

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、米国のニュージャージー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ている。

#### 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、アルツハイマー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としたドジメトリ - 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)
			25~50%	50~75%	
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	TWA 25~50% 0.16~0.19 μT 50~75% 0.20~0.28 μT 75%~ >0.29 μT >90% >0.41 μT	TWA 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	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)		
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サーベイ（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 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時間曝露量測定 使用電気製品についての自己申告	過去の研究でがんとの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 1993 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	症例の診断時点ががんになっ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	送変配電設備からの距離 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)	
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	計算磁界 ( $\mu T$ )	測定磁界 ( $\mu T$ )
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からフィンランドのがん登録により(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以内の総ての送電線からの距離と電流による計算磁界より求めた各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)	
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(マッチせず;463人マッチ)について磁界測定、408人(マッチした)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、人種でマッチして1,292人選定。619人(マッチせず;463人マッチ)について磁界測定、408人(マッチした)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 references OLCC 116 1.07 (0.74-1.54) OHCC 87 0.99 (0.67-1.48) VHCC 24 0.88 (0.48-1.63)	ALL <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ッチした399人	ポジトロンによる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0.2 $\mu T$ 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、性別でマッチした133人	ポジトロンによる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、住居の数、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)	
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、イングランドとウェールズで家族衛生サービス庁に、スコットランドで保険局の登録名簿により誕生日と性別でマッチしたケース1に対照2を選定し7,629人。その内、2,226人(マッチしたペア)を分析	イングランドとウェールズで家族衛生サービス庁に、スコットランドで保険局の登録名簿により誕生日と性別でマッチしたケース1に対照2を選定し7,629人。その内、2,226人(マッチしたペア)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、社会経済状態、居住歴、職歴、両親の健康状態、社会的習慣、家族の病気、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)	

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. Jenning, 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・タグ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（ $10\text{mA}/\text{m}^2$ ）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 $10\text{kV}/\text{m}$ 、磁界を $0.5\text{mT}$ 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 $5\text{kV}/\text{m}$ 、磁界を $0.1\text{mT}$ 」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、 $1\text{kHz}$ 以下の周波数に対して、誘導電流密度を $10\text{mA}/\text{m}^2$ 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可能性があるが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（ $\text{mA}/\text{m}^2$ ）、比エネルギー吸収率（ $\text{W}/\text{kg}$ ）および電力密度（ $\text{W}/\text{m}^2$ ）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、関連する基本制限が

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 ( $\mu\text{T}$ )、電力密度 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )、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  $10\text{mA}/\text{m}^2$ 、公衆曝露は  $2\text{mA}/\text{m}^2$  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。

