はヒトの体格、向きなどによって変化するため、制限値の導入は簡単ではなく、これらのファクターを考慮する必要がある。直流磁界の規制は、1987年にWHO

がそれまでの文献を整理し、制限値を報告している。この内容に沿って高磁界発生装置・設備内での制限、管理制御なども対象としたICNIRPガイドラインが1994年に公表されている。

## 4 - 2 疫学研究の流れ

CIGRE 会議で Asanova (旧ソ連) が超高压変電所従業員の不定愁訴が商用周波電界の影響かもしれないと報告して以来<sup>(1)</sup>、各国で細胞や実験動物を用いた基礎研究あるいは職業人、公衆を対象とした疫学調査などが行われた。しかしその後の電界を対象としたニューヨーク州送電線プロジェクトでは、商用周波電界と健康との関連を関連づける確証は得られなかった。

1979年に Wertheimer らが、配電線からの磁界と小児白血病との関連に関する疫学調査結果を報告した<sup>(2)</sup>のを機に、この問題は電界から磁界に移り、商用周波磁界と健康との関連に関する多くの疫学調査が行われるようになった。

電磁界は、以下のような特徴を持つので、電磁界曝露量の推定が難しく、一般の因果関係追求の疫学調査研究と異なる。

- ・電界、磁界ともに曝露を受けたヒトが曝露を受けたことを自覚できない。
- ・電界も磁界もレベルの大小を別にすれば、どこにでもいつでも存在する。
- ・電界も磁界もレベルが、場所により時間により変化する。
- ・現代生活においては、極低周波の電磁界の発生源は多数存在し、電磁界の発生源からある場所の電磁界を推定するのは困難である。
- ・電磁界に関するどのような量(あるレベル以上の時間、総累積曝露量、最大の曝露量など、電界か磁界か両方か)が関係しているのか、生物学的定説がない。

表4-2-1、4-2-2、4-2-3に、職業者、公衆(成人、小児)を対象とした、これまでの主な疫学調査結果の概要を整理した<sup>(2) (3) (4)</sup>。

これらには、以下のような共通した特徴がある。

- ・罹病、死亡および調査対象個人の追跡に、公的機関の

データベースが活用されている。

- ・公衆を対象とした調査での磁界曝露量は、送電線からの距離や推定計算値が代用指標として用いられている。
- ・職業者を対象とした調査での磁界曝露量は、職業毎の代表値として、実測値に基づくものが増えている。
- ・交絡因子への配慮は論文による格差が大きい。これらの結果を総合的に判断した結果、以下のようなことがいえる。

1) 強固な関連性が見いだされた結果はなく、かつ、各調査結果間の関連の一致性も認められない。また、調査規模が大きく、厳密な手法を採用しているものほど、危険比が小さくなる傾向にある。従って、商用周波磁界と腫瘍との関連は、全くないか、ごく弱いものと考えられる。

2) 磁界の曝露量は、平均値あるいは個人の累積曝露量としてしか分析されていない。従って、これ以外の磁界特性が腫瘍に影響すると仮定した場合は、これまでの疫学調査からは何も云えない。

3) 疫学調査の多くは磁界曝露量を過去に溯って推定する歴年的調査であることや、交絡因子の排除・補正のためのデータの不完全性などから、精度に限界がある。

4) 商用周波磁界と腫瘍の関連の存在とその程度を見出すためには、疫学調査以外に、細胞・動物実験による生体反応メカニズムの面からの解明が必要である。

磁界と小児白血病の関連については、磁界問題の発端となった Wertheimer ら<sup>(2)</sup>が指摘し、近年 RAPID 計画の作業会や IARC の発がん性判定においても、関連性を示唆していると評価されている<sup>(3)</sup>。そこで改めて、表4-2-3、4-2-4により小児白血病について検討してみる。

1995年以前の研究において、有意な影響が認められた研究は、ワイヤコードや計算磁界値に基づくものである。従って、小児白血病に磁界が直接影響を与えている

表4-2-1 職業者の勤務時間曝露調査を実施した疫学調査の結果概要

研究者、発表年 調査方法、国	調査の概要	曝露量評価	曝露分類		リスク評価 ケース数、OR (95%CI)
			TWA	中央値	
Floderus, 他、 1993 症例 - 対照 スウェーデン	Large region of mid Swedenの1980 時点で20～64才の全男性従業員 がん登録から選定 症例：白血病 250人 脳腫瘍 46人 年齢でマッチした対照1,121人を選 定	診断前10年間に最も長かった職 業分類のTWA他4種類の曝露指 標をJEMにより評価 JEMは職業と勤務地により169に 分類し、1015の曝露測定により 曝露量を評価	25～50% 0.16～0.19 μT 50～75% 0.20～0.28 μT 75%～ >0.29 μT >90% >0.41 μT	25～50% 0.16～0.19 μT 50～75% 0.20～0.28 μT 75%～ >0.29 μT >90% >0.41 μT	CLL 17 1.1 (0.5～2.3) 33 2.2 (1.1～4.3) 41 3.0 (1.6～5.8) 22 3.7 (1.8～7.7) 脳腫瘍 59 1.0 (0.7～1.6) 72 1.5 (1.0～2.2) 74 1.4 (0.9～2.1) 24 1.2 (0.7～2.1)
Sahl, 他、 1993 コホート内 症例 - 対照 カリフォルニア (米国)	36,221人のSouthern California Edison電力従業員 症例： 1960～88年のがん死亡者 症例1人につき誕生日、性別、人 種でマッチした対照10人を選定	職業履歴とJEMにより曝露評価 TWA他5種類の曝露指標をJEM により評価 JEMは776人日の曝露測定により 曝露量を評価	総累積曝露量 TWA 25 μT・年 中央値 3.5 μT・年	TWA 25 μT・年 中央値 3.5 μT・年	白血病 13 1.1 (0.80～1.5) 10 1.0 (0.75～1.4) 脳腫瘍 26 3.2 (1.2～8.3) 4 2.7 (0.5～15)
Theriault, 他、 1994 コホート内 症例 - 対照 カナダ、フランス	3電力会社の男性従業員 223,292人のコホートからがん登録 により4,151人の症例 6,106人の対照を会社、誕生日でマッ チして選定	職業履歴とJEMにより曝露評価 JEMは職種により260に分類し、 2066勤務週の曝露測定により(50/ 60Hz磁界、電界及びパルスEMF の)曝露量を評価 過去のTWAのJEMは職業慣例に より補正	総累積曝露量 >中央値>3.1 μT・年 >90%値>16 μT・年	>中央値>3.1 μT・年 >90%値>16 μT・年	AML 26 3.2 (1.2～8.3) 4 2.7 (0.5～15) CLL 24 1.5 (0.5～4.4) 6 1.7 (0.4～6.7) 脳腫瘍 48 1.5 (0.85～2.8) 12 2.0 (0.76～5.0)
Savitz & Loomis 1995 コホート 米国	5電力会社に1950～86年に6カ月 以上勤務した男性従業員138,905人 をコホート	職業履歴とJEMにより累積曝露 量を評価 JEMは2842の曝露測定により曝露 量を評価	総累積曝露量 大分類>4.3 μT・年	大分類>4.3 μT・年	AML 5 1.6 (0.51～5.1) CLL 5 0.55 (0.17～1.8) 脳腫瘍 16 2.3 (1.6～4.6)

OR：オッズ比、CI：信頼区間、TWA：時間平均、JEM：職業分類曝露評価、AML：急性骨髄性白血病、CLL：慢性リンパ性白血病

表4-2-2 成人を対象とした疫学調査結果の概要

研究者、 発表年、国	症 例	対照選定	曝露評価	交絡因子	リスク評価 ケース数 OR (95%CI)		
					ワイヤコード	計算磁界	測定磁界
Severson, 他、 1988 米国	ワシントン州西部 のがん登録(1981～ 84)よりの20～79 才のALL患者114 人(AML91人)	居住地域でマッ チし、年齢、性 別で分布をマッ チして133人の 対照をrandom- digit dialingで選 定	Wertheimer-Leeper ワイヤコード サンプル家屋につ いて60Hz磁界の 屋内(台所、寝室、 居間)スポット測 定、屋外24時間測 定	性別、人種、 年齢、X線診断 溶接工か、 農園生活	全白血病 OLCC 0.6(0.29～1.2) OHCC 0.77(0.35～1.7) VHCC 0.7(0.22～2.9)	(非曝露群：0～0.05 μT) 全白血病 >0.2 μT 0.75(0.31～1.8)	全白血病 平均スポット測定値 (非曝露群：0～0.05 μT) 少電力消費 >0.2 μT 1.5(0.48～4.7) 多電力消費 >0.2 μT 1.6(0.49～5.0)
Feychting Ahlbom 1994 スウェーデン	16才以上のスウェ ーデン人のうち220kV か400kVの送電線 から300m以内に住 むコホートからが ん登録(1960～ 1985)により全がん 患者325人(72AML, 57CML, 14ALL, 132CLL)	1人の症例につ き、2人の対照 を、年齢、性別、 教区、同じ送電 線の近くでマッ チして1,091人 選定	送電線からの距離 電力消費が多い状 態と少ない状態 での屋内スポット測 定 送電線からの距離、 送電線の電流によ る計算磁界	性別、年齢、 診断年、 ストックホルム countyに居住? 住居のタイプ 社会経済状態		(非曝露群<0.09 μT) 全白血病 0.1～0.19 μT 1.0(0.5～1.8) >0.20 μT 1.1(0.6～1.8)	スポット測定値 (非曝露群<0.09 μT) 全白血病 0.1～0.19 μT 1.1(0.7～1.9) >0.20 μT 1.2(0.8～1.9)
Verkasalo, 他、 1996 フィンランド	20才以上のフィン ランド人のうち110 ～400kVの架空送 電線から500m以 内に住むコホート から、フィンラン ドのがん登録によ り(1974～89)より 全白血病患者203 人	コホート研究： 383,700人(男 性：189,300人) 2.5M 人・年	居住記録により住 居の中心から500m 以内の総ての送電 線からの距離と電 流による計算磁界 により求めた各期 平均磁界と累積値	性別、年齢、 社会経済状態		(非曝露群<0.1 μT) 全白血病 0.10～0.19 μT 1.1(0.60～2.0) 0.20～0.29 μT 1.2(0.40～3.3) >0.30 μT 0.53(0.16～1.8)	

AML：急性骨髄性白血病、CML：慢性骨髄性白血病、ANLL：急性非リンパ性白血病、ALL：急性リンパ性白血病、CLL：慢性リンパ性白血病

表4-2-3 小児白血病を対象とした疫学調査結果の概要（その1）

研究者 年、国	症 例	対照選定	曝露評価	交絡因子	リスク評価 n OR (95%CI)	
					ワイヤコード	計算磁界 測定磁界
Wertheimer and Leeper 1979 米国	コロラド州で出生しデンバーに住んでいた19歳未満の小児328人を、がん死亡記録（1950-1973）より抽出	デンバー地域の出生証明より344人を選定	2レベルのワイヤコード（HCCvs. LCC）ワイヤコードの評価は Non-binded	がん発病年、都市部/郊外、社会経済状態、出生順、妊娠年齢、交通状態、性別	ワイヤコード 全白血病 出生地： LCC 84 reference HCC 52 2.28(1.34-3.91) 死亡地： LCC 92 reference HCC 63 2.98(1.78-4.98)	測定磁界
Savitz,他 1988 米国	コロラド州デンバーで1976-1983年に報告された15歳未満の全がん罹患患者。356人確認の内320人について5段階のワイヤコードを評価。252人をインタビュースし、128人を曝露測定	年齢、性別、電話交換エリアでマッチして random-digit dialing で選定278人確認の内259人について5段階のワイヤコードを評価 222人をインタビュースし、207人を曝露測定	5レベルのワイヤコード、電力消費が多い状態と少ない状態での屋内の電磁界スポット測定	性別、年齢、住居のタイプ、社会経済状態、交通密度、所得、親の年齢、妊娠中の喫煙、家族のがん歴、引越の多さ、X線診断 他	全白血病 出生地： HCC/LCC 27/70 1.54(0.90-2.63) VHCC/UG 7/28 2.75(0.94-8.04)	全白血病 小電力消費(μT) <0.2 31 reference >0.2 5 1.93(0.67-5.56) 多電力消費(μT) <0.2 30 reference >0.2 7 1.41(0.57-3.50)
London,他 1991 米国	ロサンゼルス郡のがん登録（1980-1987）に報告された10歳未満の全白血病患者331人の内、232人をインタビュースし、169人を24時間曝露測定、219人について5段階のワイヤコード評価	年齢、性別、人種でマッチして、患者の友人（1980-1984）及び random-digit dialing（1980-1987）で、257人選定 232人をインタビュースし、149人を24時間曝露測定、207人について5段階ワイヤコードを評価	5レベルのワイヤコード、電力消費が多い状態と少ない状態での屋外と屋内の電磁界のスポット測定、ベッドの下での24時間曝露測定 使用電気製品についての自己申告	過去の研究でがんと関連があると報告された各種要因 電気製品の使用、社会経済状態	全白血病 UG + VL 31 references OLCC 58 0.95(0.53-1.63) OHCC 80 1.44(0.81-2.56) VHCC 42 2.15(1.08-4.26)	全白血病 小電力消費(μT) <0.032 67 reference 0.032-0.067 34 1.01(0.61-1.69) 0.068-0.124 23 1.37(0.65-2.91) > 0.125 16 1.22(0.52-2.82) 24時間測定(μT) <0.067 87 reference 0.068-0.118 35 0.68(0.39-1.17) 0.119-0.267 24 0.89(0.46-1.71) > 0.268 20 1.48(0.66-3.29)
Olsen,他 1933 デンマーク	デンマークがん登録（1968年～1986年）から18歳未満の全白血病と中枢神経系がんと悪性リンパ腫の患者1,707人	症例の診断時点でがんになつていない生存者を誕生日、性別でマッチして症例1人につき2-5人を選定 4,788人選定	送電設備からの距離、居住期間の平均計算磁界、累積磁界曝露量	性別、診断時の年齢、社会経済状態、住居の人口密度、住所変更の回数	全白血病 <0.1 μT 829 reference 0.1-0.24 1 0.5(0.1-4.3) >0.25 3 1.5(0.3-6.7) > 0.40 3 6.0(0.8-44)	全白血病 Unmatched analyses(μT) <0.1 27 reference 0.1-0.19 4 2.1(0.6-6.1) >0.2 7 2.7(1.0-6.3) >0.3 7 3.8(1.4-9.3)
Feychting Ahlbom 1993 スウェーデン	16歳未満のスウェーデン人の内220kVか400kVの送電線から300m以内に住むコホートからがん登録（1960-1985）により全がん患者141人の内、141人を曝露量を計算。89人をスポット曝露測定	1人の症例につき、4人の対照を、症例と同じコホートから、生年、性別、教区、同じ送電線の近くでマッチして558人選定 554人を曝露量を計算 334人をスポット曝露測定	送電線からの距離、電力消費が多い状態と少ない状態での屋内スポット測定 送電線からの距離、送電線の電流による計算磁界	年齢、性別、診断年、住居のタイプ、交通による大気汚染、社会経済状態	全白血病 Unmatched analyses(μT) <0.1 27 reference 0.1-0.19 4 2.1(0.6-6.1) >0.2 7 2.7(1.0-6.3) >0.3 7 3.8(1.4-9.3)	

表4-2-3 小児白血病を対象とした疫学調査結果の概要（続き）

研究者 年、国	症例	対照選定	曝露評価	交絡因子	リスク評価 n OR (95%CI)	
					ワイヤコード	測定磁界 (μT)
Verkasalo,他 1993 フィンランド	20歳未満のフィンランド人の内110-400KVの架空送電線から500m以内に住むコホートのがん登録により（1974-89）全がん患者140人	コホート研究： 男性：68,300人 女性：66,500人	居住記録より住居の中心から500m以内の総での送電線からの距離と電流による計算磁界より求めた長期平均磁界と累積値	年齢、性別	全白血病 0.01-0.19 32 0.89 (0.61-1.3) >0.2 31 0.6 (0.32-4.5)	測定磁界 (μT)
Linnet,他 1997 米国	1989-1994に米国9州に住んでいた15歳未満の小児で、がん登録によりALL患者942人の内629人（マツチせず；463人マツチ）について磁界測定、408人（マツチした）、408人（マツチしなかった）主たる住居のワイヤコード評価	random-digit dialingにより、電話番号の上8桁、年齢、人種でマツチして1,292人選定。619人（マツチせず；463人マツチ）について磁界測定、408人（マツチした）、408人（マツチしなかった）主たる住居のワイヤコード評価	小児の寝室での24時間曝露測定、小児の寝室、居間、台所、妊娠中の寝室、玄関におけるスポット曝露測定、Wertheimer-Leeperのワイヤコード、修正Kaune-Savitzワイヤコード	性別、年齢、人種、社会経済状態、妊娠年齢、子供の数、母親の教育水準	ALL UG+VLCC 175 reference OLCC 116 1.07 (0.74-1.54) OHCC 87 0.99 (0.67-1.48) VHCC 24 0.88 (0.48-1.63)	<0.065 267 reference 0.065-0.099 123 1.1 (0.8-1.50) 0.1-0.199 151 1.1 (0.83-1.48) 0.283 1.24 (0.86-1.79)
McBride,他 1999 カナダ	15歳未満の1990-1994にカナダ5州の州都から100km以内に住んでいた小児で、がん登録により患者399人	州の政府健康保険名簿から年齢、性別、診断時の居住地でマツチした399人	ボジトロンによる48時間曝露測定、小児の寝室の24時間測定、住居での電力設備からの磁界測定、Wertheimer-Leeperのワイヤコード、修正Kaune-Savitzワイヤコード	性別、年齢、州、家族の病歴、社会経済状態、電離放射線、化学物質	全白血病 VHCC/UG 39 1.06 (0.58-2.30)	全白血病 個人曝露量0.2μTにつき 275 0.95 (0.72-1.26)
Green,他 1999 カナダ	15歳未満の1985-1993にトロント及びオンタリオ州南部に住んでいた小児で、がん登録により患者88人	random-digit dialingにより、年齢、性別でマツチした133人	ボジトロンによる48時間曝露測定、小児の寝室等でのスポット測定、Wertheimer-Leeperのワイヤコード、修正Kaune-Savitzワイヤコード	性別、年齢、家族の年収、両親の教育、住居の敷、子供と家族の既往病歴	全白血病 6歳以下 <0.03 6 reference 0.14 19 5.7 (1.4-22.5)	全白血病 6歳以下 <0.03 6 reference 0.14 19 5.7 (1.4-22.5)
UKCCS 1999 イギリス	1991-1996年で北アイルランドを除くイギリス全土に住んでいた15歳未満の小児で、イングリッドとウェーカース生サートランド保険局の登録名簿により誕生した7,629人。その内、2,226人（マツチしたペア）を分析	イングリッドとウェーカース生サートランド保険局の登録名簿により誕生した7,629人。その内、2,226人（マツチしたペア）を分析	屋内でのスポット測定、8時間測定を基に、診断日の前1年間の平均曝露量を推定	性別、年齢、家族の年収、両親の教育、住居の既往病歴、社会的習慣、家族の病歴、母親の妊娠時の状況、子供の健康状況、学校教育	全白血病 6歳以下 <0.10 21 reference 0.20 23 0.90 (0.49-1.63)	全白血病 6歳以下 <0.10 21 reference 0.20 23 0.90 (0.49-1.63)

表4-2-4 主な小児白血病を対象とした疫学調査の曝露レベル別の結果

研究者年、国	リスク評価		
	測定磁界(μT)	症例数/対照数	OR (95%CI)
Linnet, 他 1997 米国	ALL	267/285	
	< 0.065	123/117	1.1(0.8 -1.50)
	0.065-0.099	151/143	1.1(0.83-1.48)
	0.1 -0.199	38/42	0.92(0.57-1.48)
	0.2 -0.299	22/17	1.39(0.72-2.72)
	0.3 -0.399	14/ 5	3.28(1.15-9.39)
McBride, 他 1999 カナダ	全白血病	176/192	
	< 0.1	63/95	0.71(0.48-1.05)
	0.1-0.2	30/29	1.06(0.60-1.85)
	0.2-0.3	11/ 9	1.24(0.50-3.06)
	0.3-0.4	5/ 8	0.64(0.20-2.00)
	0.4-0.5	8/ 6	1.48(0.49-4.42)
UKCCS 1999 イギリス	全白血病	995/977	
	< 0.1	57/73	0.77(0.54-1.10)
	0.1-0.2	16/20	0.78(0.41-1.51)
	0.2-0.4	5/ 3	1.62(0.39-6.77)

のではなく、ワイヤコードや磁界計算値と相関のある他の交絡因子が影響を与えている可能性がある。

表4-2-4に示すように、1995年以降の症例200人以上の

大規模な研究<sup>(18) (19) (21)</sup>では、0.2 μ T以上を曝露群として評価した場合は有意な影響が見い出せていない。0.3 μ Tあるいは0.4 μ T以上を曝露群として評価した場合は、4-(21) (22)においては症例、対照ともに人数が少なく影響の有無について判断できない。4-(20)において有意な影響がみられるが、対照において高学歴層が多くなっており選択バイアスがある可能性がある。また交絡因子の影響も否定できない。

以上より現時点においては、

- ・ 極低周波磁界の小児白血病への影響はない。
- ・ 強い極低周波磁界への曝露の小児白血病へのリスクがあるが、そのリスクは低い。

の2つのうちどちらかの可能性しかない。

症例200人以上の大規模な研究においても、0.3 μ Tあるいは0.4 μ T以上の曝露を受けているヒトが少なく、特に米国以外では数人程度しかいない。従って、今後疫学調査により2つの可能性のどちらかを判断するのは困難と考えられる。

## 4 - 3 訴訟の流れ - 米国の事例 -

米国では、1980年代末から1990年代はじめにかけて、送電線や変電所などの電力施設からの電磁界により、健康に悪影響があった、あるいは、土地の価値が下落したとして、電力会社を相手取って訴えが提起された例が少なからずある。以下、これらの事例を調査し、その傾向について整理、検討した結果を示す。

問題となる訴訟は、電磁界に曝露されたことが原因でがんや白血病に罹患するなど、健康に悪影響があったとして、損害の賠償を求めると、電力施設が近隣に建設されることで、所有する土地の価値が下落したとして、補償を求めるとに大別できる。

### 4-3-1 健康影響に関する訴訟

がんや白血病などに罹患したのは、送電線や変電所からの電磁界に曝露されたことによるものであるとして、

電力会社を相手取って損害賠償を請求する訴訟は、1990年代になって注目されるようになってきた。このような動きは、1993年のZuidema事件 (Zuidema v. San Diego Gas & Elec. Co., No. 638,222 (Cal. Super. Ct. San Diego County May. 28, 1993)) 以降、いくつかの事件において、陪審による正式事実審理にまで至ったことによるものである。この事件は、被告電力会社の配電線からの電磁界に曝露されたことが、原告の娘のウィルムス腫瘍の原因であるとして損害の賠償を求めたものであったが、陪審は原告側の主張を認めず、被告勝訴の判断を示した。このように、事実審理前の略式裁判 (summary judgment) による判断ではなく、陪審による正式の事実審理に至った事例はあるものの、最終的に被告である電力会社が敗訴をした事例はまだ存在しない。Jordan事件 (Jordan et al. v. Georgia Power Co. and Oglethorpe Co., No. 91-4103 (Ga. Super Ct. Douglas

County, May. 24, 1994) で原告は、被告電力会社の送電線からの電磁界によって非ホジキン性リンパ腫に罹患したと主張した。しかし陪審は電磁界と原告のリンパ腫の間には因果関係はないとして、原告による損害賠償請求を認めなかった。その後、原告は上訴したものの、1997年に訴えを取り下げた。一方、1997年のGlazer事件 (Glazer et al. v. Florida Power & Light Co., 689 So. 2d 308 (Fla. Dist. Ct. App. 1997)) では、原告の因果関係の主張は正式の事実審理に至ることなく、略式裁判の段階で原告の請求が棄却された。

電磁界に曝露されたことで健康影響が生じたとして、電力会社に損害賠償を請求した原告は、電磁界と健康影響との間の因果関係を証明する必要がある。具体的には、

1. 送電線や変電所など、被告の電力施設からの電磁界に曝露されたこと。
2. 一般的に、電磁界に曝露されることで、健康影響が生じること。
3. 原告の健康影響は電磁界に曝露されたことにより生じたものであること。

の三点が証明されなければならない。一方、被告である電力会社は、原告が曝露された電磁界は被告の電力施設以外からのものであること (1. に対する反論)、一般的にみて、電磁界に曝露されることで、問題となる健康影響が生じるとはいえないこと (2. に対する反論)、原告の健康影響の原因は、電磁界への曝露以外に存在すること (3. に対する反論) のいずれかを証明することで、原告の主張を突き崩すことができる。電磁界の健康影響に関する争いは、電磁界への曝露から健康に影響が生じるまでの期間が長いことから、曝露の健康影響との間の因果関係の有無を定めることは非常に難しくなる。

因果関係の証明にあたっては、専門家に意見を求め、それをもとにして主張を行うことになる。原告は、専門家の証言に基づいて、電磁界と健康影響との関係などについて、合理的な程度の科学的、医学的確信が存在することを示すことが求められる。一方、被告は原告の専門家による証言の結論が矛盾していることや、証言の基礎となっている統計などが信用できないことなどを指摘し、原告の主張を崩そうとする。この際にも、専門家による証言などが求められる。

専門家の証言が実際の陪審に対して提示されるためには、証拠としての能力 (admissibility) があることが求

められる。この証拠能力の判断基準として現在用いられているのは、Daubert基準と呼ばれるものである。この基準は、1993年のDaubert判決 (Daubert v. Merrell Dow Pharmaceuticals, Inc., 509 U.S. 579 (1993)) において示されたものであり、専門家の証言の証拠能力を認める際には、専門家の証言した科学的知識の方法論が科学的にみて有効か、その理由付けや方法論が争点となっている事実に適切に当てはまるものであるかといった点を判断する必要があるとしている。そして、証拠が検証済みのものであるか、ピアレビューや公への刊行が既に行われているかといったことや、学界で受け入れられた考えであるかといったことなどを総合的に判断しなければならないとしている。

ただし、Daubert基準は、1975年の連邦証拠規則 (Federal Rule of Evidence) 第702条の規定が、学界で受け入れられているか否かを唯一の判断基準としていた従来のFrye基準 (Frye v. United States, 293 F. 1013 (D.C. Cir. 1923)) を修正するものであることを確認したものであり、原則として連邦証拠規則が適用される訴訟を対象としている。それぞれの州では、連邦証拠規則に準じた規定を設けている場合もあれば、従来のFrye基準 (学界で受け入れられているか) を依然として採用している場合もある。

電磁界による健康影響をめぐる争いでは、原告側は電磁界とがんや白血病などとの因果関係を示すために、疫学調査などの結果を証拠として示す場合が多い。しかし、この疫学調査に基づく証拠については、方法論やピアレビューが不足していることに対する批判がある。さらに、1996年10月に発表された全米科学アカデミーの報告では、居住環境での電磁界への曝露が、がん、有害な神経行動的な影響、あるいは生殖・成長への影響を生じさせることを示す決定的で一貫した証拠はなにもないと結論づけている。

従って、Jordan事件の判決で示されているように、電磁界が何らかの種類の健康影響の原因となるかということについての科学的証拠には決定的なものはなく、ここからはこれらの健康影響に対する損害賠償請求を認めることはできない。少なくとも電磁界への曝露が健康に対して悪影響を与えるということについて、確定的な科学研究が新たに示されない限り、原告が敗訴し続ける状況は変わることはないと考えられる。

#### 4-3-2 土地の価値下落に対する訴訟

電力会社が送電線や変電所といった電力設備の建設を計画し、土地の利用権を取得する手続きを行っている過程で、これらの電力設備からの電磁界に対して世間一般が不安を持っているため、これらの設備の周辺にある自らの土地の価値が下落したとして、土地所有者が電力会社にその補償を求めるといった事例は、従来より数多く見られる。ここで問題とされるのは、電磁界に対する人々の恐れが単なる推測の域をでないものであっても、不安に基づいた価値下落が事実として起こっているのであれば、電力会社はその損失を補償しなければならないのかという点である。

この点についても、裁判所の判断は(1)単なる不安に基づく価値下落はその不安が合理的なものであっても補償対象にはならない、(2)不安が合理的理由に基づくものである場合に限って補償対象とする、(3)不安が合理的理由に基づくものでなくても、価値下落が事実として起こっていれば補償対象とする - という三つに分かれている。現在米国では、三番目の考え方が最も多くの裁判所で採用されているとされる。

1987年のJennings事件 (Florida Power & Light Co v. Jennings, 518 So. 2d 895 (Fl. 1987)) で裁判所は、土地の購入を考える者が、送電線が近隣に建設されることに対して恐れを抱いており、そのことで土地の取引価格が下落するということが実際にあるならば、被告電力会社が送電線建設のために原告の土地を収用する際、それに隣接する原告所有の土地の価値が送電線に対して人々が持つ恐れのために下落した分についても、補償の対象として検討されるべきであるとの判断を示した。また、1993年のCriscuola事件 (Criscuola v. Power Authority of the State of New York, 621 N.E. 2d 1195 (N. Y. 1993)) では、一般の人々が恐れを持っており、それに

よって評価が下がったのである以上、恐れが合理的根拠に基づくものとの証明がなくても、隣接地の価値下落分は補償の対象になると判断している。

このような考え方に対しては、電力会社は一般の人々の電磁界に対する恐れをコントロールできない以上、損失を補償する責任を負わせることはできないという批判がある。これに対しては、土地所有者と電力会社を比較した場合、電磁界に対する恐れは、土地所有者よりも電力会社の方がより低コストでコントロールできるから、低コストで問題を回避できる電力会社が損失を負担する制度の方がより合理的であるとの反論がある。この考え方からは、合理性の証明を求めない方が、合理性がある場合に限って損失の補償を認める場合と比較して、訴訟コストが低減されるというメリットがあるとされる。

一方、1995年のBorenkind事件 (Borenkind v. Consolidated Edison Co. of New York, 626 N. Y. S. 2d 414 (Sup. Ct. 1995)) では、送電線からの電磁界に対する恐れから土地の価値が下落した場合であっても、送電線が新たに建設されるのではなく、原告が問題の土地を購入した時点では既に送電線があったという場合には、被告電力会社には土地の価値下落に対する責任はないとの判断が示されている。また、1996年のReiss事件 (Reiss v. Consolidated Edison, 650 N. Y. S. 2d 480 (3d Dep't 1996)) では、送電線に近接する土地を売却した際、電磁界に対する一般の人々の恐れから安く買いたたかれたのは、被告電力会社によって、問題の土地の価値が収用されていたとして、補償を求めた(逆収用)原告に対して、電磁界の健康影響についての科学的な証拠を原告が証明できない以上、被告が問題の土地の価値を収用したものであるとはいえないとした事実審の判断を支持する判断が示された。従って、補償の対象として米国の裁判所が認めているのは、送電線が新設される時点に限られることに注意すべきである。

## 4 - 4 公的機関の評価

国内外の研究機関や公的な機関で、電磁界に関連する研究成果を取りまとめた評価活動が行われてきている。本節では代表的な機関がどのような評価活動を行ってきたかを紹介する。

これまでに、世界保健機関<sup>(3)(4)</sup>、米国議会技術評価局報告（OTA 報告書）<sup>(24)</sup>、国際放射線防護学会<sup>(5)</sup>、英国放射線防護評議会<sup>(25)(26)(27)</sup>、全米科学アカデミー<sup>(28)(32)</sup>、国際非電離放射線防護委員会<sup>(29)</sup>、米国国立環境健康科学研究所（RAPID 最終報告書）<sup>(30)</sup>、国際がん研究機関<sup>(31)</sup>などが、我が国では経産省・資源エネルギー庁<sup>(33)</sup>、環境省<sup>(34)(35)(36)</sup>、電気学会<sup>(37)</sup>などが報告書をまとめている。

### 4-4-1 国 外

#### 世界保健機関（WHO 1984 1987）<sup>(3)(4)</sup>

低周波電界の健康影響評価を目的として、1964年から1983年までに発表された研究論文を分析して、評価を行っている（環境基準35）。その結果、1）居住環境または職場環境で遭遇する低周波電界レベルは、ヒトの健康への有害な影響を確認できない。2）現段階では、電界への間欠的な曝露の安全性については明言できないが、10kV/m未満の区域に立ち入ることを制限する理由はない。3）1～10kV/mの電界への長期曝露に伴うリスクの具体的な証拠はないので、安全性・危険性について、明言することはできないとして、電界による作用メカニズムの解明と、よく設計された疫学研究を進めることを勧告している。

一方、低周波磁界に関しては、1964年から1986年までに公表された研究論文を分析、評価して（環境基準69）、1）10mA/m<sup>2</sup>より低い誘導電流密度（50Hzでは約5mTの外部磁界に相当）が有意な生物学的影響を生じることが示されていない。2）磁界影響が別の研究機関で再現された例は少ない。3）発がんに関する疫学調査は、その発生率増加のリスクが小さいこと、調査結果が予備的なものであるため、無視はできないが、今後の研究が必要である。として、今後細胞および動物を用いて磁界の作用メカニズムの研究を行うこと。さらに、胚および胎児、細胞・組織レベルの応答について、細胞膜

との相互作用に焦点を合わせて研究することを勧告している。

その後の新しい実験研究に基づいた再評価活動が2005年を目途に進行中である。特に低周波に加え、高周波電磁界の健康影響も取り上げている。活動は国際がん研究機関との協調下で進めており、リスク評価も念頭に入れている。

#### 米国議会技術評価局（OTA 1989）<sup>(24)</sup>

電力設備から発生する電界・磁界の細胞、動物ならびに疫学調査結果について、1965年から1988年までの研究を整理・評価している。その結果、1）実験研究で染色体に損傷を与えないことから発がん因子になるものと思われない。2）細胞の増殖酵素（ODC）は活性化され、メラトニンの分泌は抑制され、ヒトや動物の概日リズムにも影響を与えることを示唆する研究論文もあるので、電磁界が発がんの促進因子として作用する可能性も考えられる。3）疫学調査では、電磁界と白血病などとの間に弱い関連性を示すものがあるが、全般的に交絡因子への配慮や曝露デ-タが乏しいので明確な結論は引き出せない。4）電磁界とがんについては、電磁界が発がんの促進に寄与するとする仮説を否定はしないが、その科学的な証拠はなく、さらに改善された疫学研究と動物実験による確認が必要である。5）電磁界問題に対する行政的な対応として、a）科学的な解明がなされるまで何も行わない。b）広報活動を行うが、これ以上特に対策はとらない。c）送電線の電磁界強度に対する安全基準を採用し、他の発生源からの電磁界は無視する。d）送電線の電磁界を他の発生源からの電磁界と等しくなるまで許容する。e）すべての発生源から生じる商用周波電磁界を常識的なコストの範囲内で低減する。などの選択肢があったとした。

#### 国際放射線防護学会（IRPA 1990）<sup>(5)</sup>

これまでの研究は探索的な段階にあり、電磁界曝露による健康への危険は確立されていないと指摘しつつ、WHOの環境保健基準35と69の考え方に準拠して、暫定的な曝露の制限値を設定した。すなわち、「50/60Hz



電界・磁界への連続曝露によって、頭および胴体に誘導される電流密度を、自発電流密度（10mA/m<sup>2</sup>）以下に押さえる」、「職業者の連続曝露制限値（実効値）は、上記に裕度を取り、電界が10kV/m、磁界を0.5mTとする」、また、「公衆の連続曝露制限値は、さらに裕度を取り、電界が5kV/m、磁界を0.1mT」としている。

#### 英国放射線防護局（NRPB 1991 1992 2001）<sup>25)(26)(27)</sup>

低周波電界・磁界曝露への生物学的な影響がヒトの健康および安全性に関係するかどうかを整理して、1991年に、1）生物学的に意味のあるメカニズムは確認されていない。2）ヒトを対象としたデータから、中枢神経機能への影響は、1kHz以下の周波数に対して、誘導電流密度を10mA/m<sup>2</sup>に制限することで、避けられることが示唆できる。3）動物実験から、電界曝露の結果、概日リズム変化とメラトニンへの影響や、成長・発育への影響を認める研究論文もあるが、確実な証拠はない。4）磁界の胎・胎児への発育に及ぼす影響は、更に研究することが重要である。5）細胞実験では、遺伝的な影響は生じないと考えられるが、カルシウムイオンの流入やODC活性などに対する変化については窓効果があるとする研究があり、メカニズムを含め、さらに研究が必要である。と報告し、さらに1992年には、電磁界の発がんの可能性について疫学および実験研究を取りまとめて、1）電力施設近傍の居住、家電製品の使用、親の職業曝露と小児がん、成人がんの危険性の間には確たる証拠はない。2）現在までの結果は、今後の調査・検討を行うための仮説を示しているにすぎない。3）今後、以下の研究実施を勧告する。a）窓効果を明確にする実験、b）腫瘍促進のメカニズムに関する研究、c）細胞機能および成長に関する実験、d）発がんに関する動物実験、e）メラトニンや乳がんとの関連性を調べるための動物研究、f）曝露測定を含み質の良い疫学調査、g）職業曝露に関する疫学調査。と報告している。

その後、磁界曝露と発がんについて、実験及び疫学研究について総括的な評価を行っている。その結果、実験室研究ではがんを引き起こす十分な証拠は得られていない。ヒトで行われた疫学調査でもがんを引き起こすことは示唆されていない。しかし、小児で高レベルの商用周波磁界への長期曝露と僅かな白血病のリスクの間に関連性があることを示唆するような疫学的な証拠がある。し

かし、イギリスにおいてはそのような高レベルの曝露に、一般のヒトが遭遇することは殆どない。動物実験や細胞実験で発がんについての納得できるような説明が得られていないこと、成人での発がんの明確な証拠がないことなどにより、高レベルの商用周波磁界が小児において白血病を引き起こす確固たる結論の証拠にはならないとしている。しかし、今後行われる研究で疫学的な証拠が偶発的なものであるのか、現在の知見では考えられない何らかの要因によるものであることが明らかにされないかぎり、小児が磁界に曝露されて白血病のリスクが上昇するとの可能性は残っているとコメントしている。

#### 全米科学アカデミー（NAS/NRC 1997）<sup>28)(29)</sup>

過去17年間に公表された500編以上の研究論文を分析して、生物学的な反応への電磁界曝露の影響を評価した。その結果、過去の曝露推定としてワイアコードを代表指標とすると、高ワイアコードカテゴリと分類される住居では小児白血病との関連性が1.5倍程度で見られるが、現在の平均的な磁界を測定して求めた曝露から推定した場合、小児白血病の発生と磁界曝露との関連性は見られない。これまで公表されている研究の総合評価から、現在までの科学的証拠は電磁界への曝露がヒトの健康への障害となることは示していない。特に、居住環境での電磁界への曝露が、がん、有害な神経行動的な影響、あるいは生殖・成長への影響を生じさせることを示す決定的で一貫した証拠はなにもないと結論づけている。

#### 国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP 1998）<sup>29)</sup>

1998年4月に、下記の2段階の指針からなる電磁界の曝露ガイドラインを発表した。

基本制限：立証された健康への影響に直接基づいた時間的に変化する電界、磁界および電磁界曝露の制限を「基本制限」と定義している。この制限を示すのに使用する物理量は周波数によるが、電流密度（mA/m<sup>2</sup>）、比エネルギー吸収率（W/kg）および電力密度（W/m<sup>2</sup>）である。個人の曝露量を測定できるのは生体外の電力密度のみである。

参考レベル：このレベルは基本制限を越えるかどうかを判断するため、実際的に曝露評価を行うためのものと定義している。

測定および/または計算により、関連する基本制限か

ら導き出す参考レベルもあれば、電磁界への曝露の知覚および間接的な有害な影響を扱うものもある。基本制限から導き出す量は、電界強度 (V/m)、磁界強度 (A/m)、磁束密度 ( $\mu T$ )、電力密度 ( $W/m^2$ )、そして外肢を流れる電流 (mA) である。

知覚やその他の間接的影響を扱う量は、接触電流 ( $J_c$ ) と、パルスの場合、比エネルギー吸収である。いかなる特殊な曝露状況でも、これらの量の測定または算定量は、適切な参考レベルと比較することができる。

参考レベルを満たしていれば、関連する基本制限を満たすと考えられる。測定値や計算値が参考レベルを超えたとしても、必ずしも基本制限を越えるわけではない。しかし、参考レベルを超えた場合、関連する基本制限を満たしているかどうかを調べ、追加の防護措置が必要かどうかを検討する必要がある。

ICNIRP の前組織である IRPA の暫定ガイドライン (1990年) と、今回のガイドラインの違いを以下に示す。

1990年のガイドラインでは体内に誘導する電流密度で議論している。すなわち、職業曝露では  $10mA/m^2$ 、公衆曝露は  $2mA/m^2$  を設定基準においている。これに対して、今回のものは、参考レベルを周波数依存としている。このことは参考レベルが、50Hz と 60Hz で値が異なってくることを意味している。

また、「短時間」と「四肢」での参考レベルは職業曝露で、また、公衆曝露での「数時間」の制限は新しいガイドラインでは取り上げられていない。さらに、円状ループを用いたモデルも磁界参考レベルの算定には用いていない。

ICNIRP のガイドラインはその後各国が電磁界基準の策定をする際の重要な文書となっている。

### 米国国立健康科学研究所 (NIEHS 1999)<sup>30)</sup>

RAPID 最終報告書 (NIEHS と NAS/NRC-EPACT 1999) : 1992年の米国エネルギー政策法に基づき行われた RAPID 計画は 1999年6月に最終報告書が議会上程された。この最終報告書は以下の点が指摘されている。調査結果として、疫学研究からは原因と結果の関係を立証するには限界があるとしながら、磁界曝露が小児白血病と職業上曝露された成人における慢性リンパ性白血病の2通りのがんについて、疫学上弱い関連性があると科学的証拠が見られる。しかし、動物・細胞を対象に

した実験研究からは磁界と生物学的な作用変化との関連が支持されないため、電磁界曝露が健康にリスクをもたらす科学的証拠は弱いと結論付られた。また、この結果から電磁界問題に関して積極的な規制を設けるには科学的証拠が十分ではないとも指摘している。同時に、疫学研究を無視して電磁界が完全に安全であるとは認めるとはできないとし、電磁界の低減への取り組みや基礎的な研究は継続していくべきであるとしている。

### 全米科学アカデミー (1999)<sup>28)(32)</sup>

さらに、米国科学アカデミー - も契約に基づき、RAPID プログラムの活動と結果に対する評価報告書を 1999年5月20日に発表にした。この報告書では、研究資金は65億円/5年計画であったが、実際は43億円/4.3年であり、この資金により、工学的研究11件、生物学的研究61件が実施されたことを報告している。しかし、同報告書の結論は、NIEHS/DOE による最終結論と異なり、"RAPID 計画による生物学的研究からは磁界曝露とがんの関連性を支持する証拠はない"とし、"電気の使用が公衆への健康障害を有するとする議論を支持することはできない"としている。従って、今後、同類の研究プログラムに対して国民の税金を投入する必要性はないが、健康影響に関する情報提供は継続されるべきであると勧告している。

### 国際がん研究機関 (IARC 2002)<sup>31)</sup>

WHO の下部機関である IARC (1969年設立) は、がんの原因やメカニズムに関する研究の調整や指導、がん抑制のための科学戦略開発などを中心とした活動を進めている。これまで何百という化学物質、混合物および曝露環境の発がん性の評価に広く使われてきた確立したプロセスを遵守しているという点で価値がある。代表的なものはコラムの表に示す通りであり、グループ1が87種類、グループ2aが63種類、グループ2bが236種類、グループ3が486種類、グループ4が1種類である。IARC方式の検討対象になるのは発がん性の疑いがある作用因子であることと、評価プロセスそのものが保守的であるため、IARCによる評価は発がんの可能性を肯定する結果になる確率が高いとも見られる。

居住環境における低周波電磁界と小児白血病との関連性については弱いながらもこれを認める報告が見られる。

一方、動物実験や細胞実験ではその関連性を否定する報告が多い。発がん性評価の結果、商用周波磁界は、a) 疫学研究からは、小児白血病と居住環境磁界との関連性により、限定的 (limited) な証拠が見られる。その他のがんについての証拠は不十分である。b) 動物実験からは、不適切 (inadequate) な証拠がある。これらの総合評価として、商用周波磁界は発がん性を示す可能性がある (possibly carcinogenic to humans) 「グループ2b」とした。一方、商用周波電界、直流電界・磁界は、コラム表の「グループ3」に位置付けた。本結果は2002年3月にIARCモノグラフ80として発表された。

#### 4-4-2 国内

##### 資源エネルギー庁 (1993)<sup>33)</sup>

磁界影響に関する調査・検討を行った結果、「現時点において、居住環境で生じる商用周波磁界により、ヒトの健康に有害な影響があるという証拠は認められない。また、居住環境における磁界の強さは、世界保健機関の環境保健基準などに示された見解に比べ、十分低い」と結論している。これにより、ヒトの健康への影響を考慮した商用周波磁界に関する規制や基準を緊急に策定する必要性は小さいと判断し、科学的知見の蓄積に努めるとの観点から、以下のような活動を進めることが望ましいと指摘している。1) 磁界の発生源と曝露状況のより詳細な把握。2) 国内外における研究成果などの収集・評価と情報の整理。3) 磁界影響研究の一層の推進。このような報告を踏まえ、当所は国からの受託研究を進めており、我国における電磁界研究の一翼を担っている。

##### 環境省 (旧環境庁) (1992 1995 1999)<sup>34) 35) 36)</sup>

1987年以降に公表された低周波電磁界の生体影響に関する内外の文献を収集し、調査・評価した。1992年の報告書では、WHOの2文書の内容を越える情報はな

いと、低周波電磁界の生体影響に関しては従来の知見を特に修正する必要はないと結論した。さらに、居住環境における低周波電磁界を実測し、WHOの文書および他の文献が示しているデータと同程度であったことを報告している。

1995年の報告書では、WHOの2文章に示されている知見を修正するに足る報告はないとした上で、今後の課題として疫学的研究を行うに必要な技術的課題を解決し、具体的な研究手法を確立する必要があるとしている。

そして、1999年には、生活環境中の電磁界による健康リスクについての研究の現状を環境リスク評価の視点から評価すると共に、小児白血病の疫学調査を我が国で行う場合の方法論的な問題点をまとめている。その後、この報告書に基づいた形で、小児白血病についての疫学調査が進められた。

##### 電気学会 (1998)<sup>37)</sup>

同学会の電磁界生体影響問題調査特別委員会では、環境電磁界の調査・評価を行う作業部会と、生体への影響に関する調査・評価を行う作業部会を設置して、総合的な評価活動を行った。その結果、「電磁界の実態と実験研究の現状で得られた成果をもとに評価すれば、通常の居住環境における電磁界がヒトの健康に与えるとは言えない」と結論している。

今後の課題として、環境電磁界の評価では、電磁界測定方法の標準化、生体の複雑な構造に対して良い近似を与えるモデル化、及び日本での広範囲で統一的な実態調査を勧告している。一方、細胞レベルの実験では、磁界曝露とシグナル伝達、体内諸酵素活性、腫瘍細胞への磁界とホルモン応答、相互作用メカニズムの解明などの研究、動物レベルでは磁界曝露による乳腺腫瘍等の発生に対する影響の検討が重要であり、疫学調査においては個人の電磁界曝露量などの評価手法の開発が必要としている。

## 4 - 5 まとめと今後の課題

1960年代中葉以降、商用周波電磁界に曝露されることによるヒトの健康に与える影響が懸念され、数多くの研究が進められてきた。当初は電界の健康影響がクローズアップされ、1979年以降は磁界の影響問題が取り上げられるようになった。磁界の健康影響問題については、世界中で数多くの実験、調査研究が進められてきた。しかし、広範囲な研究成果から必要な情報を見つけ出し、その内容を分析・評価するには多くの時間を要する。特に、電磁界研究は医学、工学、生物学、社会科学など広い範囲にまたがった学際領域の研究分野であり、発表される研究結果は幅広い学術論文誌に掲載されるのが特徴である。本章では、国内外で行われている電磁界研究に関する研究動向の整理を行った。また、国際的な公的機関が電磁界問題をいかに分析・整理し、評価を加えているかをとりとまとめた。

多くの調査機関では現在まで、環境レベルで見られる電磁界はヒトの健康に悪影響を与えることはないとしている。一方、疫学調査結果から、商用周波磁界は発がん

の可能性があると評価が行われている(2b)。そのため、人間社会と環境との調和との観点から、生活環境にある電磁界も調和をはかる必要がある要因のひとつと見なされ、今後とも議論は継続されていくものと考えられる。

現在、WHOは2005年を目途に、直流から高周波領域までの電磁界の健康リスクを評価する研究を進めている。また、多くの国際機関や学協会において、電磁環境問題についての研究や情報交換が積極的に進められるようになってきた。これらの機関の研究・評価活動では、電磁界の生体およびヒトの健康影響への影響を明らかにすることはもとより、研究者と社会と間の認識の乖離をいかに解消していくかに努力が注がれている。これらの認識のずれを解消するため、関連情報が広く、正しく、かつ平易に社会に提供されることが必要であり、今後とも電磁界問題についての研究・評価活動は一層推進していくことが肝要と考えられる。

## コラム1：RAPID計画の成果に対する当所の評価

1992年のエネルギー - 政策法のもと、1993年より5ヶ年計画で、米国エネルギー省（DOE）と国立環境健康科学研究所（NIEHS）により、電力設備や電気の利用により低周波電磁界の潜在的な健康への悪影響の存在の有無を明らかにする研究ならびに、情報の一般公衆への提供を目的とした「電磁界の健康影響に関する研究計画」（通称、RAPID計画）が開始された。

多くのシンポジウムが開かれ、科学的知見の整理が行われた。その成果を踏まえ、1998年6月には最終報告書原案作成のために作業会が開催され、作業会報告書を公表した（<http://www.niehs.nih.gov/emfrapid/>）。

この作業会は疫学者11名、細胞や動物を対象にした研究者が17名、曝露評価関係の研究者が3名からなっていた。作業会報告書では商用周波磁界への曝露は、“電磁界は、ヒトに発がん性を有する可能性がある（ELF EMF are possibly carcinogenic to humans）”との見解を示した。

この見解は国際がん研究機関(IARC)の発がん性評価基準にもとづき疫学研究を重視した結果、磁界が小児白血病、職業者の慢性リンパ性白血病との関連性を示唆しているとの判断に基づいている。しかし、動物・細胞実験では磁界と発がんとの関連を示すことはできなかったため、IARCの評価基準から判断してランク2Bを選択している。ランク2Bには、わらび、漬物、コ・ヒ・などが含まれ

ている。

作業会報告書の公表後、世界からのパブリックコメントの受付や公聴会を経たのち、1999年6月に最終報告書が連邦議会に提出された。この最終報告書の内容の概要は以下の通りである。

これまでの疫学調査の結果は、磁界曝露と小児白血病、職業上曝露された成人の慢性リンパ性白血病の2通りのがんに弱い関連性があるとする科学的証拠が見られる。しかし、細胞や動物を用いた実験研究からは磁界と生物学的な変化との関連は支持されない。全体として、磁界曝露が健康にリスクをもたらす科学的証拠は弱い。

従って、これらの結果から磁界に関して積極的に規制を設けるには科学的証拠は十分ではないものの、疫学調査の結果を無視して磁界が完全に安全であると認識することもできない。今後とも、磁界の低減への取り組みや基礎的な研究は継続していくべきである。

これに対して、当所は1998年9月に米国ツ・ソンで開催された公聴会において、“作業会報告書は、1）疫学調査の評価が恣意的である、2）動物研究では影響は見られていない、3）細胞研究では再現性が確認されていない。

よって最終報告書は、科学的観点に立って評価を行い、誰もが納得のいくものであるべきである”との意見発表を行った。

## コラム2：コホート

疫学調査には、大別して、対象とする病気に患った人達と患らなかった人達の曝露の有無を調べる症例 - 対照調査と、曝露を受けたグループと曝露を受けなかったグループを追跡調査して疾患の有無を調べるコホート調査がある。

コホートは古代ローマの軍団の単位であり、300

人から600人の隊（中隊ないし大隊）のことである。このコホートの中から戦死者あるいは病死者を出して減っていくのを追跡調査したものをコホート調査と呼んだことに起因し、ある集団の追跡調査をコホート調査という。

### コラム3：国際がん研究機関（IARC）と発がん性評価

IARCによる評価は、ある作用因子のヒトに対する発がん性の評価を行うものである。これはヒトの疫学研究により評価が行われ、動物研究および関連研究による証拠が取り上げられている。発がん因子の最終的な分類は表2のようになる（日本

化学物質安全・情報センター1997）。

IARCの判定基準は、発がん性の確かさのみから判断され、発がん性の強さやそのメカニズムは判定基準外である。規制や立法についての作業は各国の行政府や国際機関に委ねられている。

表1 国際がん研究機関による発がん性評価（2001年4月現在）

グループ	グループの具体例
1 発がん性あり	コールタール、アスベスト、紙タバコ、アルコール飲料、ダイオキシン他87種類
2a おそらく発がん性あり	ディーゼルエンジンの排ガス、紫外線照射、木材防腐剤（クレオソート）他63種類
2b 発がん性を示す可能性がある	コーヒー、ゼリーや乳製品の安定剤（カラゲニン）、わらび、漬物、ガソリンエンジンの排ガス他236種類
3 分類できない	カフェイン、お茶、コレステロール他486種類
4 おそらく発がん性なし	カプロラクタム（ナイロンの原料）1種類

\* 分類は発がん性に対する科学的な証拠の確かさにより判断され、発がん性のリスクの大きさや発がんメカニズムは考慮されない。

表2 IARCの発がん性評価判定基準

グループ	疫学研究	動物実験	その他の関連研究
1	S LS	S <sup>(*1)</sup>	
2a	L L <sup>(*2)</sup> I	S S <sup>(*3)</sup>	
2b	L I I	LS S L	S
3	I I NG	IまたはL S <sup>(*4)</sup> NG	NG
4	LC I	LC LC	LCS

注) S：発がん性の十分な証拠、LS：発がん性の十分でない証拠、L：発がん性の限定された証拠、I：発がん性の不適切な証拠、NG：他のいずれのグループにも分類されない。LC：発がん性がないことを示唆する証拠、LCS：発がん性がないことを示唆する証拠が一貫して、且つ強く指示するデータ。S<sup>(\*1)</sup>：実験動物で発がん性の十分な証拠があり、且つ作用因子が曝露したヒトに実験動物と同じような発がんメカニズムで作用することを示す強力な証拠がある場合。L<sup>(\*2)</sup>：ヒトでの発がん性の限定した証拠のみがある場合。S<sup>(\*3)</sup>：実験動物で発がん性の十分な証拠があり、且つその発がん現象はヒトにおいても同様なメカニズムによって生ずるという強力な証拠がある場合。S<sup>(\*4)</sup>：実験動物での証拠が十分であるが、その実験動物での発がん現象のメカニズムがヒトでは同様に機能しないという強力な証拠がある場合。

## コラム4：予防原則

表 用心政策

	予防原則 (Precautionary Principle)	慎重なる回避 (Prudent Avoidance)	ALARA (合理的に達成できる限り低く)
解 釈	不確実性のあるリスクが予見される場合、当面の施策として費用・便益の原理に基づき他の同様なリスクに適用される政策と整合性を持って導入すべきもの。	リスクの存在が不明な場合、コストをなるべくかけないで行う。自発的な政策。	報告されている制限値を下回るレベルでも、存在すると推定し得るリスクを最小化する。
電磁界への適用	現段階のリスクに対する科学的な知見に基づくと電磁界への適用は条件を満たしていないように思われる。	政治的・経済的な判断として各国が導入するのは容認している。	リスクの存在が不明確なので適用できない。

(電気安全環境研究所 2001 より)

## コラム5：電気過敏症

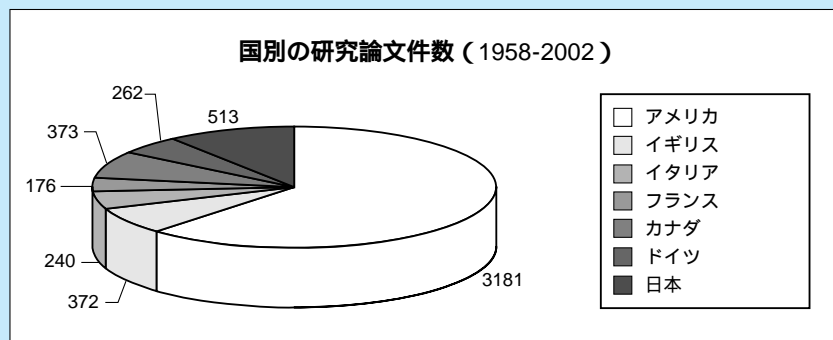
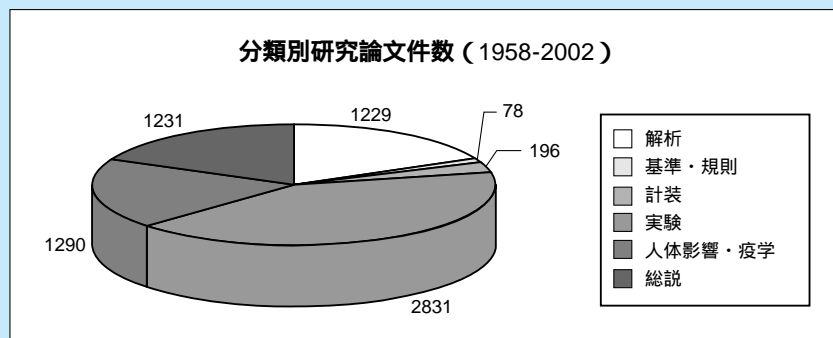
パソコンのモニター、蛍光灯、家電製品などの電気製品に接すると頭痛、目の疲れ、疲労感、皮膚のかゆみ、ヒリヒリ感などの症状や心理的影響が1970年以降に報告されるようになった(電気過敏症)。これらの電気過敏症と電磁界曝露の関係

明らかにしようとする実験が数多くなされているが、直接的な関連性を明らかにした報告はなされていない。しかし、電気過敏症と、化学物質過敏症、環境症など20世紀病で見られる症状との間に類似性があることを指摘する研究者もいる。

## コラム6：研究の現状 - グラフより -

電磁界研究は学際的な学問領域に位置しているため、多くの分野にまたがった研究がなされて

おり、研究もアメリカを中心に主に先進国で活発に行われているのが特徴的である。







第 5 章

5

総合評価

5 総合評価 .....	65
コラム7: .....	66
コラム8: .....	66

---

根岸 正 (8ページに掲載)

## 5 総合評価

高電圧や大電力技術の普及に伴い、送配電線等の電力設備から発生する商用周波電磁界（50/60Hz）の健康問題が関連学協会の議論の俎上に乗るようになり、一般社会もこれに関心を持つようになった。

当所でも1970年代以降、超高压電力設備に関わる環境問題の一つとして、電磁界の生体影響研究に着手した。初期の段階では、電界の生物影響に主眼をおき、研究情報の整理・分析・評価および海外の専門研究機関との共同研究を通して、知見の蓄積と当所研究員の育成を図った。

米国を中心に、社会の関心が電界から磁界に移行した1990年代以降、当所における電磁界研究も、商用周波数を中心とした極低周波磁界に重点をおき、生物学的、電気工学的、社会科学的な研究を推進してきた。

従来、多くの生物学的研究結果には再現性に問題があったり、系統的な研究があまりなく、断片的な研究結果が報告されてきた。そこで、当所は生活、職場環境の商用周波磁界の実態を明確に知るために、電磁界の計測、計算技術の開発や生物学的実験に際して、正確な磁界を曝露できる各種の磁界曝露設備の設計・製作を行ってきた。そして、生物学的研究においては、「一部の疫学調査が示唆する商用周波磁界の健康影響に科学的根拠があるのであれば、微生物、培養哺乳類細胞や実験動物に磁界を曝露することにより、それを示唆する生体反応が引き起こされるはずである」という研究作業仮説を設定し、広範囲の磁界曝露実験を行ってきた。さらに、国内外での本分野の研究動向にも注目し、広範囲な調査を実施しつつ、常に、科学的・客観的な評価結果を社会に発信してきた。

その結果、最近約10年間の当所が精力的に行ってきた研究成果、および、内外の研究成果も含めて総合的に分析・評価し、「少なくとも、現在の生活及び職場環境における極低周波電磁界が、われわれの健康に有害な影響を与えるという科学的証拠は認められない」との認識に達した。

最後に、これら一連の研究の実施に当たっては、所内

に設置した電磁界研究評価委員会（委員長：加藤正道北海道大学名誉教授、参考資料1）委員の方々に、本問題に関わる我が国の幅広い学術分野の専門家集団として、当所の関連研究の計画、成果の評価に、あるいは、関連情報の分析・評価に、継続的かつ適切な指導を戴いた。記して、謝意を表したい。

さらに、当所の関連研究員、協力会社を始め、関係機関からの派遣研究員、技術員には、本研究遂行に当たって、多大な協力と支援を戴いた。彼らの協力と支援なくして、本レビューに取り上げたような研究成果は望むべくもない。

以上の方々に、ここに深甚なる謝意を表します。

### 参考資料1

2002年6月30日現在

#### 電磁界研究評価委員会名簿

	氏名	所属
委員長	加藤 正道	北海道大学 名誉教授
委員	伊坂 勝生	徳島大学工学部 教授
	上野 照剛	東京大学医学系研究科 教授
	上出 利光	北海道大学遺伝子病制御研究所 教授
	大津 祐司	環境科学技術研究所 前・特任相談役
	草間 朋子	大分看護科学大学学長（教授）
	多氣 昌生	東京都立大学工学研究科電子工学 専攻 教授
	田ノ岡 宏	電力中央研究所 名誉研究顧問
	松原 謙一	大阪大学 名誉教授
	三谷 啓志	東京大学大学院新領域創成科学 研究科 助教授
	政田 正弘	千葉大学園芸学部 教授
	上之園 博	電力中央研究所 名誉特別顧問

## コラム7

私がEMF問題に係わったのは、昭和61年6月管理部長に就任した時からである。丁度その時、日米科学技術協力協定の下でEMF問題が取り上げられ、電中研が資源エネルギー庁の委託を受け、米国DOEの委託を受けたテキサス州サンアントニオにあるサウスウエスト研究所とのパブーン（ヒヒ）を用いた共同研究がスタートした。これまで、電界問題について共同研究は行ってきたが、磁界問題は初めての経験であり、ヒヒの実験環境に均一な磁界を作る装置の設計や実験条件の設定、DOEとの予算交渉などに苦労したことは、楽しい思い出の一つである。

この同時期にテキサス大学・萩野教授とマウスを用いた共同研究をスタートさせた。この研究により、マウスによる解剖学的・細胞学的研究の基本的な方法がマスターでき、現在の研究に継続されており、かつまた当所の研究成果が関係の学会で高く評価される要因となっていることは誠に同慶の至りである。

この種の研究で最も重要なことは、研究成果の学術的な忠実性は勿論のこと、社会的にも中正・

公平性が容認されなければならない、これがため、加藤北海道大学名誉教授他専門の諸先生より、研究成果の厳密な評価をお願いしていたが、ただ学会等に発表するだけでは、この世界的なマスコミなどによる風評に影響を与えることは殆ど不可能に近かった。

そこで、当時の資源エネルギー庁・並木電力技術課長、東京電力岩崎副社長（現TTnet会長）と御相談し、社会に研究成果をPRすることとした。このような環境問題を積極的にPRした前例はなく、危惧すべき点はあったが実施に踏み切った。このことは研究者の自信に繋がり、同時に世論の正常化にも大いに役立ったと信じている。

この研究は、まだまだ問題が残されている。今まで以上に、目標達成に努力されることを願って止まない。



電力中央研究所 名誉特別顧問  
上之園 博

## コラム8

電磁界問題は、電中研が取り上げた社会問題の内、原子力、環境アセスに続く3番目の課題だと思えます。社会問題を研究する場合、様々な実験や分析を通して現象を学術的に解明するのみならず、上之園名誉特別顧問も述べておられるように、成果を社会に公表して行くことが肝要と思えます。

しかも、関連学協会に専門の論文として発表するのみでは不十分で、その意味するものを平易にかみ砕いて、一般の方にも理解して戴ける形にすることも重要で、これまでの電中研の研究成果を普通の言葉で集大成した、この電中研レビューも、この活動の一環として大変有意義なことと思えます。

わが国における電磁界問題は、90年代後半にマスコミ主導型で問題提起された訳ですが、この問題が電気工学、生物学などの学術分野を中心とした学際領域の課題であるため、一般の方々にとってはなかなか分かり難く、情報不足と憶測が先行したように思います。

これに対して、保健物理学会、電気学会など関連学協会では、早くから現象の解明、分析に力を

入れられるのみならず、マスコミや一般社会に情報を発信してこられました。また、行政においても傘下の国立研究所で様々な実験研究、調査を行い、現在でもなお精力的に研究を進めておられます。

国際的には、米国のRAPID計画を中心とした活発な動きに続いて、現在も世界保健機関がプロジェクトとして、情報の共有化、リスク評価などの活動を行っています。

このような時期に、この電中研レビューを発刊されることは、電中研にとって一つの区切りではありますが、本問題が取り上げている電気、生物学的現象は、学術的に全て解明できたとはとてもいえる段階ではありません。

電中研は、学術研究機関として今後もさらに研究を着実に進め、その成果を社会に還元して行かれますことを信じ、また期待いたします。



前電力中央研究所研究顧問  
笹野 隆生

# お わ り に

理事 狛江研究所長 福島 充男



私たちの生活にとって、電気は水や空気と同じように、今や、なくてはならない存在となっている。このように便利で安全な電気に伴う電磁界が、私たちの健康に「何の影響もなく安全」であることを、「科学的に完全に証明」できたらどんなに良いであろうか。しかし、「ない」ことの完全な証明は、残念ながら、一般的に不可能である。逆に、「ある」の証明は容易で、たとえ一例でも、「ある」ことが実証できれば、それで証明終わりである。しかし、「ない」の証明では、ほとんど全ての場合について実証が完了しても、さらに、このような場合はどうか、あのようなケースではどうかという疑問が残る。原

理的には疑問は無限に存在し、「ない」の実証は無限の努力の連鎖となる。また、数十年間も曝露した時の影響などは、現実的には検証不可能であろう。フェルマーの大定理や四色問題など、「ない」ことを科学的に厳密に証明できる数学の世界がうらやましい。しかし、その数学でも「公理系に矛盾のないことの証明は不可能」という、ゲーデルの不完全性定理がある。

そこで、もし、私たちの身の回りの電磁界が、健康に何らかの影響があるとすれば、十分に高いレベルの電磁界に対しては、その現象が明確に、かつ短期間で顕れるであろうと考えてみた。そして、そのような現象が、身の回りのレベルの電磁界でも発現するかを、科学的に検証することにした（研究作業仮説の設定）。また、すでに疑問が提出されている現象についても、独自の実験や論文の詳細な評価により、一つひとつ検証してきた。この結果として、「少なくとも現在の生活および職場環境における商用周波数電磁界が、健康に悪影響を与えるという科学的根拠はない」との認識に達した。

これが現時点での、合理的な努力の範囲での、われわれの結論であり、二十数年間にわたって進めてきた電磁界研究に、一応の区切りをつけたものと信じる。もちろん、今後とも、世界の最新情報に鋭敏にアンテナを巡らす努力を継続し続けることは言うまでもない。

ここに至るまでに、「電磁界研究評価委員会（委員長；加藤正道北海道大学名誉教授）の委員の先生方をはじめ、大学、官、そして電気事業からの、多くの方々のご指導、ご助力を戴いた。厚く感謝申し上げるとともに、今後とも引き続き、ご支援、ご鞭撻を賜るようお願い申しあげたい。

## 引用文献・資料等

### 第1章

Asanova.T.P, Rakov.A.L, "The state of health of persons working in the electric field of outdoor 400 and 500kV switchyards",Gig Trud Prof Zabol 10 50 - 52p, ( 1966 )

才 - ム社編、"電気設備技術基準"、通商産業省令 第70号、昭和51年

Ahlbom, et al, "Biological effects of power line fields - Panel's Final Report.1 - ", New York State Power Lines Project ( 1987 )

Wertheimer.N, Leeper.E, "Electrical wiring configuration and childhood cancer", Am J. Epidemiology, 109 273 - 284p, ( 1979 )

Savitz.D.A, et al, "Case-Control study of childhood cancer and exposure to 60 Hz magnetic fields", Am. J Epidemiol., 128, 21-38p ( 1988 )

WHO,"Magnetic fields", Environmental Health Criteria 69, ( 1987 )

Congress of the US Office of Technology Assessment, "Biological effects of power frequency electric and magnetic fields", ( 1989 )

National Research Council, "Possible health effects of exposure to residential electric and magnetic fields", National Academy Press, 1-356p, ( 1997 )

NIEHS, "Health Effects from Exposure to Power - Line Frequency Electric and Magnetic Fields", NIH Publication No. 99 - 4493, ( 1999 )

<http://www.who.int/peh-emf/summary.htm>

Rogers W.R, et al, Bioelectro-magnetics, Supplement No. 3, ( 1995 )

Kato.M, Shigemitsu.T, "Effects of 50-Hz magnetic fields on pineal function in the rat. The Melatonin Hypothesis: breast cancer and use of electric power", 337 - 376p Editor: Stevens. R. G, Wilson. B. W. and Anderson.L.E, ( 1997 )

根岸正、他：「商用周波磁界の生物影響研究」、電中研総合報告 U42 ( 2001 )

### 2章

Kato. M, Honma. K, Shigemitsu. T, Shiga. Y, "Effects of circularly polarized sine wave 50Hz magnetic field exposure on plasma and pineal melatonin levels of rats", Bioelectromagnetics, 14, 97-106p ( 1993 )

Yellon. S. M, et al, "60 Hz magnetic field exposure effects on the melatonin rhythm and photoperiod control of reproduction", Am. J. Physiol., Endocrinol.

Metabolism, 33, 816-821p ( 1996 )

Liburdy. R. P, et al., "ELF magnetic fields, breast cancer and melatonin: 60 Hz fields block melatonin's oncostatic action on ET+breast cancer cell proliferation", J. Pineal Res. 14, 89-97p ( 1993 )

Goodman.R, et al, "Exposure to human cells to low-frequency electromagnetic fields results in quantitative changes in transcripts", Biochem. Biophys. Acta, 1009, 216-220p ( 1989 )

Liboff. R, P, et al,"Ca<sup>2+</sup> - 45 cyclotron resonance in human lymphocytes", J. Bioelectr. 6, 13-22p ( 1994 )

Liburdy. R. P, "Calcium signaling in lymphocytes and ELF fields. Evidence for an electric field metric and site of interaction involving the calcium ion channel", FEBS Letter 301, 53-59p ( 1992 )

Lindstrom. E, et al, "Intracellular calcium oscillations induced in a T-cell line by a weak 50 Hz magnetic field", J. Cell Physiol. 156, 395-398p ( 1993 )

Lyle.D.B,et al, "Intracellular calcium signaling by Jurkat T-lymphocytes exposed to a 60 Hz magnetic field", BEMS J. 18, 439-445p ( 1997 )

Fritz. L. K, et al, "Investigation of EMF-induced calcium mobility in oxidatively stressed HL-60 cells", Abstract Book of 18th Annual Meeting of BEMS P-37A, ( 1996 )

西村泉、他、「磁界曝露が細胞内カルシウムの変動に与える影響」、電中研研究報告U96031 ( 1997 )

Nishimura, I., et al., "Linearly and circularly polarized, 50Hz magnetic fields did not alter intracellular calcium in rat immune cells.", Ind Health 37: 289-299p ( 1999 )

小田毅：「ラット神経細胞（小脳顆粒細胞）のチロシンのリン酸化に対する50Hz磁界の影響」、電中研研究報告U00076 ( 2001 )

中園聡、他：「大腸菌のタンパク質発現におよぼす極低周波磁界の影響」、電中研研究報告 U97095 ( 1997 )

中園聡、他：「酵母をモデル細胞として用いた商用周波磁界の遺伝子発現におよぼす影響」、電中研研究報告 U00009 ( 2000 )

Nakasono. S, et al., "Effect of ELF Magnetic Fields on Protein Synthesis in Escherichia coli K12", Radiation Res., 154, 208-216p ( 2000 )

Miyakoshi J., et al., "Increase in hypoxanthine-guanine phosphoribosyl transferase gene mutation by exposure to high-density 50Hz magnetic field", Mutation Res. 349, 109-114p 1996 )

Ikehata.M., et al., "Mutagenicity and co-mutagenicity of static magnetic fields detected by bacterial mutation assay", Mutation Res., 427, 147-156p ( 1999 )

中園聡、他：「商用周波磁界の変異原性及び助変異原性

- におよぼす影響・サルモネラ菌および大腸菌を用いた微生物変異原性試験による評価」、電中研研究報告 U98039 (1999)
- Nakasono. S., et al., "Lack of mutagenic and co-mutagenic potential of 50Hz, 14mT magnetic field in bacterial mutation assay", *Mutation Res.*, 471, 127-134p (2000)
- 西村泉：「磁界の生物影響に関する調査(その3)：免疫研究の現状と進め方」、電中研調査報告 U95032 (1996)
- (21) 窪田ひろみ、他：「商用周波磁界と免疫系(その3) 50 Hz、14 mTrmsの磁界に曝露したマクロファージの酸化窒素とサイトカインの産生能」、電中研研究報告 U98042 (1999)
- (22) Morandi, M. A. et al., "Effects of short term exposure to 60Hz electromagnetic fields on interleukin 1 and interleukin 6 production by peritoneal exudate cells." *Life Science* 54, 731-738p (1994)
- (23) 窪田ひろみ、他：「商用周波磁界と免疫系(その5) 1.4 ~ 14 mTrms回転円、及び1 ~ 10mTrms垂直磁界曝露がマクロファージの貪食能に及ぼす影響」、電中研研究報告 U00008 (2000)
- (24) Droste, S. and M. Simko, "Studies to the phagocytic activity, intracellular transport and free radical production in mouse bone marrow-derived macrophages after exposure to 50Hz EMF." Abstract Book, Twenty-first Annual Meeting of Bioelectromagnetics Society P-31 (1999)
- (25) 西村泉、他：「1.0  $\mu$  Trms水平及び1.4  $\mu$  Trms回転円磁界に曝露した抗 CD3抗体刺激マウスのサイトカイン産生」、電中研研究報告 U97081 (1997)
- (26) 西村泉、他：「商用周波磁界と免疫系(その2) 回転磁界に曝露した抗 CD3抗体刺激マウスのサイトカイン産生」、電中研研究報告 U98041 (1999)
- (27) Petrini.C,et al, "Tumor necrosis factor and interferon production by human peripheral blood mononuclear cells exposed in vitro to sinusoidal 50Hz magnetic fields", *Bioelectrochem. Bioenerg.* 44, 121-125p (1997)
- (28) Bonneville Power Administration, "Joint HV AC Transmission EMF Environmental Study: Final Report on Experiment 3." Contract DE-B179-90BP04293 (1994)
- (29) 西村泉、他：「商用周波磁界と免疫系(その4) 350  $\mu$  T回転円磁界の24週間曝露が白血病マウスのサイトカイン産生にあたる影響」、電中研研究報告 U99067 (2000)
- (30) Bellossi.A, "Effect of pulsed magnetic fields on leukemia-prone AKR mice. No effect on mortality through five generations", *Leukemia Res.* 15, 899-902 p (1996)
- (31) Sasser. L, B, et al, "Exposure to 60 Hz magnetic fields does not alter clinical progression of LGL leukemia in Fischer rats", *Carcinogenesis* 17, 2681-2687p (1996)
- (32) 根岸正、他：「60Hz電磁界がヒヒの学習・社会行動およびメラトニン分泌に及ぼす影響」、電中研研究報告 U92303 (1993)
- (33) Matsushima. S., et al., "Effect of magnetic field on pineal gland volume and pinealocyte size in the rat.", *J. Pineal Res.* 14, 145-150p (1993)
- (34) Kato. M., et al., "Circularly polarized 50Hz magnetic field exposure reduces pineal gland and blood melatonin concentrations of Long-Evans rats.", *Neuroscience Letters*, 166, 59-62p (1994)
- (35) Kato. M., et al., "Horizontal or vertical 50Hz, 1  $\mu$  T, magnetic fields have no effect on pineal gland or plasma melatonin concentration of albino rats.", *Neuroscience Letters*, 168, 205-208p (1994)
- (36) Kato. M., et al., "Circularly polarized, sinusoidal, 50Hz magnetic field exposure does not influence plasma testosterone levels of rats.", *Bioelectromagnetics*, 15, 513-518p (1994)
- (37) Kato. M., et al., "Recovery of nocturnal melatonin concentration takes place within one week following cessation of 50Hz circularly polarized magnetic field exposure for six weeks.", *Bioelectromagnetics*, 15, 489-492p (1994)
- (38) 重光司、笹野隆生：「実験動物のメラトニン分泌に及ぼす商用周波磁界の影響」、電気学会 磁気と生体作用と磁気計測技術調査専門委員会 (1995)
- (39) 加藤正道、重光司：「メラトニンへ及ぼす磁界影響」、電気学会 マグネティクス研究会 MAG 96-13 (1996)
- (40) Kato. M. Shigemitsu.T., "Effects of exposure to a 50Hz magnetic field on melatonin in rats.", In *Biological effects of Magnetic and Electromagnetic Fields (Ed) S.Ueno*, 121-129p Plenum Press (1996)
- (41) Kato. M., Shigemitsu. T., "Effects of 50-Hz magnetic fields on pineal function in the rat.", *The Melatonin Hypothesis: breast cancer and use of electric power*, 337-376p Ed: Stevens. R.G, Wilson.B.W and Anderson. L. E (1997)
- (42) Kato. M. Shigemitsu.T., "Effect of ELF-magnetic field exposure on melatonin secretion in animals.", *日本生体磁気学会大会論文集 vol.9. No.1* (1997)
- (43) 重光司、他：「電磁界と概日リズムに関する予備検討」、電気学会 マグネティクス研究会 MAG-92-103 (1992)
- (44) 重光司、他：「実験動物の自発運動の検出および概日リズムに対する磁界曝露の影響」、電中研研究報告 U94301 (1994)
- (45) 根岸正、他：「実験小動物における50Hz回転円磁界の生殖への影響」、電中研研究報告 U97081 (1998)

- (46) 資源エネルギー - 庁 : 「電力設備環境影響調査」平成 8 年度調査報告書 ( 1997 )
- (47) Negishi, T., et al., "Studies of 50 Hz circularly polarized magnetic fields of up to 350  $\mu$  T on reproduction and embryo-fetal development in rats: Exposure during the period of organogenesis or during the preimplantation period." *Bioelectromagnetics*, 23, 369-389p ( 2002 )
- (48) 資源エネルギー - 庁 : 「電力設備環境影響調査」、平成 10 年度調査報告書 ( 1999 )
- (49) Negishi, T., et al., "Effects of 50 Hz circularly polarized magnetic fields on spontaneous mammary tumors in rats." 21st Annual Meeting of BEMS, ( 1999 )
- (50) NTP, "Toxicology and carcinogenesis studies of 60Hz magnetic fields in F344/N rats and B6C3F1 mice ( whole body exposure studies )", National Toxicology Programs' Research, Triangle Park NC ( 1998 )
- (51) Yasui, M., et al, "Carcinogenesis test of 50 Hz sinusoidal magnetic fields in rats", *Bioelectromagnetics*, 18, 531-540p ( 1997 )
- (52) 資源エネルギー - 庁 : 「電力設備環境影響調査」、平成 11 年度調査報告書 ( 2000 )
- (53) Imai, S., et al., "Effects of 50 Hz horizontally polarized magnetic fields on chemically induced mammary tumors in rats." 22nd Annual Meeting of BEMS, ( 2000 )
- (54) Negishi, T., et al., "A histopathological study on the effect of 50 Hz horizontally polarized magnetic fields on DMBA-induced mammary gland tumors in rats." Millennium International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields, ( 2000 )
- (55) Löscher, W., et al, "Effects of weak alternating magnetic fields on nocturnal melatonin production and mammary carcinogenesis in rats", *Oncology*, 51, 288-295p ( 1994 )
- (56) Boorman, G. E., et al, "Effect of 26 week magnetic field exposure in a DMBA initiation-promotion mammary gland model in Sprague-Dawley rats", *Carcinogenesis*, 20, 899-904p ( 1999 )
- (57) 資源エネルギー - 庁 : 「電力設備環境影響調査」、平成 12 年度調査報告書 ( 2001 )
- (58) Rannug A et al, "A study on skin tumour formation in mice with 50 Hz magnetic field exposure.", *Carcinogenesis*, 14, 573-578p ( 1993 ) .
- (59) McLean J.R, et al, "The effect of 60-Hz magnetic fields on co-promotion of chemically induced skin tumors on SENCAR mice: a discussion of three studies.", *Environ. Health Perspect.*, 105, 94-96p ( 1997 ) .
- (60) Sasser L. B., et al, "Lack of a co-promoting effect of a 60 Hz magnetic field on skin tumorigenesis in SENCAR

mice.", *Carcinogenesis*, 19, 1617-1621p ( 1998 )

### 3章

- Kaune, W. T.: "Analysis of magnetic fields produced far from electric power lines", *IEEE Trans Power Delivery*, 7, 2082-2091p ( 1992 )
- Zaffanella, L. E., Sullivan, T. P. and Visintainer, I.: "Magnetic fields characterization of electrical appliances as point sources through in situ measurement" *IEEE Trans Power Delivery*, 12, 443-450p ( 1997 )
- Deno, D. W.: "Transmission line fields" *IEEE PAS*, 95, 1600-1611p ( 1976 )
- 山崎健一・藤波秀雄 : 「 3 次元交流磁界の特性評価パラメータと多機能型磁界測定器の開発」、電力中央研究所研究報告、T95047 ( 1995 )
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection ( ICNIRP ) : "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields ( up to 300 GHz )", *Health Physics*, 74, 494-522p ( 1998 )
- Xi, W, M. A. Stuchly, O. P. Gandhi: "Induced electric currents in models of man and rodents from 60 Hz magnetic fields", *IEEE Trans Biomedical Engineering*, 41, 1018-1023p ( 1994 )
- Bottauscio, O, R. Conti: "Magnetically and electrically induced currents in human body models by ELF electromagnetic fields", *Proceeding of 10th ISH*, Vol. 6, 5-8p ( 1997 )
- Dawson, T. W, K. Caputa, M. A. Stuchly: "Influence of human model resolution on computed currents induced in organs by 60-Hz magnetic fields", *Bioelectromagnetics*, 18, 478-490p ( 1997 )
- Baraton, P, B. Hutzler: "Magnetically induced currents in the human body", *IEC Technology Trend Assessment* ( 1995 )
- Miller, D. L: "Miniature-probe measurements of electric fields induced by 60 Hz magnetic fields in rats", *Bioelectromagnetics*, 17, 167-173p ( 1996 )
- Gabriel, S, R. W. Lau, C. Gabriel: "The dielectric properties of biological tissues: Measurements in the frequency range 10 Hz-20 GHz. *Physics in Medical and Biology*, 41, 2251-2269p ( 1996 )
- 山崎健一・河本正・重光司 : 「低周波磁界による生体内誘導電流分布の基礎的検討」、電気学会論文誌、116-C, 193-199p ( 1996 )
- 河野照哉・宅間董 : 「数値電界計算法」、コロナ社 ( 1980 )
- 河本正・山崎健一・藤波秀雄 : 「低周波電磁界による生



- 体内誘導電流の新計算法」、電中研研究報告 T97048 (1998)
- 山崎健一・河本正・藤波秀雄・重光司：「低周波磁界による人体内誘導電流評価 - 定量的評価手法の開発と臓器導電率の影響 - 」、電気学会論文誌、120-A、369-370p (2000)
- 山崎健一・河本正・藤波秀雄・重光司：「低周波磁界と人体内誘導電流に関する考察 - 誘導電流換算モデルの比較 - 」、電気学会論文誌、120-A、81-87p (2000)
- Kirschvink.J.L.: "Uniform Magnetic Fields and Double-Wrapped Coil Systems: Improved Techniques for the Design of Bioelectromagnetic Experiment", *Bioelectromagnetics*, 13, 401 ~ 411p (1992)
- 重光司・菅沼浩敏：「動物実験用低磁界発生装置の開発」、電中研研究報告 U90035 (平2-9)
- Yamazaki. K, H. Fujinami, T. Shigemitsu, I. Nishimura: "Low stray ELF magnetic field exposure system for in vitro study", *Bioelectromagnetics* 21, 75-83p (2000)
- Mullins. R. D, J. E. Sisken, H. A. N. Hajase, and B. F. Sisken: "Design and Characterization of a system for Exposure of Cultured Cells to Extremely Low Frequency Electric and Magnetic Fields Over a Wide Range of Field Strength", *Bioelectromagnetics* 14, 173-186p (1993)
- (21) Miyakoshi. J, N. Yamagishi, S. Ohtsu, K. Mohri, and H. Takebe: "Increase in Hypoxanthine-Guanine Phosphoribosyl transferase Gene Mutations Exposure to High-Density 50-Hz Magnetic Fields", *Mutation Research*, 349, 109-114p (1996)
- (22) Yasui. M, Y. Ohtaka: "Facility for Chronic Exposure of Rats to ELF Magnetic Fields", *Bioelectromagnetics*, 14, 535-544p (1993)
- (23) Wilson. B. W, K. Caputa, M. A. Stuchly, J. D. Saffer, K. C. Davis, C. E. Washam, L.G. Washam, G. R. Washam, and M. A. Wilson: "Design and Fabrication of Well Confined Uniform Magnetic Field Exposure Systems", *Bioelectromagnetics*, 15, 563-577p (1994)
- (24) Merritt. R, C.Purcell, and G.Stroink: "Uniform Magnetic Field Produced by Three, Four, Five Square Coils", *Rev. Sci. Instrum.*, 54, 7, 879 ~ 882p (1983)
- (25) Harvey.S.M.: "Magnetic Field Rodent Reproductive Study ( MFRRS ) Exposure System", Ontario Hydro Research Division Report 88-125-K (1988-5)
- Wertheimer.N, Leeper.E, "Electrical wiring configuration and childhood cancer", *Am. J. Epidemiol.*, 109, 273-284p (1979)
- WHO, "Extremely Low Frequency ( ELF ) Fields", *Environmental Health Criteria* 35, (1984)
- WHO, "Magnetic Fields", *Environmental Health Criteria* 69 (1987)
- IRPA/INIRC, "Interium guideline on limits of exposure to 50/60Hz electric and magnetic fields" *Health Physics* 58, 113-122p (1990)
- Floderus. B. T et al: Occupational exposure to electromagnetic fields in relation to leukemia and brain tumors - a case-control study in Sweden. *Cancer causes and Control* 4 465-476p (1993)
- Sahl. J. D et al: Cohort and nested case-control studies of hematopoietic cancers and brain cancer among electric utility workers. *Epidemiology* 4 104-113p (1993)
- Theriault.G.M et al: Cancer risks associated with occupational exposure to magnetic fields among electric utility workers in Ontario and Quebec, Canada, and France; 1970-1989. *Am J Epidemiol* 139 550-572p (1994)
- Savitz. D. A et al: Magnetic field exposure in relation to leukemia and brain cancer mortality among electric utility workers. *Am J Epidemiol* 141 123-134p (1995)
- Severson. R. K et al: Acute nonlymphocyte leukemia and residential exposure to power frequency magnetic fields. *Am J Epidemiol* 128 10-20p (1988)
- Feychting. M et al: Magnetic fields, leukemia and central nervous system tumors in Swedish adults residing near high-voltage power lines. *Epidemiology* 5 501-509p (1994)
- Verkasalo. P. K et al: Magnetic fields of high voltage power lines and risk of cancer in Finnish adults: national wide cohort study. *Br Med J* 313 1047-1051p (1996)
- Savitz. D. A, et al, "Case-Control study of childhood cancer and exposure to 60 Hz magnetic fields", *Am. J. Epidemiol.*, 128, 21-38p (1988)
- London. S. J et al: Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia. *Am J Epidemiol* 134 923-937p (1991)
- Olsen. J. H et al: Residence near high voltage facilities and risk of cancer in children. *Br Med J* 307 891-895p (1993)
- Feychting. M et al: Magnetic field and cancer in children residing Swedish high voltage power lines. *Am J Epidemiol* 138 467-481p (1993)

#### 4章

Asanova. T. P, Rakov. A. L, "The state of health of persons working in the electric field of outdoor 400 and 500kV switchyards", *Gig. Trud. Prof. Zabol.*, 10. 50-52p (1966)

- Verkasalo. P. K et al Risk of cancer in Finnish children living close to power lines. Br Med J 307 895-899p ( 1993 )
- Linnet. M. S et al: Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic leukemia in children. New England J Med 337 1-7p ( 1997 )
- McBride. M. L et al: Power frequency electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia in Canada. Am J Epidemiol 149 831-842p ( 1999 )
- Green. L. M et al: A case-control study of childhood leukemia in Southern Ontario, Canada, and exposure to magnetic fields in residences. Int J Cancer 82 161-167p ( 1999 )
- (21) United Kingdom Childhood Cancer Study Investigators: Exposure to power frequency magnetic fields and the risk of childhood cancer. Lancet 354 1925-1931p ( 1999 )
- (22) NIEHS Working Group Report, "Assessment of Health Effects from Exposure to Power-line Frequency Electric and Magnetic Fields", NIH Publication No. 98-3981 ( 1998 )
- (23) 厚生省大臣官房統計情報部編：平成5年人口動態統計 ( 1994 )
- (24) Congress of the United States Office of Technology Assessment, "Biological effects of power frequency electric and magnetic field". ( 1989 )
- (25) NRPB, "Electromagnetic fields and the risk of cancer", Report of an advisory group on non-ionizing radiation. Documents of the NRPB, vol 3 ( No. 1 ) , ( 1992 )
- (26) Sienkiewicz. Z. J, et. al., "Biological effects of exposure to non-ionizing electromagnetic fields and radiation 2. Extremely low frequency electric & magnetic fields", National Radiological Protection Board ( 1991 )
- (27) NRPB Document of the NRPB: ELF electromagnetic fields and the risk of cancer. Vol 12 ( 2001 )
- (28) NRC, "Possible Health Effects of Exposure to Residential Electric and Magnetic fields", National Academy Press ( 1997 )
- (29) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection ( ICNIRP ) , "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields ( up to 300 GHz ) ", Health Physics, 74, 4, 494-522p ( 1998 )
- (30) NIEHS/DOE,"NIEHS REPORT on health effects from exposure to power-line frequency electric & magnetic fields", NIH Publication No. 99-4493 ( 1999 )
- (31) IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans Vol 80 Non-Ionizing radiation, part 1: static and extremely low-frequency ( ELF ) electric and magnetic fields ( 2002 )
- (32) NAS/NRC, "Research on power-frequency fields completed under the Energy Policy Act of 1992", National Academy Press ( 1999 )
- (33) 資源エネルギー庁・電磁界影響調査検討会、"電磁界影響に関する調査・検討報告書"、平成5年12月
- (34) 日本環境協会、"電磁環境の安全性に関する調査研究"、平成4年3月
- (35) 日本環境協会、"電磁環境の健康影響に関する調査研究"、平成7年3月
- (36) 日本環境協会、"生活環境中の電磁界の健康影響評価と安全対策に関する調査"、平成11年3月
- (37) 電気学会・電磁界生体影響問題調査特別委員会、"電磁界の生体影響に関する現状評価と今後の課題"、平成10年10月

## 既刊「電中研レビュー」ご案内

- NO. 32 「人間と技術の調和に向けて ヒューマンファクター研究 」1995. 3  
NO. 33 「放射線ホルミシス 研究の意義と取り組み 」1996. 3  
NO. 34 「ガスタービン研究 高効率発電の主角を担う 」1997. 1  
NO. 35 「地下の探査・可視化技術」1997. 5  
NO. 36 「送電線コンパクト化技術の開発 高分子材料の適用 」1998. 3  
NO. 37 「乾式リサイクル技術・金属燃料FBRの実現に向けて」2000. 1  
NO. 38 「大気拡散予測手法」2000. 3  
NO. 39 「新時代に向けた電力システム技術」2000. 6  
NO. 40 「原子燃料サイクルバックエンドの確立に向けて」2000. 11  
NO. 41 「需要家と電気事業のエネルギーをトータルで考える  
需要家の特性解明と省エネ技術 」2000. 11  
NO. 42 「原子力発電所の人工島式海上立地」2001. 1  
NO. 43 「酸性雨の総合評価」2001. 2  
NO. 44 「石炭ガス化複合発電の実現に向けて  
実証機開発の支援と将来への研究展開 」2001. 10  
NO. 45 「地球温暖化の解明と抑制」2001. 11  
NO. 46 「微粉炭火力発電技術の高度化  
環境性の向上と発電コストの低減 」2002. 11

## 編集後記

電磁界と健康影響の問題は、古くより科学的に議論されてきたが、社会の関心が電界から磁界に移行した1990年代以降、当所では商用周波数を中心とした極低周波磁界の健康影響に重点をおき、工学的・生物学的・社会科学研究を総合的に推進してきた。

従来、本問題については系統的な研究が少なく断片的な結果が報告されていたが、当所では学問分野横断的に取り組み、環境磁界の定量的計測・評価技術、生物学的研究における作業仮説のもとでの細胞・小動物による電磁曝露実験、国内外での研究動向調査など研究推進体制一本化のもとで鋭意研究を進めてきた。その結果、約10年間にわたる当所の研究成果、ならびに内外の研究成果

の客観的な分析結果をもとに、「少なくとも現在の生活および職場環境における極低周波電磁界が、われわれの健康に悪影響を与えるという科学的な根拠はない。」との認識に達した。

現在、さらにWHOなど国際機関での電磁界の健康影響問題に関する調査活動が進められているが、この電中研レビューが本問題の現状をご理解頂く上で幾分なりともお役に立てば幸いである。

今後とも国内外の情報については、科学的・客観的な分析・評価をもとにした情報発信を継続して実施する所存である。ここに関係各位のますますのご指導とご鞭撻をお願いする次第である。



---

## 電中研レビュー NO.47

平成14年11月14日

編集兼発行・財団法人 電力中央研究所 広報部  
100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1 [大手町ビル7階]  
(03) 3201-6601 (代表)  
E-mail : [www-pc-m1@criepi.denken.or.jp](http://www-pc-m1.criepi.denken.or.jp)  
<http://criepi.denken.or.jp/>  
印刷・株式会社 電友社

---

本部 / 経済社会研究所	100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1	(03) 3201-6601	我孫子研究所	270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646	(04) 7182-1181
狛江研究所 / 情報研究所 / 原子力情報センター			横須賀研究所	240-0196 神奈川県横須賀市長坂2-6-1	(0468) 56-2121
ヒューマンファクター研究センター / 低線量放射線研究センター / 事務センター			赤城試験センター	371-0241 群馬県勢多郡宮城村苗ヶ島2567	(027) 283-2721
201-8511 東京都狛江市岩戸北2-11-1	(03) 3480-2111		塩原実験場	329-2801 栃木県那須郡塩原町関谷1033	(0287) 35-2048

---