

電磁界環境と健康影響  
～調査・研究の現状と動向～

2000年12月

(財)大阪科学技術センター  
電磁界 (EMF) に関する調査研究委員会



はじめに

電子、陽子などの荷電粒子を高エネルギーにまで加速する粒子線加速器が発達するにつれて、2次的に発生する放射線も多様化し、シンクロトロン放射光(SR)のように X線領域から可視光領域を経て遠赤外領域までの広い波長範囲の電磁波が発生するに至っては、従来の電離放射線と非電離放射線という分類は極めてあいまいとなり、はっきりとした線引きは難しくなって来た。しかし、一般には非電離放射線は、RF、マイクロ波、(遠)赤外線、可視光、紫外線、真空紫外までを指し、そのほか空気または水を媒介として伝播する超音波、また間接的に電流を誘起する変動磁界あるいは導電体がその中を移動すると起電力が生ずる定常磁界などを指す。

X( $\gamma$ )線、中性子等いわゆる電離放射線については、そのメリットと同時にデメリット、特に人体への悪影響についても詳しく研究されているため、その被曝線量限度については国際的な統一基準が示されており、我が国もその勧告に準じた法令が制定されている。

一方、非電離放射線については、これまでのところそのメリットだけが強調され、人体への害については研究が不十分なこともあってあまり注目されていなかった。生物実験ではその強度が極端に大きい場合には色々な現象が報告されているが、低レベル長時間曝露に対しては確固たる証拠もなく、人体に対する疫学研究の難しさもあるため、まだはっきりとした基準を提示できる段階には至っておらず、各国でそれぞれ独自の基準を設けているのが現状である。

最近、特に取り上げられるようになってきたのが高圧送電線に代表される低周波の電磁界である。これはかつてスウェーデンのカロリンスカ研究所における疫学研究(1993)の結果として、送電線の下に住む住民に小児白血病患者が他の地域に比べて多かったと発表されたため、マスコミも飛び付き、一大センセーションを巻き起こした。我が国でも大阪府門真市の送電線の密集地域でガンによる死亡率が高かったなどとまことしやかにテレビの報道番組などに取り上げられたりもした。

これらの騒動も1997年7月に米国国立ガン研究所(NCI)が綿密な疫学研究の結果を発表し、その中で送電線周辺の居住環境の電磁界が小児の急性リンパ性白

血病のリスクを増加させるという証拠は見つからなかったと報告され、一応一件落着した。

ところが、1998年6月に米国国立環境健康研究所(NIEHS)の諮問ワーキンググループが、極低周波の電磁界に人体への発ガンの可能性がある(ランク2B: possible human carcinogen)と見なす見解を19対9の多数決方式でまとめ答申した。この分類は国際ガン研究機関(IARC: International Agency for Research in Cancer)が薬品や種々の化学物質に対してランク付けした中で、疫学研究ではヒトにおける発ガン性の限られた証拠があり、動物実験では十分な証拠がない場合に適用されるものである。

これまで、いかなる動物実験でも発ガン性の反応の証明をし得なかったにもかかわらず、既に報告されている疫学研究の中には、電力線近辺や住宅環境での曝露が小児白血病のリスクをわずかに増加させるというものや、大電力を使用する産業で働く成人の慢性白血病のリスクを増加させるというものがいくつかあるため、ワーキンググループの見解としては、発ガンの可能性ありとしたのであろうが、座長のガロ博士は、「この報告は電磁界のリスクが高いことを示唆するものではない。恐らく他の多くの公衆衛生のリスクと比較しても非常に小さいであろうが、不確かさを払拭するためにはさらに詳細な研究を続ける必要があると信ずる。」と述べている。

米国RAPID計画推進の中心的人物とされるNIEHSのブーアマン博士は今回の報告書についてかなり批判的であったと、直接面談された武部啓京都大学名誉教授が述べておられる。RAPID(Research and Public Information Dissemination)計画とは、NIEHSが主管官庁となり、電磁界の影響に関する研究及び電磁界の広報活動を行う委員会を組織して行くという米国エネルギー戦略法案により発足したもので、活動内容は米国エネルギー省(DOE)や米国環境保護庁(EPA)を含めた電磁界省庁間委員会を設置し、様々な電磁界研究を行うことを目的としているものである。ブーアマン博士はこの報告書は現段階ではまだNIEHSの最終的な見解ではなく、あくまでもNIEHSの諮問ワーキンググループのNIEHSに対する報告書であり、今後NIEHSはこの報告書について広く国民の声を聞く公聴会を開催して最終報告書をまとめ、それらを議会に提出する予定になっていると述べたとされる。さらに、博士はこれまでIARCが‘2B’に分類した物質の多くは動物

実験で発ガン性を示す報告があったものを含んでおり、電磁界のように動物実験での発ガン性が全く見られていないものが‘2B’に分類されたのは適切ではなかったとも言われたそうである。このように、今回の報告書については、この分野の権威といわれる学者からの批判も多々あるようで、それらに影響されて最終的に NIEHS がどのような見解を示すか注目されていたが、1999年6月になってやっと公表され、最終報告書が米国議会に提出された。それによると、電磁界が完全に安全とは認識し得ないが、真に健康への危険があるという確率は一般に小さいと信ずるとされ、結論としては電磁界によるガンやその他の疾病の危険に関する証拠は「弱い」ということであった。

これは勿論、極低周波領域電磁界の居住環境レベルの話であって、日常生活からは現実離れしたような強磁界とか極端にパワーの大きな電磁界下での生体影響、さらには超高周波電磁界の影響等については、研究としての興味は尽きないであろう。

本書は対象とする読者をそれ程明確に設定している訳ではないが、若い世代への正しい知識の普及を目指す意味からも、特に中学・高校で理科教育を担当しておられる先生方に読んで頂き、現場の教育に何らかの形で取り入れて頂ければ、本書を刊行した意義が大きなものとなる。そのような先生方から教育を受けた青少年が電磁界に対して正確な知識と興味を抱き、家庭内でも話題の提供者となり、家族の話し合いが持たれるようになれば、编者としてはこの上もない喜びである。

最後に、多忙な中を本書執筆のために時間を割いて頂いた著者の先生方、及び編集に労を惜しまなかった大阪科学技術センターのスタッフの皆様に心より謝意を表する次第である。

(大阪大学ラジオアイソトープ総合センター 山本幸佳)



## 目 次

第1章 電気に関する基礎知識	1
1. 1 基本用語	1
1. 2 電力設備	5
1. 3 交流と直流	9
1. 4 電界と磁界	9
1. 5 自然界の電界と磁界	17
第2章 人への健康影響評価に関する研究	19
2. 1 人の健康影響評価に関する研究方法	19
2. 2 疫学研究	19
2. 3 電磁界の健康影響についての疫学研究	22
2. 3. 1 一般人に対する主な疫学研究	23
2. 3. 2 職業人に対する主な疫学研究	27
2. 4 専門機関による疫学研究の評価	27
2. 5 まとめ	29
第3章 生物学的研究（実験室での研究）	30
3. 1 In vitro（試験管内）研究	30
3. 1. 1 遺伝子レベルに関する研究	30
3. 1. 2 免疫系に関する実験	31
3. 1. 3 細胞のシグナル伝達に関する実験	31
3. 2 In vivo（生体内）研究	33
3. 2. 1 ガンに関する研究	33
3. 2. 2 神経系・行動に関する実験	34
3. 2. 3 生殖・発育に関する実験	35
3. 2. 4 神経内分泌に関する実験	36
3. 3 まとめ	36

第4章 政府の研究活動	38
4.1 省庁間研究状況	38
4.2 国際的研究	40
4.3 電磁界に関する基準	42
第5章 電磁界環境	44
5.1 自然界の電磁界	44
5.2 身のまわりの電界	45
5.3 磁界の測定	45
5.4 各種環境における磁界の強さ	46
5.5 磁界環境と生活	48

---

## 第1章 電気に関する基礎知識

### 1.1 基本用語

ここでは、基本的な用語と、それを使って基礎的な事項を考えてみる。

#### (1) 電圧

「電圧」とは電気を流すための圧力を表わし、単位は「V (ボルト)」である。一般家庭では100Vを通常の家電製品に使っている。最近、200V用の家電製品も市販されるようになってきた。

#### (2) 電流

「電流」とは単位時間当たりの電気の流れの強さを表わし、単位は「A (アンペア)」である。

#### (3) 電力

例として電熱器など抵抗負荷を考えてみる。電熱器に電流を流すと熱が発生して仕事をする。電圧と電流を掛け合わせたものは仕事率、すなわち単位時間当たりの仕事、に相当していることがわかる。電圧と電流を掛け合わせたものを「電力」と言い、単位は「W (ワット)」である。電熱器の1000Wなどの使用電力で、おなじみのものである。100V、10Aの場合と、200V、5Aの場合は、同じ電力(1000W)となる。

#### (4) 電力量

電力とそれを使用する時間の積を「電力量」と呼び、単位は「Wh (ワット時)」である。家庭で支払っている電力料金は、家庭で使用した電力量に対するものである。1000Wの家電製品を1時間使用すると、使用電力量は1000Wh、または1kWhである。家庭での使用電力量はkWhで表示されている。

数字の桁数が多い場合には、ここに示した「k (キロ)」のような補助単位を使用することが多い。小数点以下の桁数が多い小さな数字を表わす場合も同様である。よく使用される補助単位を表1.1にまとめて示す。

これらの用語を図 1.1 に示すような身近な水と比較して説明する。電気回路は、電源、導線、負荷で、水の方は、ポンプ、水路、負荷で構成される。電圧はポンプの力に、電流は負荷を流れる水の流量に対応する。負荷が同じであれば、電圧が高いほど電流が多く流れるが、これはポンプの力が強いほど水の流量が多いことと対応する。抵抗は負荷電流の流れにくさを表わすので、抵抗の増加は、負荷の断面積が小さくなり水が流れにくくなることに対応させることができる。

表 1.1 補助単位

倍 数	名 称	記 号
$10^{18}$	エクサ	E
$10^{15}$	ペ タ	P
$10^{12}$	テ ラ	T
$10^9$	ギ ガ	G
$10^6$	メ ガ	M
$10^3$	キ ロ	k
$10^2$	ヘクト	h
10	デ カ	d a
$10^{-1}$	デ シ	d
$10^{-2}$	センチ	c
$10^{-3}$	ミ リ	m
$10^{-6}$	マイクロ	$\mu$
$10^{-9}$	ナ ノ	n
$10^{-12}$	ピ コ	p
$10^{-15}$	フェムト	f
$10^{-18}$	ア ト	a

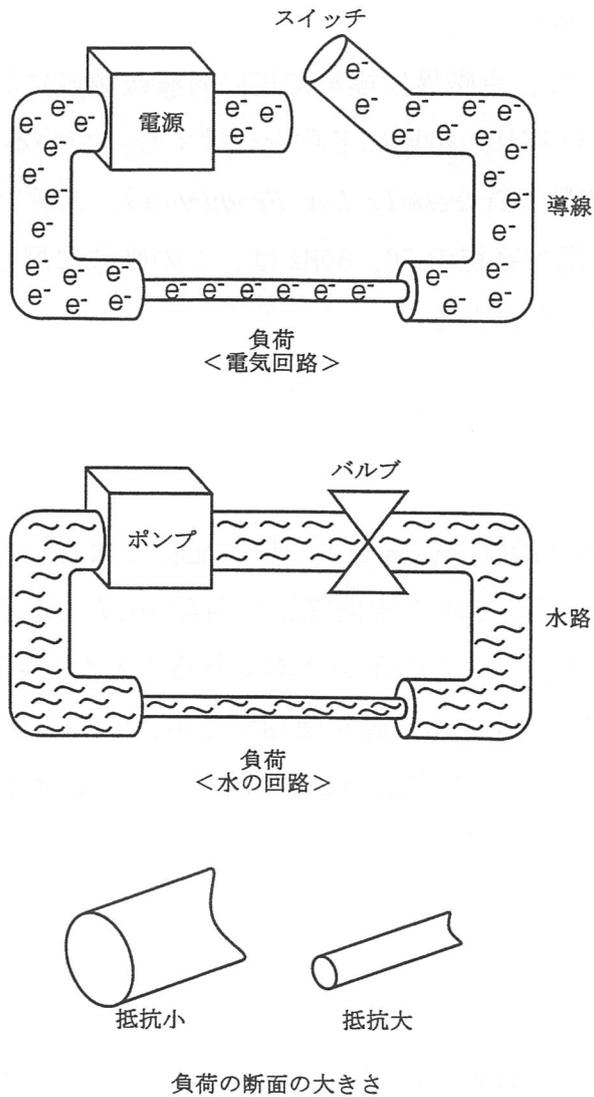


図 1.1 電気と水の比較

(5) 周波数

電力系統の電圧・電流は、時間とともに大きさおよび方向が正弦波状に変化する。正負一對の正弦波の時間を周期、一時間当たりの周期の数を「**周波数**」と呼ばれ、単位は「**Hz (ヘルツ)**」である。日本における交流電圧の周波数は、富士川以西では 60Hz (ヘルツ)、以東では 50Hz であり、1 秒間に正負一對の正弦波が 60 (50) 個含まれ、1/120 (1/100) 秒ごとに方向が変化していることを意味する。一周期は、1/60 (1/50) 秒ということになる。

#### (6) 極低周波数 (ELF)

後述するように、電磁界は極めて広い周波数領域にわたるため、周波数帯を分割してそれぞれの帯域に名称をつけて呼んでいる。30Hz～300Hz の帯域を「**極低周波数 (Extremely Low Frequency)**」と言い、「**ELF**」と記載することが多い。電力系統の 50、60Hz は、この帯域に属し、特に「**商用周波数**」と呼ばれることがある。

#### (7) 単相方式

家庭への電力供給は、通常 2 本の屋内配線でなされており、これを「**単相二線方式**」という。2 本の線間電圧は通常 100V である。コンセントの穴が 2 つであること、プラグの足が 2 本であることから理解できる。また、「**単相三線方式**」では 3 本の線を使用するが、2 本の線間電圧は 200V となる。2 本の場合と比べると電圧が 2 倍になるので、電流を半分にしても同じ電力を送ることができる。

#### (8) 三相方式

電力系統では「**三相方式**」が用いられている。この方式では、図 1.2 に示すように、周波数と電圧の大きさが等しく、位相が異なる 3 つの電圧を使用する。電線は 3 本必要となり、それら 3 本分の電流の合計は定常運転時には零となるので、極めて効率的な送電方式である。このように送電線、配電線などは 3 本の電線が設置されており、それぞれの電線で電力を供給している。一般家庭近くの柱上変圧器までは三相方式で電力を送っており、柱上変圧器から先では、一般需要家では三相方式で使い難いことが多いので単相方式となっている。

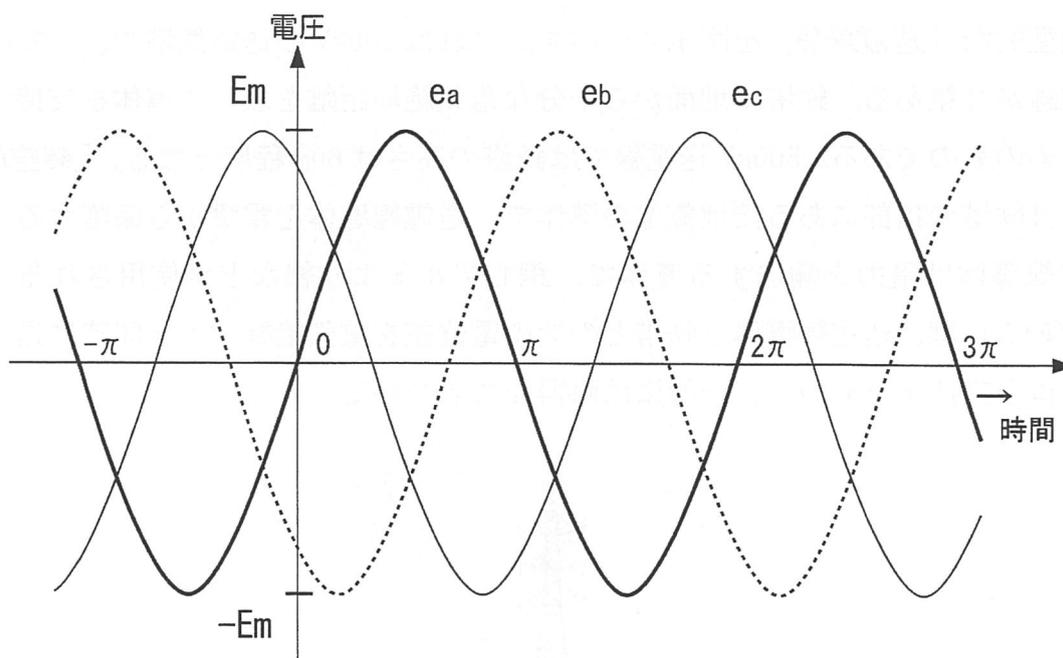


図 1.2 三相方式

## 1.2 電力設備

我々が日頃何気なく使っている家庭用の電気は、一体どこから来ているのだろうか？ 家の中の電線は外へ出ると「配電線」につながり、これは通常幾つかの「変電所」を経て、長距離の「送電線」、そして変電所、「発電所」へとつながっている。図 1.3 は、このような電力系統を示している。

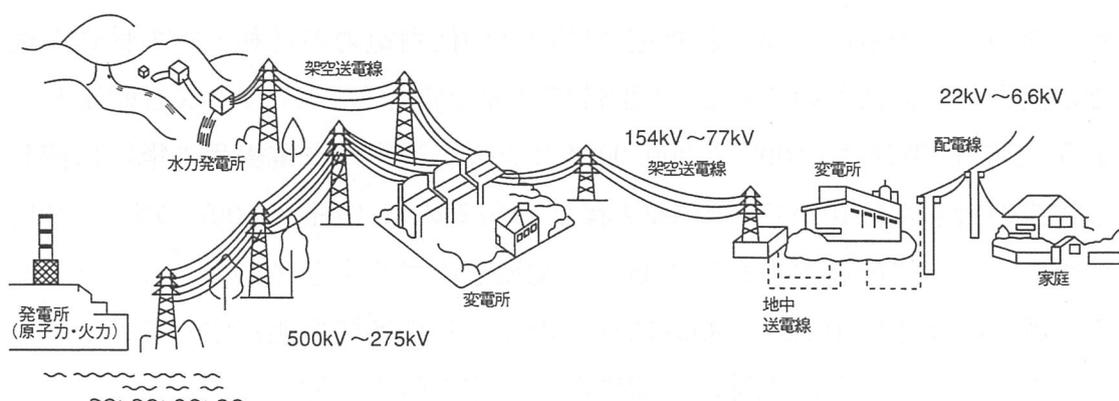


図 1.3 電力系統の概略図

典型的な「送電鉄塔」を図 1.4 に示す。これは 500kV の送電鉄塔で、三相の送電線が 2 組ある。鉄塔は地面から十分な電気絶縁距離を取って導体を支持するためのものである。500kV 送電線では鉄塔の高さは 60m 程度となる。「架空地線」は鉄塔の頂部にある接地電位の導体で、送電線導体を雷撃から保護する。送電線導体は電力を輸送する導体で、鋼心アルミより線などが使用される。「がいし」は、送電線導体と鉄塔との間の電位差を電気絶縁すると同時に送電線導体を支持するもので、一般には磁器でできている。

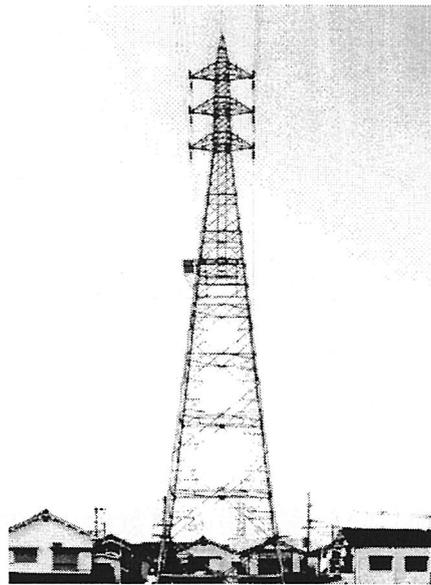
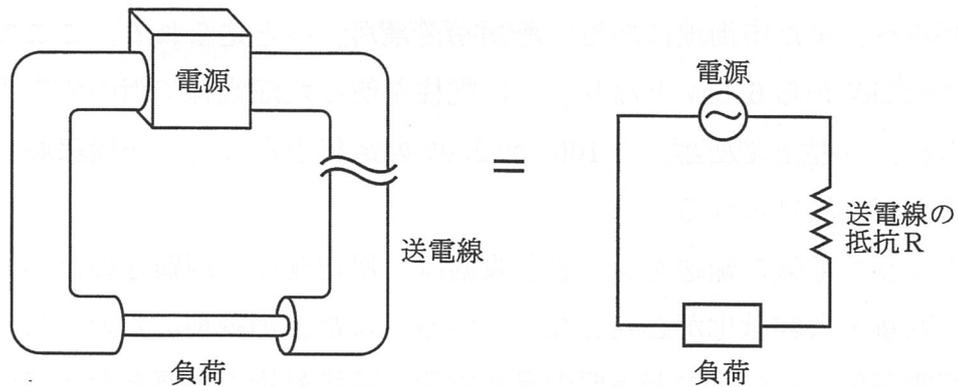


図 1.4 典型的な送電鉄塔

当然ながら、発電所で作られた電力は個々の使用電力の総和と電力輸送の途中での損失を加えたものである。1 世帯に必要な電力を 100V で 20A と想定してみよう。1 万世帯分は、100V で 200,000A である。通常送電線用の電線に流し得る電流の大きさはせいぜい数 100A 程度であるので、電圧が 100V のままでは、とてつもない太さの電線が必要であり、電流を小さくする必要があることがわかる。電線の長さは 10km~100km に及ぶので、その抵抗を無視することはできず、図 1.5 に示すように電線は負荷になる。電力輸送の途中での電線における損失は電流の 2 乗に比例するので、電流を小さくすることは損失改善に大いに役立つことがわかる。電力を小さくしないで電流を小さくするには、電圧を大

大きくする必要があります。電気絶縁の問題もあり、電圧をむやみに大きくする訳にもいかない。現在、日本で使われている最高の送電電圧は、50万V(500kV)である。



送電線は長いので、電線自体が負荷となる。  
 電線の抵抗を  $R$  とすると、電線での損失電力  $P_L$  は  

$$P_L = I^2 R$$
  
 となり、電流の2乗に比例する。

損失を少なくするには、電流を小さくして、電圧を上げて電力を送ればよい。

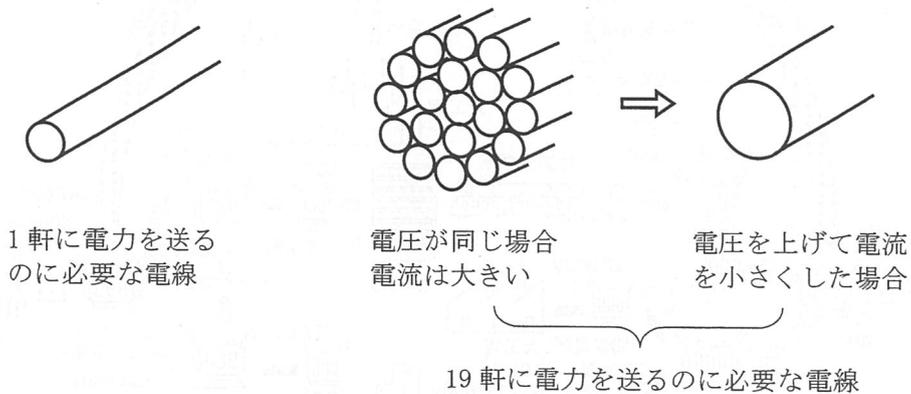


図 1.5 電力損失

図 1.6 を見てみよう。この図は、図 1.3 をさらに詳細に描いたものである。火力、水力、原子力発電所などで作られた電気は、上記理由により変圧器で 187~500kV に電圧を上げて「一次変電所」へ送られる。一次変電所では 500~187kV

から 275~33kV に電圧を下げ、一部は次の「二次変電所」へ送られる。二次変電所では 275~110kV から 154~22kV に電圧を下げ、「中間変電所」へ送られる。一次変電所や二次変電所から送られる電力のうち、一部は鉄道や工場などへ直接送られる。中間変電所では、77~66kV から 33~22kV に電圧を下げ、工場やビルへ、また市街地にある「配電用変電所」へと送られる。ここで、電圧は 154~22kV から 6.6kV となり、主に電柱を使った配電線で街のすみずみまでおくられ、「柱上変圧器」で 100V や 200V の電気となって、一般家庭や商店、小工場などへ届けられる。

このような電気の輸送を支える各設備は、用地確保の困難さのため、送電距離の長距離・大容量化が必要となっている。また、消費地においても、配電設備の高電圧化、地中化など需要の過密対策、環境対策が必要となっている。

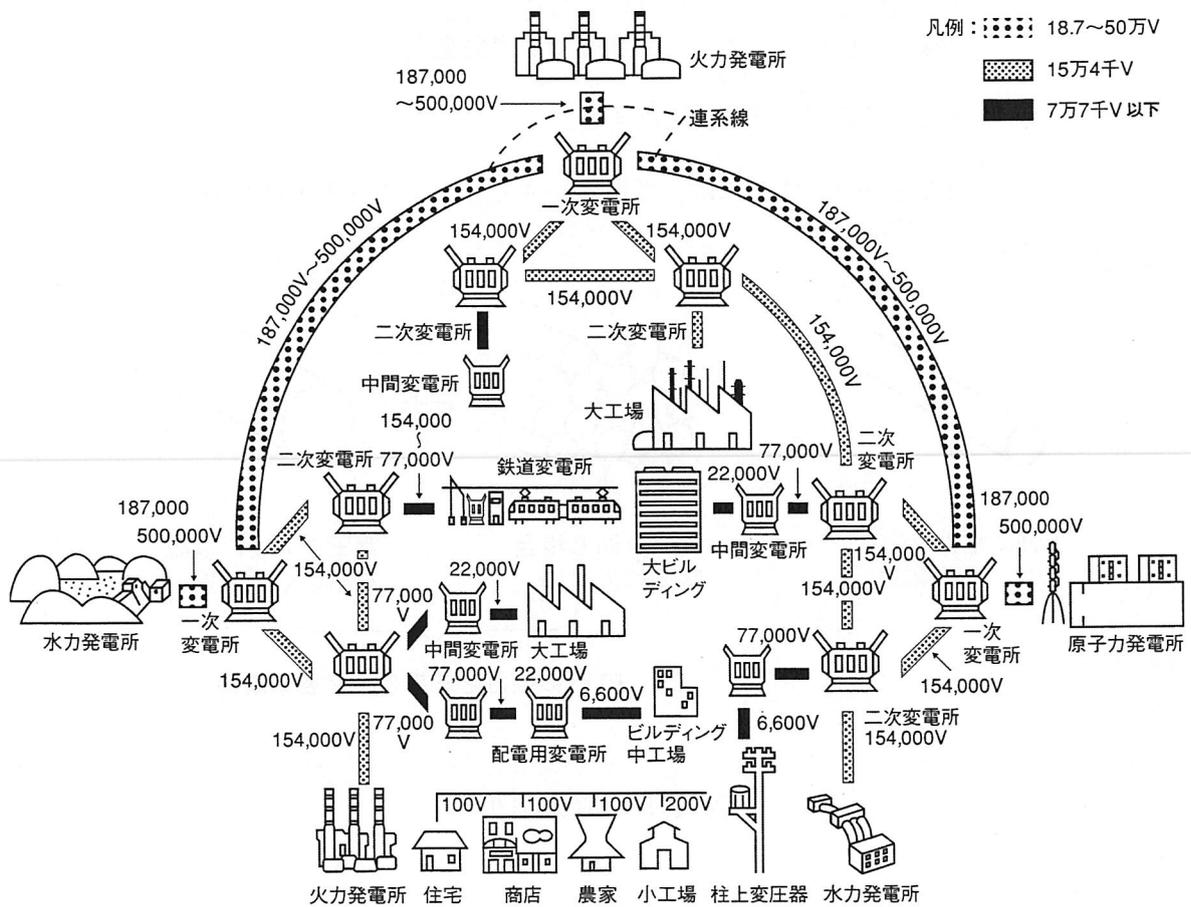


図 1.6 電力流通設備の概要

### 1. 3 交流と直流

電源の電圧あるいは回路を流れる電流の方向が、時間的に変化しないものを「**直流**」と称し、直流電圧、直流電流と表現する。一方、電圧、電流の大きさや方向が時間的に変化する場合は「**交流**」と呼び、交流電圧、交流電流と表現する。

直流の電源の中で、身近で代表的なものは乾電池、バッテリーである。これらは化学エネルギーを電気エネルギーに変換するものである。

電力系統では、発電機で発生する電圧から家庭に供給される電圧までほとんど全てにおいて、時間に対し正弦波状の変化をする交流が使用されている。正弦波交流電圧は、磁界中でコイルを回転させることにより得られる。交流では、変圧器により容易に電圧を上げ下げできる利点がある。

日本の電力系統においては、50/60Hz の周波数変換所、北海道一本州連系線で直流が使用されている。なぜならば直流のケーブル（絶縁電線）が交流のそれに比べて安価で海峡横断に適しているためである。現在では、紀伊水道でも直流連系線が完成し、電気が送られている。直流送電には、損失が少ない、電力系統の安定性が良い、などの利点がある。しかしながら、交流／直流変換所が必要である、短距離送電では経済的でない、などの欠点もある。

### 1. 4 電界と磁界

#### (1) 電界（電場）

電荷を持った物体を電圧をかけた導体に近づけると、この物体に力が働く。電圧がかかった導体の周辺には電氣的影響が及ぶため、物体に力を及ぼすものと考えられる。このように、電氣的影響を及ぼす場所を「**電界**」と呼ぶ。電界の大きさは、単位距離当りの電位差で定義される。例えば、1m離れた2点の電位差が2Vであれば、平均的電界は2V/mとなる。電界の単位としては「**V/m (ボルト毎メートル)**」がよく使用されるが、日本の技術基準ではV/cmが採用されている。1V/cm=100V/mである。電界は、大きさと方向を持つベクトルである。

電力設備では、電圧をかけることにより電界が発生する。送電線近傍の

電界の様子を図 1.7(a)図に示す。電界は、発生源からの距離が離れると急激に大きさが小さくなる、樹木や建物など導体により比較的容易に遮蔽できる、という特徴がある。空間のある点における電界ベクトルは、単相方式の設備の近くでは固定した軸方向で振動するが、三相方式の設備の近くでは同一平面内で楕円を描く。

## (2) 磁界 (磁場)

導体に電流を流すと、近くに置いた方位磁石の向きが変化する。電流によって磁気的影響を及ぼす場ができていると考え、このように電気によって磁気的な作用が行われる場所が「**磁界**」と呼ばれる。磁界の強さを表わす単位には「 $A/m$  (アンペア毎メートル)」が使用される。磁界は、大きさと方向を持つベクトルである。

磁界と垂直な単位面積当たりの磁束数を「**磁束密度**」と呼ぶ。磁束密度の単位には、「 $T$  (テスラ)」あるいは「 $G$  (ガウス)」が使用される。1T=10<sup>4</sup>Gの関係がある。磁束密度  $B$  もベクトルである。また磁束密度は、しばしば単に磁界と呼ばれることがある。

磁界は電流により発生する。送電線近傍の磁束密度の様子を図 1.7(b)に示す。磁界は、発生源からの距離が離れると急激に減少する。磁性体により磁界を遮蔽することができる、等の特徴がある。

# 電界と磁界

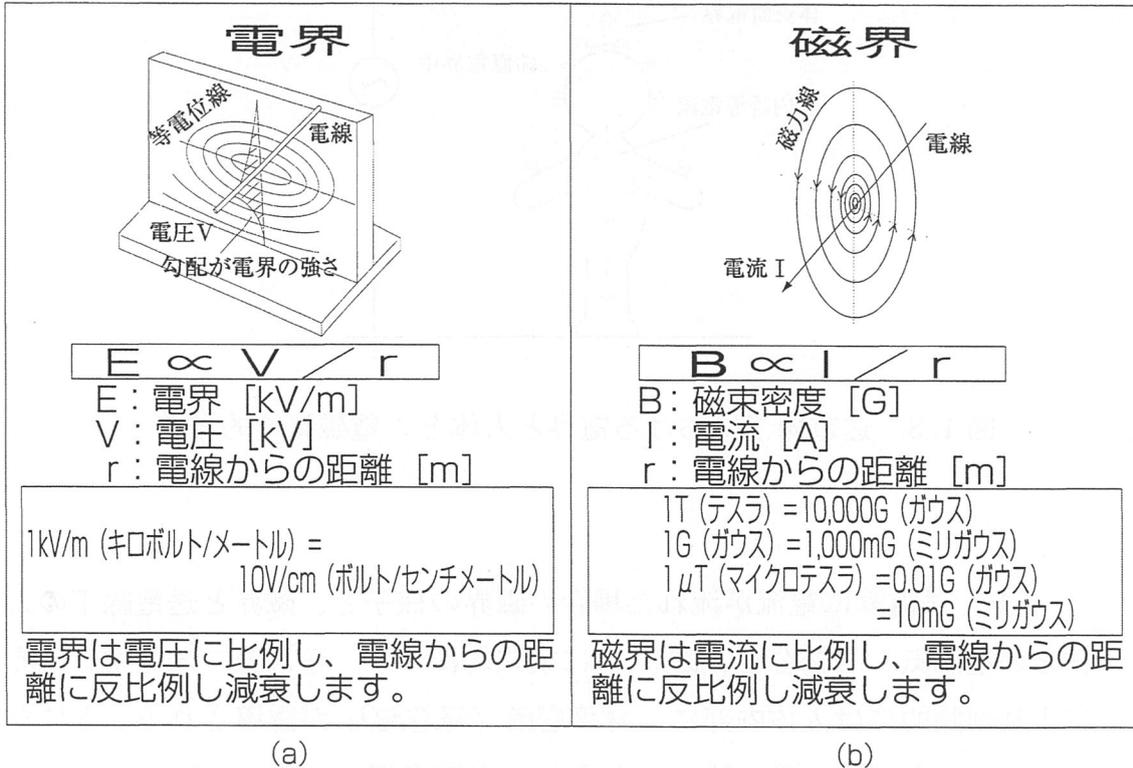


図 1.7 送電線近傍の電界及び磁界

### (3) 商用周波電界・磁界と人体との電磁気学的結合

「商用周波数 (50 または 60Hz)」では、電界の発生源から人体への距離が波長に比べて非常に短いため、発生源と人体との電磁気学的な結合を考えなくてはならない。送電線が発生する電界と送電線下の人体と電気磁気学的結合を、図 1.8 に模式的に示す。人体表面が電界に曝されると、人体内部に電流が誘導される。商用周波領域では人体の「誘電率」が大きく電界強度が小さいため、後で述べるように誘起される電流密度は極めて小さい。

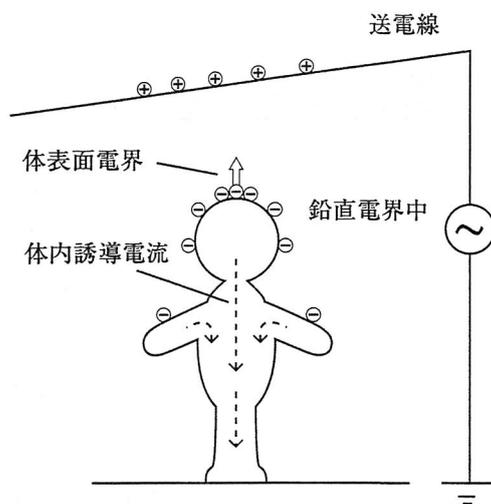


図 1.8 送電線下における電界と人体との電磁気学的結合

一方、送電線に電流が流れた場合の磁界の様子と、磁界と送電線下の人体との電磁気学的結合を、図 1.9 に模式的に示す。送電線の発生する磁界により理論的には人体内部に「誘導電流 (渦電流)」が誘導されることになる。しかしながら、後で述べるように「電流密度」は極めて小さい。

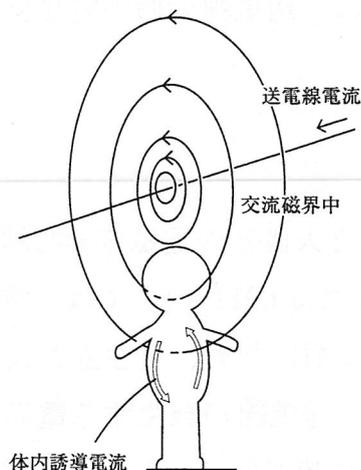


図 1.9 送電線下における磁界と人体との電磁気学的結合

商用周波電界・磁界と人体との電磁気学的結合現象を、図 1.10 に示すような人体モデルを用いて定性的に説明する。人体は地面に直立しており、身長  $h$ 、胴径  $D$  の円筒状と仮定する。人体は  $0.01 \sim 0.2 \text{ S/m}$  程度の「導電率」

を持っているため、 $10^6$ 程度の「比誘電率」を有するにもかかわらず抵抗性となる。電界および磁界による「誘導電流密度」を、それぞれ  $J_e$ 、 $J_b$  で表わす。一般に、電界は大地に垂直、磁界は3次元になっているが、ここでは大地に垂直な成分のみを考える。

図 1.10(a)に示すように、 $J_e$  は水平断面においてほぼ一様であるが、 $J_b$  は中心軸からの距離に従って増加する。人体の胴径  $D$  に対する依存性を同(b)図に示す。 $D$  が大きくなると  $J_e$  は低下し、 $J_b$  は増加する。同(c)図に見られるように、人体の導電率は  $J_e$  に影響を及ぼさないが、 $J_b$  は導電率とともに増大する。同(d)図に身長との関係を示す。電界の場合には、全誘導電流が増大するため  $J_e$  は身長とともに増大する。 $J_b$  は胴径を一定としているので身長の影響を受けない。

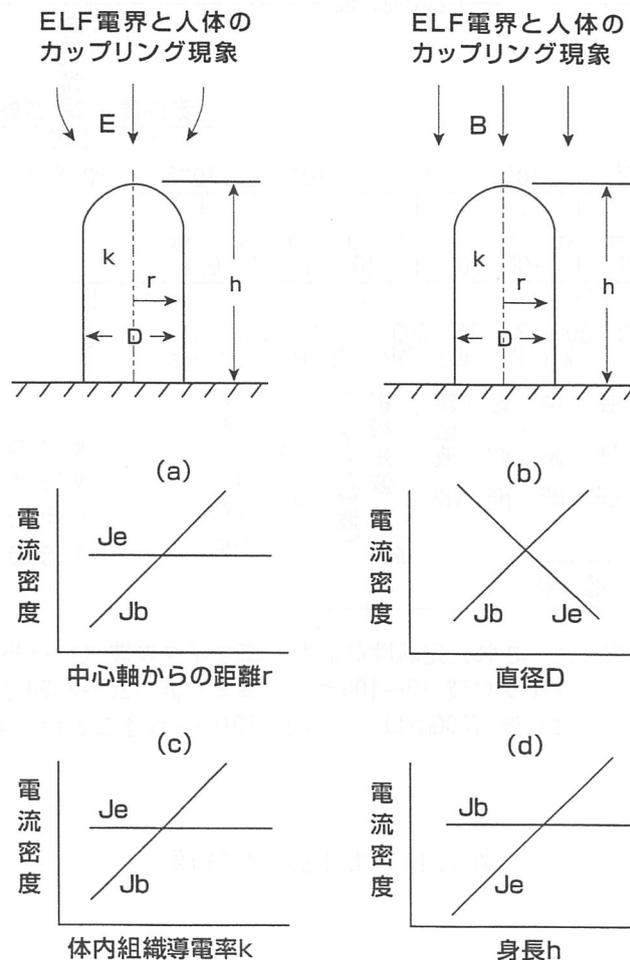
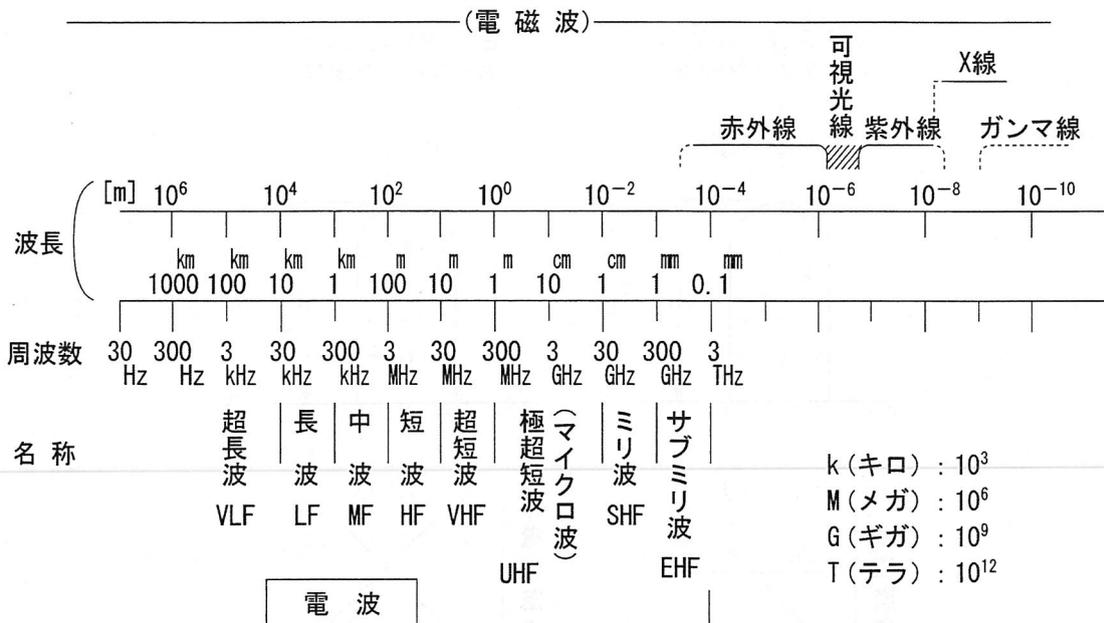


図 1.10 人体モデル内の電流密度

#### (4) 電磁波

「電磁波」は理論的には、図 1.11 に示すように数 Hz からガンマ線の  $10^{25}$  Hz 程度まで極めて広い周波数帯に及ぶ。電磁波は図 1.12 に示すように、電界と磁界とからなり、一定の比で双方直交して進み遠くまで到達する性質を持っている。しかしながら、波動として実際に伝わるのは放送波以上の周波数の電磁波であり、商用周波の「電磁界」は遠くまで到達しないという性質を持っている。周波数が高くなるほど「波長」が短くなり、エネルギーは高くなる。エネルギーで見れば、 $10^{-13} \sim 10^{12}$  eV (電子ボルト) 程度の範囲となる。同図に示すように、各周波数帯ごとに名称が付けられている。商用周波数 (50Hz または 60Hz) は、ELF 領域に含まれる。



(注) 統一された定義はないが、準マイクロ波 (1~3GHz)、マイクロ波 (2~10GHz)、準ミリ波 (20~30GHz)、ミリ波 (30GHz以上) などが用いられることがある。

図 1.11 電磁波の分類

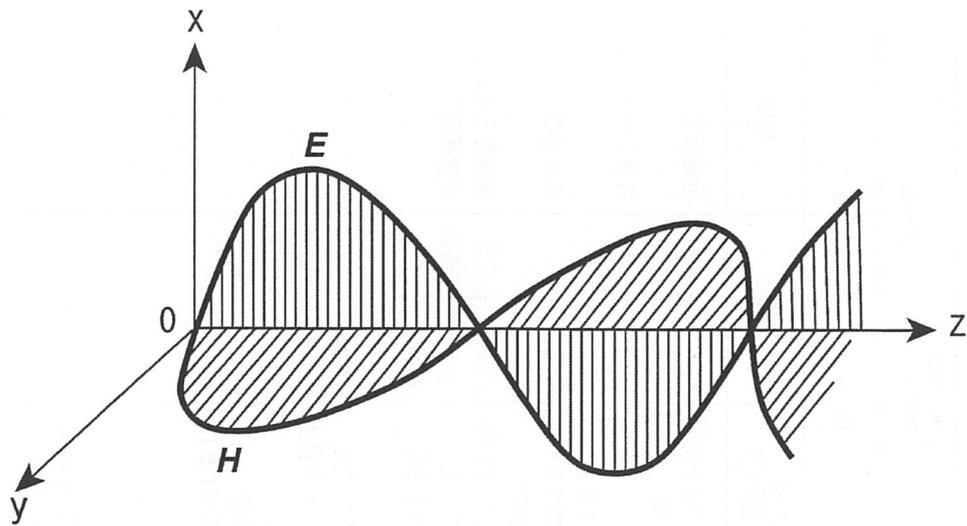


図 1.12 一般的な電磁波

各周波数帯の主な用途を表 1.2 に示す。周波数が 30GHz 程度までの場合には、電磁波のエネルギーは小さく物体を電離しないため、生体あるいは物体に影響を及ぼす要因とはならない。このような電磁波はテレビジョン放送などに使用されており、「非電離放射線」と呼ぶ。一方、 $10^{15}$ Hz より周波数の高い紫外線、X 線、ガンマ線などは、「電離放射線」と呼ばれ医療用などに使用される。商用周波の電磁界も電磁波の一種である。しかし周波数 60Hz の電磁界の場合、その波長は 5,000km に及ぶこと、ならびに波源の大きさや、波源から影響領域までの距離を考えると、電磁波として扱う必要はない。よって電界、磁界を別々に分けて考えることができる。

表 1.2 各周波数帯の電磁波の主な用途

周波数	3,000kHz 3MHz		300MHz		30MHz		300MHz		3,000MHz 3GHz		30GHz		
	3kHz	30kHz	300kHz	3MHz	10m	100m	1m	10cm	1cm	10cm	1cm	1cm	
波長	100 km	10 km	1 km	100m	10m	100m	1m	10cm	1cm	10cm	1cm	1cm	
名称	VLF 超長波	LF 長波	MF 中波	HF 短波	VHF 超短波	UHF 極超短波	SHF	EHF					
各周波数帯 ごとの代表 的な用途	無線航法 (オメガ) 水中通信	無線航法 (デッカ) 船舶、航空機の 航行用ビーコン 気象通信	中波放送 ラジオバイ 船舶、航空機の 通信 船舶遭難通信 無線航行(ローラ ン) 海上保安 標準電波	短波放送 国際放送 船舶、航空機の 通信 CB アマチュア無線 海上保安 国際通信 医療機器 高周波利用設備	テレビジョン放 送、FM放送 無線呼出し 移動通信 アマチュア無線 船舶電話 行政、公益事業 その他の業務用 の通信 医療機器 工業利用(加工、 加熱) 航空管制	テレビジョン放送 移動通信 自動車電話 航空機無線電話 簡易無線 パーソナル無線 無線呼出し MCA など行政 公益事業防災 その他の業務用 の通信 医療機器 工業利用(加工、 加熱) 食品加工 電子レンジ 物理利用(加速、 核融合実験)	マイクロ波通信 各種レーダ 業務用通信 衛星通信 衛星放送 行政、公益事業 その他の業務用 の通信 医療機器 物理利用 (加速、核融合実 験など)	電波天文 各種レーダ 衛星通信 簡易地上通信 宇宙研究					

### 1. 5 自然界の電界と磁界

自然界における電界は、主として雷雲によるものである。過冷却水滴と氷晶が共存する空間において、あられやひょうが生成される過程で図 1.13 に示すような電荷分離が生ずると言われている。このようにして雷雲中に生じた電荷により、直流電界が発生する。地表における電界の大きさは 200V/m 程度であるが、最大 30kV/m 程度に達する場合もある。また、雷活動に伴って急峻な電界変化が生じている。一方、晴天時には図 1.14 に示すように下向きの直流電界が生じている。これは宇宙線により生成されるイオン、雷雲上層部の「残留電荷」により生じる電界で、その大きさは 120~150V/m である。

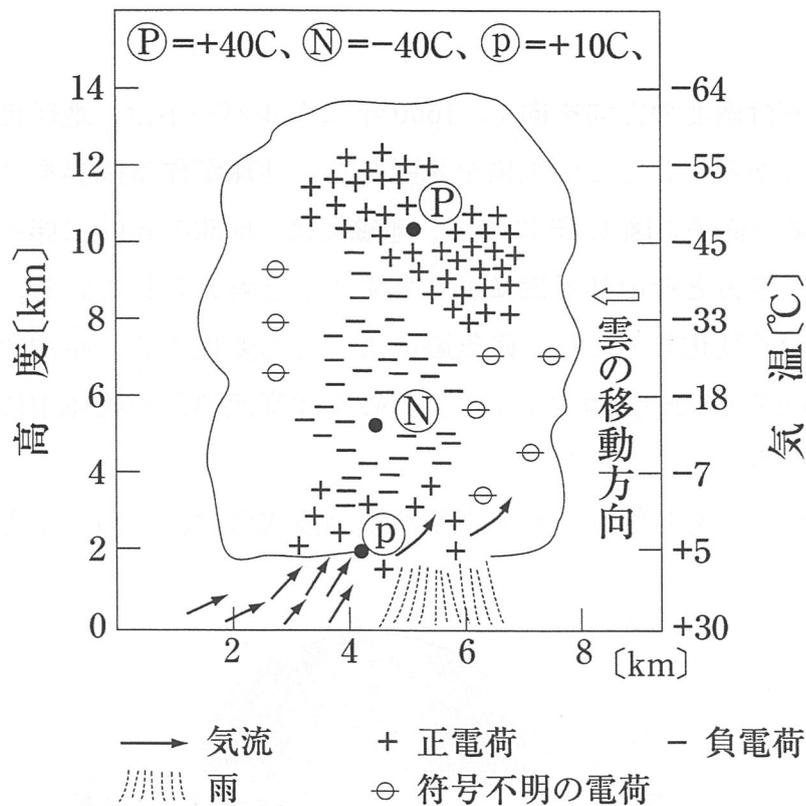


図 1.13 雷雲内の電荷分布

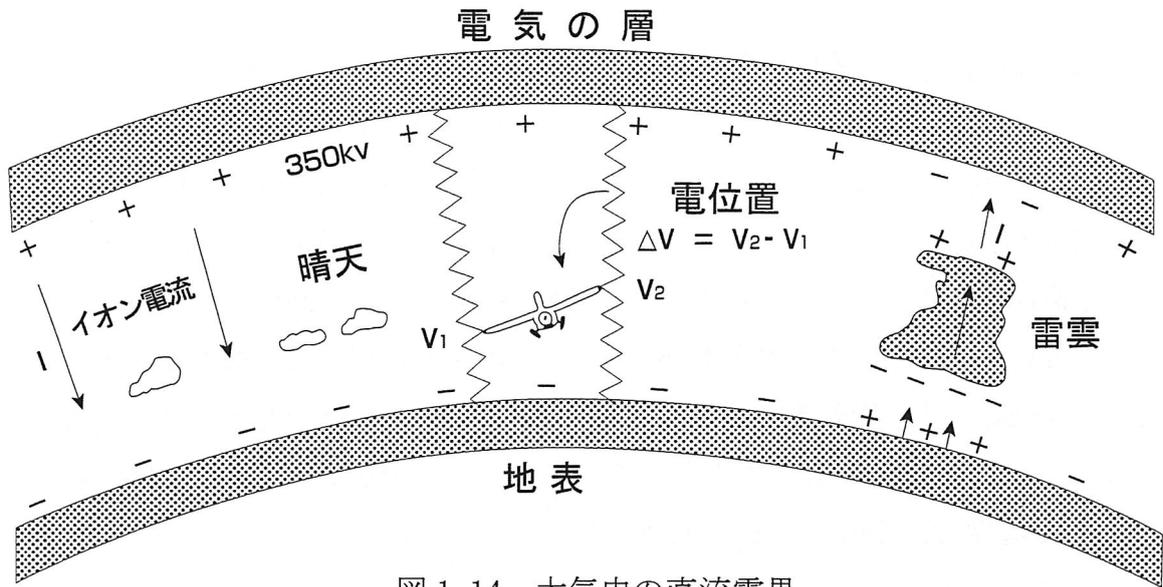


図 1.14 大気中の直流電界

方位磁石は南北の方向を向く。1600年にギルバートは、地球自体が一つの巨大な磁石であるとしてこの現象を説明した。地球が作る磁界を「地磁気」と呼ぶ。地磁気の様子を図 1.15 に示す。地磁気は、地球の自転に伴って生じる地殻中の物質の還流とその熱対流により発生すると考えられている。地磁気は一定不変ではなく変化しており、磁気嵐によっても変化する。平均的な地磁気の大きさは  $50 \mu\text{T}$  ( $500\text{mG}$ ) 程度である。地磁気は直流のため物体中に前述のような電流を生じさせることはない。

電界、磁界とも自然界に存在する商用周波成分は、極めて小さい。

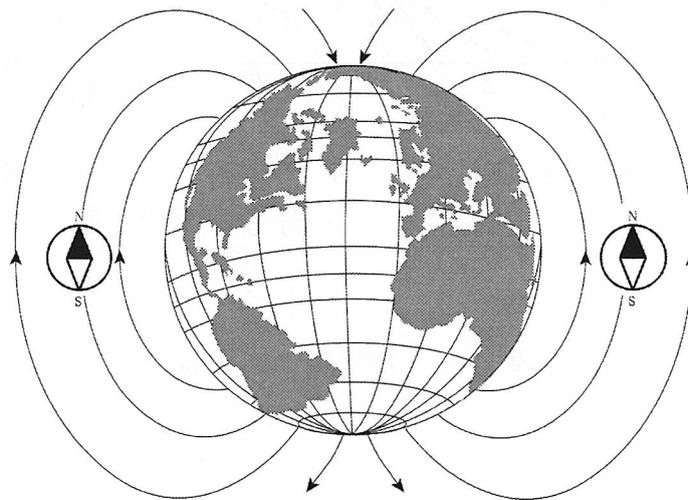


図 1.15 地磁気の様子

## 第2章 人への健康影響評価に関する研究

### 2.1 人の健康影響評価に関する研究方法

人の健康への影響を研究するには「疫学研究<sup>1)</sup>」と「生物学的研究」がある。「疫学研究」は居住地や食生活等の調査により、統計的に人の健康と原因との関わりについて調べる。また「生物学的研究」は動物や細胞を用いて、実験的に人の健康と原因との因果関係を調べるものである。一般に「疫学研究」は次の研究に進むための前段階として行われることが多く、「生物学的研究」を伴わなければ、これだけでは因果関係を十分に立証できるものではない。また、「生物学的研究」も再現性の確認など様々な条件をクリアしてはじめて認められるものである。

### 2.2 疫学研究

#### (1) 疫学研究の種類

疫学研究には、方法論として大きく分けると次の2通りになる。その一つは疾病に罹った人（**症例**）と罹っていない健康者（**対照**）を比較し、要因を解明する、「**症例-対照研究**」（ケース・コントロール研究）、もう一つは要因となるものに曝露された集団（**コホート**）の死亡率又は疾病率と曝露されていない集団を区別し、比較するもので、これを「**コホート研究**」（追跡研究）<sup>2)</sup>という。これらの調査にはそれぞれ長所と短所がある。

症例-対照研究は、調査対象を疾病に罹った人（**症例**）と、疾病以外は同じ条件を持つ人（**対照**）のグループを作り、過去に問題ではないかと疑われるもの（例えば電界、磁界等）にどれくらい曝露したかを調べる。

---

1) 疫学とは本来、疫病（伝染病）の流行を研究する学問であったが、今日では広く健康に関する集団現象を研究する学問に使われるようになってきた。

2) 疫学研究には症例-対照研究及びコホート研究以外に介入予防研究というものもあるが、電磁界曝露の健康への影響に関する疫学研究には通常は用いられない。

評価の方法は症例群の曝露した人と曝露していない人の比（オッズ）を求め、対照群でも同様のオッズを出す。症例群と対照群のオッズの比「オッズ比 (OR)」が「**相対危険度**」になる。この方法は大がかりな調査ではなく、結果を早く入手出来るという利点はあるが、症例の記憶など過去の情報をもとに行うので不正確さが大きくなる。

コホート研究とは疾病要因に曝露した人と曝露していない人からなる調査団体（コホート）<sup>3)</sup>を選び、この集団を一定期間追跡し、曝露した集団と曝露しない集団で疾病の発生率や死亡率を出す。そして、曝露した集団における疾病の発生率と曝露しない集団における疾病の比（相対危険度）を算出し、曝露した要因が及ぼした影響の強さや疾病との関連性を導き出す。コホート研究には前向きに現在から将来に向かって実施する「**前向きコホート研究**」と過去に遡ってある時点を出発点とする「**後ろ向きコホート研究**」とがある。

## (2) 疫学研究の方法

「症例－対照」調査において関連性の程度は、オッズ比（相対危険度）の大きさ、及び精度の両面から評価する必要がある。これに関しては、資源エネルギー庁（1993）の「電磁界影響に関する調査・検討」報告書では次のように述べられている。オッズ比の大きさを ①1.5 未満、②1.5～5の間、③5以上の3つに区分すると、1.5は疫学研究による検出が可能な最低値であり、5以上は疫学研究において関連性が強いことを表している。

しかし、オッズ比は一つの推定値で、その推定値が信頼できる範囲を示さなければならない。それには調査対象の数が重要な要素になる。通常「統計学的に有意」である知見とは95%の信頼が必要である。「**95%信頼区間 (95%CI)**」の範囲内にあることを示すために、信頼区間の下限値が1.0以下となる場合は、関連性が有意でないことを示している。また信頼区間の

---

3) コホートとはもともと古代ローマの歩兵隊の単位で300～600人からなる兵隊の群の意味である。

疫学では共通の因子をもった個人個人の全体という意味でこの言葉が使用されている。

幅が広いほど推定値の精度は低いため、精度について単純な指標として、信頼区間の下限値の上限値に対する比が用いられる。精度が高いほどこの指標は1に近づくが、0.5以上を「精度が高い」、0.5~0.25の間を「精度が中程」、0.25以下を「精度が低い」と区分される。

このように、同じオッズ比であっても、調査対象の数が多く、精度が高いほうが、関連性が強いことになる。しかし、統計的に有意である知見であっても、必ずしも原因と影響の関連性を証明できるものではない。そのため、統計的な結果が本当の因果的な関連性を示しているかどうかを探り出さなければならない。関連性があっても、因果関係があるとは限らない。特に結果が混在している時は、因果関係は認めにくくなる。これには調査結果に影響を与える可能性のある、その他の因子「**交絡因子**」<sup>4)</sup>の評価も行う。曝露率が疾病に罹った人（症例）と疾病に罹らなかつた人（対照）を比較した比が同じなら疾病と要因とは関連性はない。比が高ければ正の相関があり、疾病は曝露の原因かもしれない。症例が対照より低ければ負の相関になる。これは、要因が疾病から人々を守る手助けをしているのかもしれない。

コホート研究は疾病要因と疾病との関係をあきらかにするための豊富な情報が得られるが、ある要因による疾病を定量的に評価するためには、大きなコホートに対する長期間の観察が必要となる。しかし、集団の疾病発生率を直接測定出来るので信頼性の高い方法である。例えば、ある化学物質に接触する機会の多い環境で働いている人10,000名と普通の職場で働いている人10,000名を登録、質問調査し、10年間追跡したところ曝露群（接触する機会の多い人）で20名、非曝露群（普通の環境の人）で5名のガン症例が出現した場合、この相対危険度は4.0になる。

通常は、ある要因が疾病の原因であると結論するには、動物の実験研究による補足的なデータが必要になる。

---

4) 交絡因子 (confounding factor) : 疫学研究 (症例-対照) を行うとき、調べようとする危険因子以外で、疾病の出現頻度に影響を与えるものを言う。

### 2. 3 電磁界の健康影響についての疫学研究

商用周波電磁界（周波数が50Hzまたは60Hzの電磁界：物理学的な区分では300Hz以下の周波数を極低周波電磁界と言う）は、家庭内外での電気機器の使用により、われわれの身の回りにあふれている。そして、それらに曝露することによって健康影響が引き起こされているかどうかについて非常に多くの疫学研究が行われ、ガンを中心にさまざまな疾病との関連性が調査されている。主な疾病として一般人に対して、白血病、脳腫瘍、乳ガン、精巣ガン、自殺、胎児発育不全、流産、先天性奇形などが、職業人に対して、白血病、脳腫瘍、乳ガン、黒色腫、先天性奇形、アルツハイマー病などがある。

これらの疫学研究は、一般人に対してはほとんどが症例－対照研究であり、公衆の死亡登録や疾病登録（ガン登録）などを基に行われている。一方、職業人を対象にした調査では症例－対照研究とコホート研究が半々になっている。コホート研究では会社の従業員を対象として企業の記録を利用したものが多い。

電磁界の健康影響については、その関連を肯定する報告とこれを否定する報告が発表されている。さらに、これらの調査の中には、その調査方法に不適切な部分があり結果が疑問視されているものも多く個々の調査結果から疾患との関連性を判断できないという状況である。そこで、国内外のいろいろな専門機関が、これまでに発表された多くの調査報告（研究論文）の内容について客観的に詳細な再検討をおこない報告書を出している。

我が国においては環境庁（1992、1995）が「電磁環境の健康影響に関する調査研究」を、また資源エネルギー庁（1993）が「電磁界影響に関する調査・検討」報告書をまとめている。また海外においては、WHO（1984、1987）が「電磁界に関する環境保健基準」を、また最近では全米科学アカデミーも詳細な報告書「居住環境における電磁界曝露による健康への影響」（1996）をまとめている。これら、いずれの報告書も結論として、居住環境における商用周波電磁界が人間の健康に有害であるという証拠は認められないとしている。

### 2. 3. 1 一般人に対する主な疫学研究

電磁界と疾病との関連性については、1979年に Wertheimer and Leeper (米国) が「ワイヤコード」(磁界曝露指標で送電線の距離や配置などによって分類する指標) と住居との接近度に対する小児ガン死亡率との関連を報告してから、これらに関する報告が出され始めた。1992年にはスウェーデンのグループが小児白血病増加の可能性を報告し、その後いろいろな小児ガンのタイプと送電線への近接度との関連の可能性について解析した調査報告が出されている。そのなかには、統計的に有意な関連性を示す結果を報告しているものもあり、電磁界とガンの関連について問題視するきっかけとなった。しかし、これらとは逆に最近では送電線との接近度や実際に曝露されている磁界の値とガンとの関連性は認められなかったという結果が報告されてきている。特に、米国国立ガン研究所の M. S. Linet 等は大規模な調査を実施し、居住環境における磁界が小児のリンパ性白血病のリスクを増加させるという証拠は認められなかったという報告(1997年7月)を出している。

また、小児ガン以外でも多くの調査が報告されているが、これらも関連性を指摘した報告と関連性は認められなかったとする報告がなされている。

#### (1) 小児ガン調査

送電線とガンとの関連性についての最初の調査は1979年に Wertheimer and Leeper (米国) により報告された。この報告は高電流の電力線から40m (131ft) 以内に居住した子供は他の子供より2~3倍多くガンで死亡しており、これは送電線からの磁界に曝露したためではないかとしている。しかし、実際の住居での磁界は測定しておらず、電力線の電流の大きさと住居との距離に基づいて磁界を推定している。

この報告を含め小児ガンに関する報告は14編ある(Wertheimer and leeper 1979; Fulton et al 1980; Tomenius 1986; Savitz et al 1988; Coleman et al 1989; Lin and Lu 1989; Myers et al 1990; London et al 1991; Lowenthal et al 1991; Feychting and Ahlbom 1993; Olsen et al 1993; Petridou et al 1993; Verkasalo 1993; Fajardo - Guierrez 1993)。これらの内8編については、あるタイプのガンと送電線からの距離

の間に正の相関（有意でないものも含め）を示している。また、小児白血病については15報告中4報告で有意な関連性を示している。

スウェーデンで行われた調査（Feychting and Ahlbom 1993）はストックホルム市に入ってきている220および400kV送電線から両側300m(984ft)以内の40万人の住民を選定し、1960～1985年のガン症例と対照を比較（症例－対照研究）している。その結果、送電線から50m（164ft）以内に住むスウェーデンの15歳以下の子供において0.3 $\mu$ T（3mG）以上では白血病発生が有意に高い（相対危険度3.8、95%CI 1.4～9.3）という結果になった。しかし、慢性リンパ性白血病や中枢神経系腫瘍などでは顕著な関連性はなかった。

この結果は非常に少数の症例に基づいて計算されたものであり、また、住宅内での測定された現時点での磁界レベルに対してガンのオッズ比を計算すると関連性が認められなかった。そのため、この結論に対して疑問視する人もいる。

米国国立ガン研究所（NCI）のM. S. Linet等の居住環境における小児の急性リンパ性白血病の調査は、調査規模が大きく過去の調査において指摘されていた調査方法等における問題点のいくつかを改良して研究が実施された。

この調査では、高圧線や家庭電気製品から発生する電磁界とガンの発生との間の関連性は認められなかった。

調査は1989年から1994年の中での15歳未満の子供を対象におこなわれた。15歳未満の「小児ガングループ」に登録された子供達で、急性リンパ性白血病の子供は638人で、その対照となる健康な小児は620名である。症例数の大きさはこれまでの調査事例の数倍の規模であり、前述のスウェーデンの調査と比べると10倍以上の大規模なものである。

本調査の特徴は磁界の曝露評価に対象者の現在の住居と以前に住んでいた住居において磁界測定器を用いて磁界の測定を行っていることである。この場合、子供の寝室の磁界を24時間連続して測定するとともに、台所や居間などの生活空間も測定し、時間平均の磁界の大きさと小児白血病の症例数とを比較している。さらにワイヤコードによる調査も合わせて行って

いる。

結果は小児の急性リンパ性白血病のリスクは測定磁界(時間加重平均値)と関連が無かった。0.065  $\mu$ T (0.65mG) 以下と比べて 0.2  $\mu$ T (2mG) 超過の曝露での急性リンパ性白血病のオッズ比は 1.24 (95%CI 0.86~1.79) であった。

また、最も高いワイヤコード分類による磁界レベルに属するところに住んでいた子供において、急性リンパ性白血病のリスクは増加しなかった。さらに、妊娠していた時母親が住んでいた住居の磁界レベルとも有意な関連はなかった。

最近では、1999年にカナダとイギリスで相次いで小児ガンに関する研究結果が発表された。

カナダでは2つの研究グループが、磁界曝露と小児白血病に関する研究を、ほぼ時期を同じくして発表した。1つはオンタリオ州において、1985年から1993年に居住していた小児を対象にした研究(L. M. Green et al 1999)であり、1999年6月に2つの雑誌(International Journal of Cancer と Cancer Causes and Control)に別々の論文に分けて発表された。このうち一方の論文では、症例88人、対照133人を選び、曝露評価として測定磁界、子供が主に生活する場所に割り当てられたワイヤコード、48時間個人測定磁界の3つを用いた。本研究では、0.14  $\mu$ T (1.4mG) 以上の個人測定磁界と6歳未満の急性リンパ性白血病(OR=5.7 (95%信頼区間 1.4~22.5)) および全白血病(OR=3.7 (95%CI 1.1~12.5))との間に関連が見られた。しかし測定磁界とワイヤコードと小児白血病の間に関連は見られなかった。またもう一方の論文では、症例201人、対照406人を選び、曝露評価は測定磁界とワイヤコードを用いた。測定磁界では6歳未満ではオッズ比が高くなる傾向が見られた(OR=13.52 (95%CI 1.20~152.2))が、ワイヤコードではほとんど関連性が見られなかった。

カナダで行われたもう一つの研究(M. L. McBride et al 1999)は、1999年5月に American Journal of Epidemiology 誌に発表された。この研究は小児白血病に関する症例-対照研究であり、1990年から1994年にカナダの5つの州に住む0才から14才の子供達399人づつを症例と対照に選んだ。

曝露評価は、48 時間個人測定磁界、診断／参照日まで対象者が居住していた環境のワイヤコードおよび測定磁界を用いている。48 時間個人曝露測定では、白血病 (OR=0.95, 95%信頼区間 0.72-1.26) や急性リンパ性白血病 (OR=0.93 (95%CI 0.70~1.25)) との関連性は証明されなかった。

また、急性リンパ性白血病の統計上有意でない増加が、診断/参照日の 2 年前の高いワイヤコードで観察された (OR=1.72 (95%CI 0.54~5.45))。しかし診断/参照日の 2 年前および生まれてからの全期間のそれぞれの推定磁界、48 時間個人測定磁界のどれとも明らかな関連性はなかった。

イギリスの研究は、著名な疫学者である Richard Doll 卿を委員長にした英国小児ガン研究 (UKCCS) グループが実施し、1999 年 12 月に Lancet 誌に発表された。この研究は、イングランド、ウェールズ、スコットランド全土を対象範囲とした小児ガンに関する症例－対照研究である。各症例に対して 1 人の対照が含まれ、関連する家庭及び学校での磁界測定は、2,226 組のマッチさせたペアについて実施した。この測定値 (送電線の負荷に関する過去の記録と電気器具による磁界に関して補正されている) は、疾病の診断日 (対照に関してはそれに相当する日) の前、1 年間の平均磁界推定に用いた。

平均の曝露が  $0.2 \mu\text{T}$  (2mG) 以上の子供に関しては、 $0.1 \mu\text{T}$  (1mG) 以下の子供と比較すると、補正後のオッズ比は、急性リンパ芽球性白血病 : 0.92 (95%CI 0.47~1.79)、白血病全体 : 0.90 (95%CI 0.49~1.63)、中枢神経系の腫瘍 : 0.46 (95%CI 0.11~1.86)、その他の悪性疾患 : 0.97 (95%CI 0.46~2.05)、悪性疾患全体 : 0.87 (95%CI 0.56~1.35) となり、結論的に、本研究では、英国の電力供給に関連する磁界への曝露が、小児の白血病、中枢神経系のガン、その他の小児ガンのリスクを増加させるという証拠は得られなかった。

## (2) 生殖への影響

妊娠への影響に関する疫学的調査としては、パソコン等の表示用モニター (CRT ディスプレイ) で作業する女性における生殖への影響が調査されている。これらの研究からは、生殖への有害な影響を裏付ける一致した結果

は得られていない。

また、Bracken et al 1995 が報告した調査は症例数が多く詳細な曝露評価を行っているが、出生時の体重、子宮内成長率は電磁界曝露に関連しておらず、有害な影響と磁界レベルにも関連がなかったと報告している。この報告における曝露量評価は、住居外の送電線の送電量、個人曝露量、住居内の 24 時間測定、電気毛布、ウォーターベッドおよびモニターの使用などで評価されている。

### (3) 成人のガン

居住環境での磁界曝露とガンに関する調査は、小児ガンのものにくらべると少数である。また、実施している調査においても症例数が少ないため結論がだせるような状況ではない。

## 2. 3. 2 職業人に対する主な疫学研究

電話や電力関連企業の従業員に対するコホート研究が数多く行われている。米国の主要電力会社 5 社で 1950 年から 1986 年にかけて 6 か月以上働いた男性 (138,905 人) に関してコホート研究が行われた。全体死亡数およびガン死亡数では磁界曝露が増すにつれて僅かに増加した。しかし、白血病死亡者数で見ると、電気技師を除いて磁界との関連性は見られなかった。脳腫瘍については有意に高かった。この調査では白血病との関連は認められなかったが、脳腫瘍との関連性が指摘されている。このような調査はノルウェー、フランス、カナダ、デンマークなどでも実施されているが、これらの結果を詳細に比べると、ある研究においては電磁界曝露との関連性が指摘されたある種のガンが他の研究において関連性が認められなかったり、同じデータを使った研究でも調査者によって関連性に違いがあった。このように、調査によって相違がみられ、職業での磁界曝露とガンとの関連についての一貫した結果は得られていない。

## 2. 4 専門機関による疫学研究の評価

### (1) 資源エネルギー庁の調査報告

前述の資源エネルギー庁公益事業部が 1993 年に設置した「電磁界影響調

査検討会」の出した「電磁界影響に関する調査・検討報告書」は商用周波磁界と一般人の健康影響についての主要な疫学論文 28 編と職業人についての主要な疫学論文 49 編を評価した。

その結論は「実際の曝露量や、量―反応関係が不明確であったり交絡因子が十分排除されていない等の欠点があるものが大部分であった。交絡因子などの検討をかなり行ったものもあるが、それらは対象となった症例数が少なく、統計的精度が低い。」というものであった。このことから、「現時点では、疫学研究結果を基に居住環境の磁界強度と人の健康との関連性を明確にすることは難しい」としている。

## (2) 環境庁の調査報告

「電磁環境の健康影響に関する調査研究」(1995)では評価した疫学研究について、「疫学的にリスクが存在するかどうかという判断の基準としては、相対危険度あるいはオッズ比で示される関連の強固さ、さまざまな研究が同じような方向を示す関連の一致性、他のリスクがないという関連の特異性、曝露から疾病の発生までの時間的關係の妥当性、生物学的な関連の整合性があげられる。今回レビューした研究は、一貫性をもってこれらの基準を満たすものではなく、現時点で磁界環境の健康影響の有無を結論づけることはできない。」と結論している。

## (3) 全米科学アカデミー報告書

「居住環境における電磁界曝露による健康への影響」(1996)では評価した疫学的調査について「これまでの議論は、磁界曝露と小児白血病との間の関連性の有無について注目してきたにもかかわらず、多くの疫学者は、発生率におけるそのようなわずかな増加は本質的に信頼できないと見なしている。磁界曝露と、その他の様々なタイプのガン、神経行動的障害、そして生殖機能への有害な影響との間の関連性を提示した研究がいくつかあるが、それらの結果は一貫性がなく、信頼できる関連性の証拠をなすものではない。」と評価している。

## 2. 5 まとめ

疫学研究によって関連性を調べるためには、対象となる症例の数が多く、統計的精度が高くなければならない。また、問題の要因、例えば電界、磁界などの曝露量の調査が必要である。さらに、疫学研究は統計的な関連性を示すだけであるから、全く別のものによって起こる関連性を見ていることもあり得る。そのため、因果関係を見極めるためには生物学的研究からメカニズムを解明する必要がある。このため、疫学研究によって出された結果については慎重に評価しなければならず、疫学研究の結果のみで問題の有無を判断してはならない。

### 第3章 生物学的研究（実験室での研究）

一部の疫学研究において、リンパ腫、白血病をはじめとするガンと電磁界の曝露との関係について弱い関連性があるという報告がなされている。前章でも述べたように、電磁界が生体に影響を及ぼすかどうか判断するためには、細胞あるいは動物を用いた実験により因果関係の有無を明らかにし、発病に至る可能なメカニズムを解明することが必要である。これまで、電磁界が生体へ及ぼす影響の可能性や作用メカニズムを解明するために細胞や実験動物を用いた実験が行われているが、影響なしとするものもあれば影響ありとするものもある。電磁界の生体への影響についてはまだよくわかっていないことが多く、電磁界が生体に何らかの影響を及ぼすとする実験結果の報告がなされた場合、追実験によりその再現性を確認し、慎重に検討を行う必要がある。影響がありとする報告の追実験の結果は必ずしも一致しているわけではなく、その評価についてさらに検討を要すると考えられている。ここでは、電気学会電磁界生体影響問題調査特別委員会による報告書「電磁界の生体影響に関する現状と今後の課題」（平成10年10月）の内容を中心として解説する。

#### 3. 1 *In vitro*（試験管内）研究

細胞を用いた「*in vitro*」の研究では、電磁界の曝露が生体に影響を与えるかどうかについて細胞という基本単位のレベルで調べることができるため、メカニズムを比較的詳しく探ることができる。

##### 3. 1. 1 遺伝子レベルに関する研究

電離放射線は「DNA」に作用し、染色体異常等を引き起こすことが知られている。ELF電磁界は、電離放射線に比べ量子としてのエネルギーは非常に小さく、DNAの化学結合を壊すほどのエネルギーを持たないことから、直接的にDNA損傷や染色体異常を起こし、遺伝子変化を誘発することはないと考えられている。発ガンの過程は、「イニシエーション」、「プロモーション」、「プログレッション」という3段階を経て診断可能なガンに成長する「発ガン多段階説」が最も有力な仮説である。イニシエーション（発現）とは、発ガンを引き起こす

因子によって遺伝子に傷がつけられるという段階で、発ガン過程の第1歩である。プロモーション（促進）とは、傷ついた遺伝子等の働きにより、異常な遺伝子を持った細胞の増殖が引き起こされることである。最後のプログレッション（進行）は、増殖が進み腫瘍を形成していく過程のことである。電磁界の発ガンへの影響については、主にプロモーション作用の有無を中心に研究が行われている。

DNAの遺伝情報は「*mRNA*」に「転写」され、*mRNA*の情報がアミノ酸配列に「翻訳」されることにより最終的にタンパク質が生成される。ある種の刺激が細胞に加えられると、初期遺伝子と呼ばれる遺伝子の活性化・発現が起こり次の遺伝子の発現の引き金となる。「ガン遺伝子」と呼ばれる初期遺伝子として「*c-fos*」、「*c-myc*」等が知られている。これらのガン遺伝子や熱ストレス関連遺伝子などが電磁界曝露により活性化されることを示す報告が出されている。これらの報告では、電磁界が環境ストレスとして作用する可能性があるとしているが、再現性はまだ確認されていない。細胞増殖に関して、乳腺腫瘍細胞（MCF-7細胞）の成長に対する「メラトニン」の抑制作用に対して電磁界曝露が阻害する作用を有することが報告されたが、再現性はまだ確認されていない。生活環境で曝露される可能性のある電磁界の約千倍程度の非常に高い強度の電磁界により細胞の突然変異が誘発される可能性を示唆する報告もあるが、これまでのところ、通常的生活レベルでのELF電磁界により突然変異が誘発される可能性は無視するほど低いと考えられている。

### 3. 1. 2 免疫系に関する実験

免疫系機能に対する影響については、細胞間情報伝達の仲介物質である「サイトカイン」の産出量への影響について調べた実験がある。これらの研究では、電磁界照射によりサイトカインの産生量が増加したとするものと変化なしとするものがある。電磁界が免疫系に与える影響については、今後さらに再現性の確認に焦点を絞った検討が望まれている。

### 3. 1. 3 細胞のシグナル伝達に関する実験

細胞の「増殖」、「分化」、「遺伝子発現」などの調節は、外部からの刺激

が細胞膜を通して核や細胞質などの系にシグナルとして伝わることにより行われている。細胞膜にあるシグナル伝達系として受容体の酵素活性やイオンチャネルでのイオンの流出入などへの電磁界への影響が調べられている。なかでも、「カルシウムイオン」の細胞への流出入は最も注目されている。細胞が外部からの刺激を受けると、カルシウムイオンが細胞外から流入あるいは細胞内貯蔵部位（ミトコンドリア、核、小胞体）から放出されることにより、細胞内カルシウムイオン濃度が上昇し、 $Ca^{2+}$ 結合たんぱく質を介して種々の生理作用が引き起こされる。このように、細胞外的情報を細胞内に伝える細胞内情報伝達物質（セカンドメッセンジャー）の一種としてカルシウムイオンは重要な働きをもっている。細胞内のカルシウム代謝に対して電磁界がどのような作用を及ぼすかは作用メカニズムの観点から重要な検討課題である。これまで、特に、脳組織、リンパ細胞等の組織におけるカルシウムイオン放出ないしは吸収、神経細胞のカルシウムイオンチャネルへの影響などが大きな課題として取り上げられてきた。リンパ球を細胞分裂誘導物質で刺激後に電磁界照射を行うと、細胞内カルシウムイオン濃度が影響を受けることを示す報告がいくつかある。これらの報告では、電磁界照射が細胞内カルシウムイオン濃度に対して、促進効果を示すとするものもあれば抑制効果を示すとするものもある。また、効果なしの結果を示すものもある。これらの結果の違いは電磁界の周波数の違いによるものとする考えも出されているが、まだ一致した結果は得られていない。細胞膜表面のイオンチャネルの分子活動の詳しい情報を得ることのできるパッチクランプ法により、カルシウム濃度への電磁界の影響を調べた実験も行われているが、電磁界曝露の影響は観察されていない。

オルニチンデカルボキシラーゼ(ODC)は、細胞増殖に不可欠の酵素であり、特にガン細胞などの増殖能が高い細胞では活性が高く、「ODC活性」を増加させる因子は腫瘍に関連する可能性がある。したがって、電磁界曝露によってODC活性が変化するかどうか調べることにより、電磁界の発ガン促進因子としての可能性を探ることができる。電磁界照射によりODC活性の変化を調べた実験の中には、活性が増加したものの、活性の増加が抑制されたものもある一方、活性の増加が見られない結果もいくつか報告されている。

「プロテインキナーゼC(PKC)」は、ホルボールエステルのような発ガン

物質により特異的に活性化されるため、PKCの活性度を調べることで発ガンとの関連を明らかにすることができると考えられている。主に白血病細胞を用いて電磁界曝露のPKC活性への影響が調べられており、電磁界照射によりPKC活性が増加したことを示す実験もいくつか報告されている。しかしながら、曝露時の細胞濃度によって活性度が逆転する結果も示されており、再現性ある結果はまだ得られていない。

### 3. 2 In vivo (生体内) 研究

実験動物を用いた「*in vivo*」の研究では、電磁界の曝露が生体に何らかの疾病あるいは生理的な変化を引き起こすかどうかを直接観察することができる。

#### 3. 2. 1 ガンに関する研究

ELF電磁界は量子としてのエネルギーが小さいことから、発ガンのイニシエーション作用はないと考えられている。そのため、疫学研究で報告されているような白血病や脳腫瘍のようなガンと関係するならば、種々の発ガン物質で誘発されたガンに対して協調的に働くプロモーション作用であろうという仮定のもとにモデル実験が行われている。

皮膚ガンに対して電磁界がプロモーションあるいはコ・プロモーション作用を有するかどうか検討するためにマウスを用いたモデル実験が行われている。これらの中には、電磁界曝露が僅かに腫瘍の発育を早めることを観察したものもある一方、皮膚ガンの発症は認められない結果を示したものもある。皮膚ガンの実験には、SENCAR系マウスと呼ばれるマウスが主に用いられているが、電磁界のプロモータ作用を調べるモデルとしてその感受性に対する疑問も提起されている。

ラットの肝臓病巣の発達に対する電磁界のプロモータ作用を調べた実験では、電磁界のプロモータ作用は見出されていない。

疫学研究で示唆されているリンパ腫、白血病に関する動物実験は極めて少ない。リンパ腫に関する実験では、X線でリンパ腫を誘発させ電磁界曝露によるプロモータ作用の有無を調べたものがあるが、電磁界のプロモータ作用は確認されていない。白血病については、白血病を自然発症する系統のラットを用いて

電磁界曝露実験が行われているが、白血病の発症に対する電磁界の作用は見られていない。

電磁界に生体が曝露されると松果体からのメラトニン分泌が抑制され、エストロゲンやプロラクチン分泌の亢進をもたらし、その結果、ホルモン感受性腫瘍の成長を加速するのではないかとの仮説が出されている。この仮説を検証する立場から、ラットの乳腺腫瘍の発症について、発ガン物質と電磁界を同時に与え、電磁界がプロモータまたはコ・プロモータ作用を有しているかどうか調べる実験が行われている。電磁界曝露と腫瘍の成長とに関連性があり、量-反応関係があることを示唆する実験結果が出されている一方、プロモータ作用は見られていない実験も報告されている。電磁界の乳腺腫瘍に対する影響については、再現性の確認のための追実験が進行中である。

### 3. 2. 2 神経系・行動に関する実験

様々な外部刺激に対する行動変化を観察することにより、その効果を評価する学習心理学、中枢神経系に対する薬物等の影響を観察する行動薬理学等の手法を用いて、電磁界の中枢神経系、行動に対して作用するかどうか研究が行われている。

現在のところ、哺乳類では磁界を感知する器官は見つけられていない。したがって、行動に何らかの影響が見られるとすれば、中枢神経系や内分泌系を介しての間接的な効果であろうと考えられている。

磁界の行動への影響を調べる実験では、主に、磁界に対する感知・忌避の有無、学習・記憶に対する影響について検討が行われている。オープンフィールド、オペラント行動、自発運動活性を指標とした影響実験が行われている。

ニューヨーク州送電線プロジェクトの一つとして電界と磁界の重畳曝露下でのサルオペラント行動、誘発電位（聴覚誘発電位、視覚誘発電位、体性感覚電位）および脳脊髄液ドーパミン、セロトニン等神経伝達物質への影響を調べた実験が行われた。その結果、オペラント行動には影響は見られていないが、体性感覚電位には僅かな影響が見られ、また、ドーパミン、セロトニンの濃度に影響が観察されている。さらに、電磁界中に胎仔の状態で曝露されたラットのオペラント実験が行われている。この結果は、周産期に電磁界に曝露される

とその後の行動に何らかの影響が見られることを示唆している。しかしながら、その後、これらの実験の再現は行われていない。これらの実験では電界と磁界が重畳して曝露されており、観察された結果が電界によるものなのか、磁界によるものなのか明確にならない。したがって、電界、磁界単独曝露での実験による評価が必要である。

オペラント行動、オープンフィールドや歩行運動活性などの単純な行動実験により、磁界曝露の影響が調べられてきた。ラットのオペラント行動実験において、磁界に対する感受性を示唆する実験や交流磁界と直流磁界を重畳させた条件下において行動停止が見られた実験の再現実験では、いずれにおいても磁界曝露の影響は見られない結果が得られている。ヒトに近い霊長類のヒヒのオペラント行動や社会的行動への電界・磁界の重畳曝露実験からは、行動面への影響は認められていない。また、磁界を曝露したシャトルボックスを用いてラットの忌避行動の有無を調べた実験でも忌避行動は観察されていない。

記憶障害患者などの検査結果から、記憶機能で重要な役割を果たしているのが、コリン作動ニューロンではないかとの推測や、ラットのコリン作動性ニューロンの働きを抑制する薬物を投与したりして存在部位を破壊すると、学習や記憶能力の低下を招くことからコリン作動性ニューロンが学習・記憶機能の中心的役割を果たしているのではないかと考えられている。磁界曝露によるコリン作動性ニューロンの発育や機能は影響は観察されていない。したがって、磁界曝露による学習機能の低下はないものと推測されている。

### 3. 2. 3 生殖・発育に関する実験

マウスやラットの胚の発育や組織形態への影響に関する多くの実験では、妊娠時から約20日程度磁界に曝露し、胎児の着床、生存・死亡胚、胎仔体重、検査時点での奇形発生割合などが影響の評価指標として取り上げられ、曝露群と対照群で比較検討している。また、ニワトリの胚を用いた場合には形態的な異常も指標としている。発生初期のニワトリ胚の形態への磁界曝露影響について、米国環境保護庁(EPA)が中心となり「The Henhouse Project」が行われた。このプロジェクトは世界6ヶ所の研究機関(米国3ヶ所、スペイン、カナダ、スウェーデン各1ヶ所)で同じ曝露装置、同じ実験条件でニワトリの胚発生へのパルス

磁界曝露実験を行い、再現性を検討したものである。5ヶ所のデータでは胚の発生異常が対照に比べ有意に増加した結果が見られたが、研究所間で観察される差を説明する実験条件を特定できなかつた。その後、ニワトリ胚にパルス磁界や低周波磁界を照射した実験が行われているが、明確な結論は得られていない。同様に、マウス、ラットを用いてパルス磁界による生殖機能への影響を調べる研究がいくつか報告されているが明確な結論は得られていない。

### 3. 2. 4 神経内分泌に関する実験

磁界が誘発する生物学的な影響メカニズム研究において、メラトニンが注目されるようになった。メラトニンの抑制により、松果体機能が低下し、腫瘍細胞の成長が促進される仮説が提案されている。このことから電磁界曝露が松果体機能に与える影響を調べることで、電磁界と腫瘍発生・抑制との関連性が明らかになるのではないかと仮定し、実験研究が行われている。

ラットに磁界を24時間曝露した実験では尿中に排泄されるメラトニン代謝物(6-OHMs)で見ると、夜間のメラトニン分泌抑制は観察されていない。一方、ラットを6週間磁界曝露した実験では、回転円磁界曝露は夜間のメラトニン分泌を抑制することが観察された。しかしながら、直線磁界では抑制効果は観察されていない。

ヒヒを用いた実験は、個体数が少ないが、垂直電界と水平磁界の重畳実験で血清メラトニンへの影響が観察されている。6週間にわたる曝露実験において電磁界の増減を急激に行った場合、メラトニンの抑制が観察されたが、電磁界の増減を緩やかに行った場合は抑制効果は観察されていない。

送電線下の状況を模擬し、電界と磁界を重畳しヒツジに曝露した実験では、夜間のメラトニンレベルに曝露の影響は見出されていない。

### 3. 3 まとめ

現段階では、統一した見解が得られておらず、再検討が必要とされ、追実験が進行中で課題も残されている。これまでの実験結果から、電磁界の生体への影響を調べる実験では電磁界を曝露する条件(電磁界の強度、周波数、波形、曝露期間など)や対象の動物や細胞の種類が違えば、異なる結果が観察される

可能性があると考えられる。また、信頼性の高い結果を得るためには、電磁界以外の因子の実験系への影響を排除するなど実験条件を厳密に整備する必要がある。これまで出されている研究報告の中には実験条件や統計解析の手法が不明なものもある。今後、さらに電磁界の生体作用の有無を明らかにするための研究およびその厳密な評価が継続して行われなければならない。

これまで、電磁界の生体への影響を及ぼすか否かを調べるために細胞や動物個体にわたり、*in vitro*、*in vivo* 実験が行われている。実験結果から再現性が明らかになった実験もいくつかあり、比較的高磁界曝露の実験からは *in vitro* および *in vivo* 実験ともに何らかの生物学的変化が観察されている。しかしながら、居住環境レベル程度の磁界曝露では有意な生物学的変化や影響は見出されていないことから、ヒトの健康に有害な影響を与えると判断するには至っていない。

## 第4章 政府の研究活動

### 4.1 省庁間研究状況

1996年（平成8年）8月13日、我が国では、電磁界問題に関する情報交換を目的に7省庁間の連絡会議が発足した。この問題に関する各省庁の取り組み方には濃淡がある。1997年の時点までの、電磁界基準に関する国内外の主要機関の取組状況を表4.1に示した。

1990年代に入ってから環境庁と通産省が最も活発にこの問題に取り組んでいる。環境庁では日本環境協会に委託して「電磁環境に関する調査研究」を行った結果を1992年に、「電磁環境の健康影響に関する調査研究」を行った結果を1995年に報告書としてそれぞれ取りまとめた。これらの報告書は関連する原著論文、総説論文を対象として収集整理し、純粹に科学的見地から現段階で判明している範囲を明らかにすることを基本方針としている。引き続き1996年からは2000年までの5年間にわたって国立環境研究所において300Hz以下の低周波のホルモン、免疫などへの影響の調査を行っている。

通産省では、資源エネルギー庁が1990年に、この問題に造詣の深い専門家による「電磁界影響調査検討会」を設置し、居住環境における磁界の把握、国内外の磁界影響に関する文献サーベイ、国際機関や各国の基準・ガイドラインなどの調査を行い、現状の総合評価と今後の課題について1993年に「電磁界影響に関する調査・検討報告書」として取りまとめた。次いで、電磁界の健康影響についての科学的解明に資するため、1993年から2000年までの8ヵ年計画で電力中央研究所に委託し電力設備環境影響調査研究委員会を発足させた。1993～1996年にかけて行われた電磁界が動物の生殖に及ぼす影響について動物実験を行った結果について取りまとめ中間報告書としている。1997年からは腫瘍に関する動物実験を開始している。

郵政省は移動体通信いわゆる携帯電話等の電波に対する防護指針を電気通信審議会の生体電磁環境委員会において「人体が電磁波に局所的にさらされる場合等の指針」、「電磁環境の測定法、推定法」、「今後の電波防護指針の取扱」、「今後研究を進めることが必要な項目」について1996～1997年に検討し、最終的には1997年に電気通信審議会として「電波利用における人体防護の在り方」

を答申している。また 1999 年にはその答申を受け、電波法施行規則の一部改正が施行され、電波強度値の規定が追加されている。

運輸省ではリニヤモーターカーとの関連から、1997 年より 1999 年までの 3 ヶ年計画で研究および評価を始めた。労働省は 1997 年より産業医学総合研究所および中央労働災害防止協会へ委託し、動物実験、疫学研究、磁界低減技術等についての検討および労働現場における電磁波の人体影響について調査している。厚生省においては日常生活の中の電磁波問題について検討を進める予定である。

表 4.1 電磁界影響に対する主要機関の評価

機関名および発表文献	結 論
世界保健機関 (WHO) : 環境保健基準 69 (磁界) : 1987 年	5mT 以下の 50/60Hz 磁界では有害な生物学的影響は認められていない。これまでの疫学研究は、まだ予備的なものであり、これらの結果を受け入れるには今後かなりの研究が必要となる。 極低周波磁界とガンの関係を明らかにするために、さらに疫学研究と細胞、動物実験による検証が必要である。
電気事業研究国際協力機構 (IERE) : 電磁界の健康に関わる疫学的研究評価のための基準 : 1988 年	代表的な疫学論文 17 編を検討し、「曝露量測定」「交絡因子」「研究の一貫性」「研究数、標本数」の面でいずれも信頼性が低い、と評価。
米国議会技術評価局 (OTA) : 商用周波電磁界の生物学的影響 : 1989 年	実験では電磁界が染色体に損傷を与えないことから、電磁界が発ガン因子になるとは思われない。 疫学研究によって磁界とガンの間に弱い関連性を示すものがあるが、因果関係は認められない。さらに研究が必要である。
国際放射線防護委員会 (IRPA) 50/60Hz 電磁界の暫定ガイドライン : 1990 年	これまでの研究では、現状レベルでの曝露が対象を必要とするような証拠は得られていない。しかし、さらに研究が必要であるとして、現状の知見に基づき、暫定的な曝露の限界を設定している。
国際大電力システム会議 (CIGRE) : 商用周波電磁界とガンに関する研究の現状 : 1991 年	電磁界がガンの原因であるとする証拠には説得力がなく、その関連性は依然として疑わしい。 重要なことなので、引き続き研究を進める必要がある。
英国放射線防護委員会 (NRPB) : 極低周波電磁界曝露による生物学的影響 : 1991 年	電磁界の生物学的相互作用の知識は限られており、その影響は十分に確率されたものではないので、現時点では、人の電磁界曝露を制限する理由にはならない。さらに研究が必要である。
NRPB : 電磁界とガンのリスク (疫学研究による) : 1992 年	これまでの疫学的な知見は、電力設備近傍の住居や家電機器の使用、父親の職業的曝露に伴う小児や成人の発ガンの危険性に対し確たる証拠がなく、今後の調査・検討を行うための仮説に過ぎない。
環境庁 (日本環境協会) : 電磁環境に関する調査研究 : 1992 年	ELF 電磁界の生体影響に関しては従来の知見をとくに修正する必要はない。生活環境における ELF 電磁界を測定した結果、IRPA の暫定指針の連続曝露限界値以下であった。疫学的研究によるだけでは、結論が出せそうにないことを暗示している。今後は動物を使った研究が必要であろう。
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 : 1993 年	現時点において、居住環境で生じる商用周波磁界により、人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。しかし、科学的な解明を行っていくことは重要であり、さらに研究が必要である。
環境庁 (日本環境協会) : 電磁環境の健康影響に関する調査研究 : 1995 年	平成 3 年度のレビューと同じく、WHO 刊行の 2 報告に示される ELF 電磁界の生体影響に関するこれまでの知見を修正するに足る報告はない。疫学研究やそれを補足する研究に必要な技術的事項に関する課題を解決し、具体的な研究手法を確立することが必要となっている。
米国物理学会 : 電力線の電磁界と公衆の健康 : 1995 年	科学的な文献や、他の審査機関によって審査された報告では、ガンと電力線の電磁界の間に一貫した、有意な関連性は示されていない。
全米科学アカデミー (NAS) : 居住環境における電磁界曝露による健康への影響 : 1996 年	居住環境の電界、磁界への曝露によって、ガン、神経行動的な悪影響、生殖・発育の影響が生じることを示す決定的で一貫した証拠はない。

\* 関根泰次 : 第一回電磁界の生体影響に関するシンポジウム、平成 9 年 7 月 11 日、電気学会電磁界生体影響問題調査特別委員会、文献 32

## 4. 2 国際的研究

表 4.2 は低周波電磁界の規制の元となった勧告・ガイドラインを示している。世界保健機関 (WHO) は 1984 年に「環境保健基準 35 (EHC35)」において極低周波電磁界について、1987 年には「環境保健基準 69 (EHC69)」において磁界について勧告しており、1989 年には磁界に関する保健と安全の指針を出している。「国際放射線防護学会 (IRPA)」の中に設けられていた「国際非電離放射線委員会 (INIRC)」は 1990 年に WHO の協力の下に EHC35 および 69 を参考にして、50/60Hz 電磁界への曝露に関する暫定ガイドラインを示した。対象を職業者と一般公衆に分け、更に作業条件によって電界及び磁界の値が示されている。磁界のガイドライン値としては、一般公衆に関しては  $100 \mu\text{T}$  (1000mG)、職業者に関しては  $500 \mu\text{T}$  (5000mG) が示されている。IRPA の INIRC は、1991 年には磁気共鳴検査を受ける患者の防護に関する勧告も出した。

表 4.2 低周波電磁界に関する主な刊行物

年	機関	発表文献
1984	WHO	環境保健基準 35 (極低周波電磁界)
1987	WHO	環境保健基準 69 (磁界)
1990	IRPA/INIRC	50/60Hz 電磁界への曝露制限に関する暫定ガイドライン (WHO の環境保健基準 35, 69 を参考)
1991	IRPA/INIRC	磁気共鳴検査を受ける患者の防護
1994	ICNIRP	静磁界への曝露制限に関するガイドライン
1998	ICNIRP	時間変化する電界、磁界及び電磁界への曝露制限のためのガイドライン (300GHz まで)

1992 年に、INIRC は、IRPA から独立して「国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP)」となった。ICNIRP は、1994 年に表 4.3 に示す静磁界への曝露限度のガイドラインを示した。

表 4.3 静磁界への曝露制限に関するガイドライン

曝露の特徴		磁束密度
職業者	就業日の1日平均（時間加重平均）	200mT
	上限値	2T
	手・足	5T
一般公衆	連続曝露	40mT

$$1\text{T}=1,000\text{mT}=10,000\text{G} (=10^7\text{mG})$$

- 注1) 心臓ペースメーカや体内設置型の電動機器あるいは鉄磁性の物体を身体に装着した人については、ここに示した曝露制限値では保護できないと考えられる。多くの心臓ペースメーカは、0.5mT以下では影響はないと考えられる。体内設置型の電動機器、あるいは鉄磁性の物体（心臓ペースメーカ以外）を身体に装着した人の場合、数mT以上の場合は影響を受ける可能性がある。
- 注2) 磁束密度が3mTを超えた場合は、飛行する（空中の）金属物体からの危害を防止するための注意が必要である。
- 注3) アナログ時計、クレジットカード、磁気テープ、コンピュータのディスクなどは、1mT程度の曝露で悪影響を受ける可能性があるが、これは人体への安全性についての問題とはならない。
- 注4) 一般公衆の内、偶発的に40mT以上の磁束密度を生成する機器に接触することがある場合も、適切な職業曝露制限を超えない場合には許可されるべきである。

また ICNIRP は、1998 年には表 4.4 に示すように時間変化する電磁界への曝露制限のガイドラインを示した。このガイドラインは、体内に誘導される電流密度を示した「基本制限」と、電磁界の強さを示した「参考レベル」の2つで与えられている。なぜなら実際には電流密度を求めるのは容易ではないため、参考レベルをもうけ、曝露評価しやすいようになっている。また参考レベルを満たせば、おのずと基本制限も満たすようにガイドラインは設定されている。一例を挙げると、商用周波磁界（50/60Hz）に関する一般公衆の参考レベルは、50Hz で  $100\ \mu\text{T}$ （1,000mG）、60Hz で  $83.3\ \mu\text{T}$ （833mG）となっている。

表 4.4 ICNIRP ガイドライン (60Hz の場合)

対象	基本制限 (mA/m <sup>2</sup> )	参考レベル			
		電界強度 (kV/m)		磁束密度 (μ T)	
		60Hz	50Hz	60Hz	50Hz
職業者	10	8.33	10.0	417	500
一般公衆	2	4.17	5.0	83.3	100.0

(1 μ T=10mG)

#### 4.3 電磁界に関する基準

表 4.5 は各国の電磁界に関する規制値 (ガイドラインも含む) と制定年を示している。規制値は電界と磁界に対して公衆と職業人とでは別に定められている。各国が電界と磁界の両方に対して公衆と職業人の規制値を定めているわけではない。日本の場合、公衆の電界に対する規制はあるが、磁界に対しては公衆・職業人を問わず特に規制は定められていない。アメリカとオーストラリアは国と州がそれぞれ規制値を定めている。アメリカの場合は国としての規制は職業人に対して電界と磁界の両方に定められているが、公衆に対する規制は定められていない。7 州で国とは別に州独自に公衆に対してのみ規制やガイドラインを設けている。国は職業人、州は公衆に対する規制値を受け持ち、役割分担する形になっている。このうち 2 州は電界と磁界の両方に規制値を設けているが、5 州では電界にのみ規制値を設けている。規制値は州ごとに異なっている。オーストラリアは公衆と職業人の両方に対して電界と磁界の国としてガイドラインを決めている。2 州では公衆の電界に対してのみ別に規制値を定めている。

また欧州では、1999 年 7 月に EU 理事会によって電磁界に関する勧告がなされた。その勧告には、EU 加盟国に対して ICNIRP の曝露制限のガイドライン (1998) を採用することや、何らかの措置が必要な場合はリスクと利益の両面から考慮することなどが述べられている。

表 4.5 各国の電磁界に関する規制値

	電 界 [kV/m]				磁 界 [mT]			
	公 衆	職業者	区 分	制定年	公 衆	職業者	区 分	制定年
[国レベル]								
日 本	3	—	規 制	1976年	—	—	—	—
米 国	—	25	ガイドライン	1990年	—	1	ガイドライン	1991年
チェコスロバキア	1~15	15	規 制	1979年	—	—	—	—
ポーランド	1~10	15~20	規 制	1980年	—	—	—	—
ベルギー	5~10	—	規 制	—	—	—	—	—
英 国	12.3	12.3	ガイドライン	1989年	1.6	1.6	ガイドライン	1993年
旧 ソ 連	1~20	5~25	規 制	1984年	—	1.8~7.5	—	1985年
オーストラリア	5~10	10~30	ガイドライン	1989年	0.1~1	0.5~25	ガイドライン	1989年
ドイツ	5~10	—	規 制	1997年	0.1~0.2	—	規 制	1997年
[国際機関]								
・ WHO	1~10	—	—	1984年	0.5~5	—	—	1987年
・ ICNIRP ガイドライン (60Hz)	4.2	8.3	ガイドライン	1998年	0.0833	0.4167	ガイドライン	1998年
(50Hz)	5.0	10.0	ガイドライン	1998年	0.1	0.5	ガイドライン	1998年
[州レベル]								
●米 国								
フロリダ	2~10	—	規 制	1989年	0.015~ 0.025	—	規 制	1989年
ミネソタ	8	—	制限値	1976年	—	—	—	—
モンタナ	1~7	—	規 制	1984年	—	—	—	—
ニュージャージー	3	—	ガイドライン	1981年	—	—	—	—
ニューヨーク	1.6~ 11.8	—	制限値	1978年	0.02	—	制限値	1990年
オレゴン	9	—	規 制	1975年	—	—	—	—
ノースダコタ	9	—	—	—	—	—	—	—
●オーストラリア								
ニューサウスウェールズ	2	—	ガイドライン	1970年	—	—	—	—
ビクトリアル	2~10	—	ガイドライン	1970年	—	—	—	—

(1mT=10G=10,000mG)

注1) 規 制：法規に基づいた義務的な基準

ガイドライン：法的な拘束力を持たない自発的な基準・方針

制限値：送電線建設を許可する機関による規定

注2) ICNIRP ガイドラインは60Hzの値

## 第5章 電磁界環境

自然界の電磁界は、その強度は時代とともに変化してきたが、地球の誕生と同時に存在していたと考えられる。こうした静的な電磁界環境の中で生命が生まれ、進化し、人類が出現した。やがて、今から200年前のボルタによる電池の発明によって定常電流が得られるようになって、人工的な磁界が誘導されることになった。さらに、電気利用が飛躍的に普及した19世紀末に交流送電が開始され、新たに交流電磁界が我々のまわりに存在することになった。その後の消費電力の急増に加え、特に通信技術の発展に伴い、利用される周波数も広がってきた。

本章においては、主に身のまわりに存在する商用周波数の電磁界環境について紹介する。なお、記載したデータは、測定手法、発生源の種類・型・製造メーカー、利用条件等に依存しているので、典型例（代表値）と考えていただきたい。

### 5.1 自然界の電磁界

自然界に存在する電磁界の強度を表5.1にまとめた。このうち、電界は、主として数C（クーロン）から数10Cの「電荷」を持つ雷雲によって生ずるもので、地表面での電界強度は、最大30kV/mにも達することもある。

一方、地表面における磁界は、主として地磁気によるもので、日本では約50 $\mu$ T（50mG）である。また、電界・磁界とも、商用周波（50または60Hz）の成分は極めて小さい。

表5.1. 自然界に存在する電磁界

電界	静電界	80~30,000 V/m
	商用周波	$10^{-3} \sim 10^{-2}$ V/m
磁界	静磁界*1	$\sim 50 \mu\text{T}^{*2}$
	商用周波	$\sim 10^{-6} \mu\text{T}$

\*1 地磁気、\*2  $1 \mu\text{T} = 10\text{mG}$

心電図や脳波が測定されることからわかるように、我々の体内には固有の生

体電気があり、これらによる電磁界の存在も考えておく必要がある。

## 5.2 身のまわりの電界

我々が生活する範囲で最も高い電界が観測されるのは、高圧送電線の近傍であるが、それでも高々3kV/m（静電誘導によって人が関知できない程度）である。第1章で述べられた通り、実際の送電線近傍では、建物や樹木など周囲の物体によって遮られ著しく減少する。

また、既に前章までに説明されたように、1966年に最初に指摘された商用周波の電界が及ぼす人体への影響については、その後の調査や研究によって「影響は認められない」という結果となっている。我国においては、資源エネルギー庁が、「20kV/mまでの電界強度では人体に影響を及ぼすという証拠は得られなかった」という結果をまとめている。

これらのことから、電磁界の中で「電界」の影響についてはほぼ問題にならないと考えられるので、本章では以下、「磁界」環境に絞ることとする。

## 5.3 磁界の測定

磁界の大きさは、通常、静電遮蔽されたサーチコイルから成るプローブと電圧計を組み合わせ測定される。この方式では、図5.1に示したように、交流磁界中のコイルを貫く「磁束」によって誘導される「起電力」を測定し、この値から磁束密度を求めることができる。また、磁界は空間ベクトルであるので、3軸コイルが必要となる。

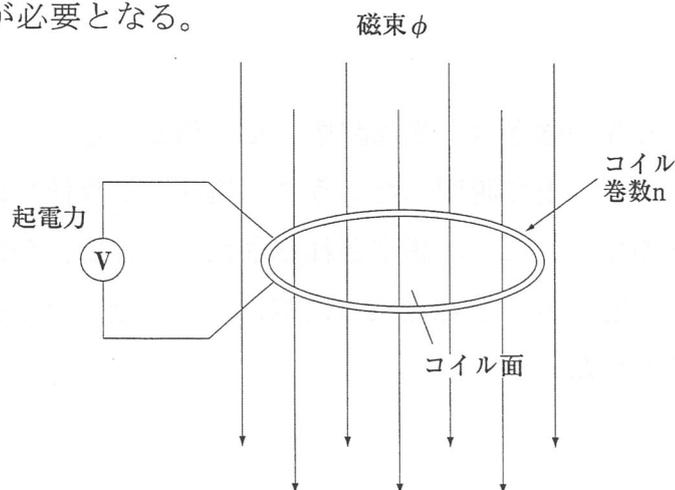


図 5.1. 磁界測定の方法

表 5.2 に国内で市販されている「磁界測定器」の内、IEEE 基準(1987)の校正方法で 5%以内であるもののサンプルを示す。

表 5.2. 磁界測定器の種類と性能

型式	プローブ部	測定範囲 [ $\mu$ T]	周波数 [Hz]
MFM-12A	1 軸空芯コイル	0.01~2,000	50~10,000
42A-1	1 軸空芯コイル	0.05~200	40~1,000
TMF-3P	3 軸空芯コイル	0.05~2,000	50/60

\*  $1 \mu$ T = 10mG

送配電線等から生じる磁界の大きさは、無限に長い線状電流、I [A] による磁界と考えることができるので、アンペアの法則から、r [m]離れた点の磁界の大きさB [ $\mu$ T] は、

$$B = 0.2 I / r$$

と計算することもできる。実際には、測定点周辺の状況等によって若干影響を受けることもあるが、ほぼ実測値と一致することが確かめられている。

#### 5.4 各種環境における磁界の強さ

低周波磁界の発生源を、電力設備、電気鉄道、家庭用電気製品、産業用機器に分類し、そのまわりの磁界の強さの一例を以下に示す。

##### (1) 電力設備

送配電線から生じる磁界の強さは、電線配置、電流値及び地上からの高さによって大きく異なる。一方、上で説明したように、実測と計算値はほぼ一致することがわかっているので、ここでは想定される最大の条件で、公衆の立ち入る地上（送配電線直下の地上1m）と住居内（電線に最も接近した位置）における計算値を表 5.3 にまとめた。

表 5.3. 送配電線による磁界の大きさの最大値 [ $\mu\text{T}$ ]

	地上 1 m	住居内
送電線	20	10
配電線	2	10

\*  $1\mu\text{T}=10\text{mG}$

しかしながら、こうした条件が起こる場所はまれで、発生頻度も極めて小さいと考えられるので、実際の送配電線近傍では、この表の値よりかなり小さくなっている。

## (2) 輸送機関

電気鉄道からの磁界は、架線と複数の搭載機器など発生源がいくつもあり、また、走行状態や時間により大きく変化する。極低周波における測定例は少なく、その一例を示すと、足下での最大値は、電車では約  $5\mu\text{T}$  (50mG)、新幹線では  $16\mu\text{T}$  (160mG)、飛行機で  $14\mu\text{T}$  (140mG) との報告がある。

## (3) 居住空間

一般の住居内にある家庭用電気機器から生じる磁界は、製品の種類によって変わるだけでなく、その使用方法や測定位置によっても異なる。また、発生源の形状や分布が複雑なため、前節で述べた簡易計算の適用は困難である。そこで、ここでは、代表的な機器を対象に測定したおおよその値を以下の表に示すことにする。なお、括弧内の数値は測定位置（距離：「直」は接触させた場合）を表している。

表 5.4. 家電製品近傍の磁束密度 [ $\mu\text{T}$ ]\*<sup>1</sup>

台 所	電子レンジ (950W)	33 (直), 0.9 (1m)
	冷蔵庫 (140W)	1.6 (直)
	トースター (1000W)	9.5 (直), 0.2 (50cm)
	電磁調理器 (1300W)	24 (直), 2.0 (10cm)
リ ビ ン グ	テレビ (110W)	2.4 (直)
	ファンヒーター (120W)	1.5 (直)
	蛍光灯 (70W)	2.5 (直), 0.2 (1m)
	電気カーペット (370W)	30 (直)
	電気こたつ (500W)	5.0 (直), 0.3 (20cm)
浴 室 他	洗濯機 (360W)	3.5 (直), 0.3 (1m)
	アイロン (600W)	2.8 (直)
	ヘアドライヤー (1000W)	39 (直), 2.8 (10cm)

(いずれも MFM-12A で測定)

\* 1  $1\mu\text{T}=10\text{mG}$

#### (4) 職場環境

産業用機器からの低周波磁界の測定結果報告例は極めて少ない。その中で、溶接機からは数  $100\mu\text{T}$  にも達する大きな磁界が発生することが知られている。

### 5.5 磁界環境と生活

#### (1) 磁界の強さの相対比較

本章で紹介した色々な機器のうち、代表的な発生源近傍の磁界の強さを、他の値と比べてみたのが図 5.2 である。なお、図中の矢印は、各々 WHO 環境保健基準と ICNIRP ガイドラインを示している。

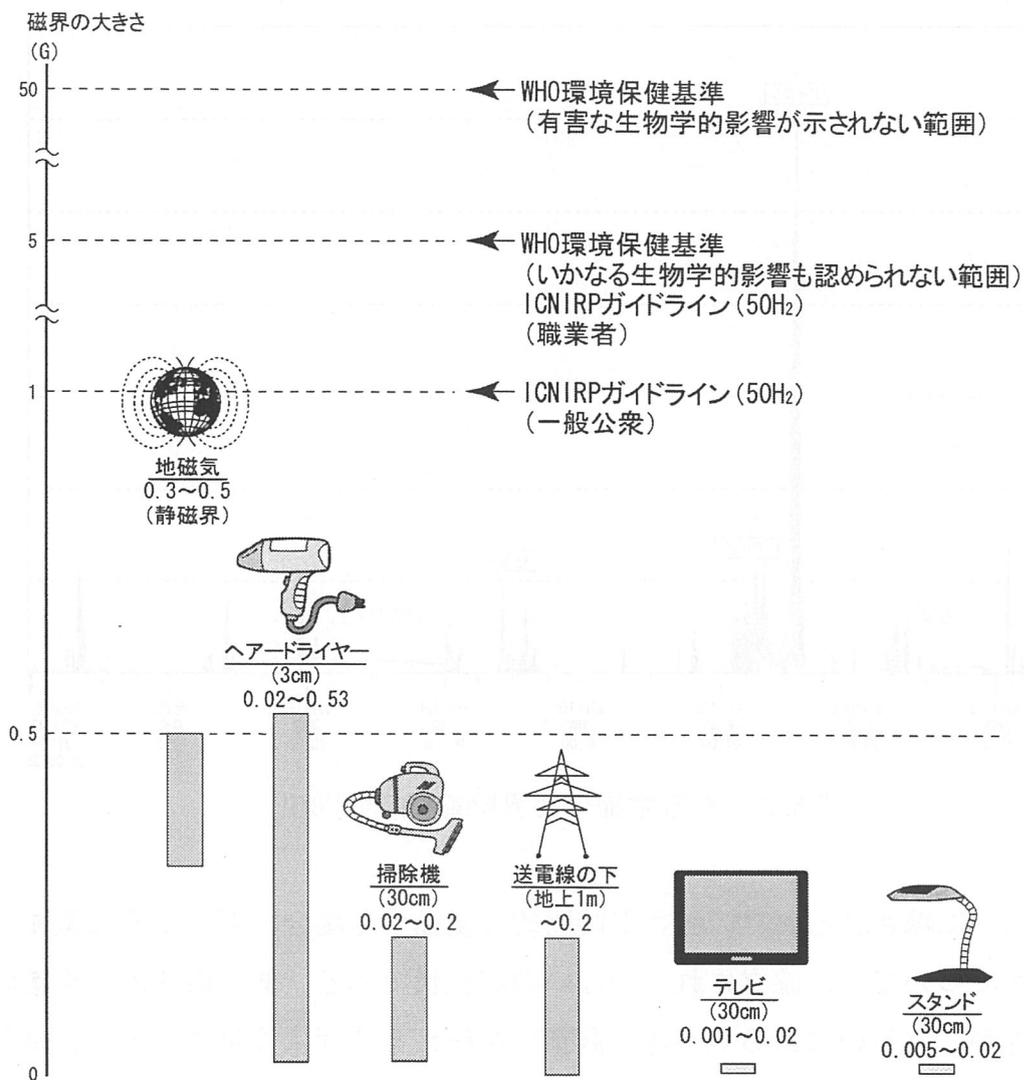


図 5.2. 種々の磁界発生源の強さの比較

## (2) 磁界曝露

これまで述べてきた磁界は発生源側から見た値であるが、実際に磁界に曝される人からみるとその値は異なる。例えば住宅から出勤し、ある時間OA機器を操作し、夕方帰宅するという生活パターンの場合、ヘアードライヤー、トースターなど家庭内の電気機器、通勤途中では架空電線や電車、オフィスではディスプレイやコピー機、帰宅後も電子レンジや炊飯器などの機器と、多くの発生源に接することになる。家庭内でも同様で、ある主婦の一日の曝露量の時間変化は図 5.3 のように変化する。このように、複数の発生源から限られた時間だけ磁界に曝されることになる。

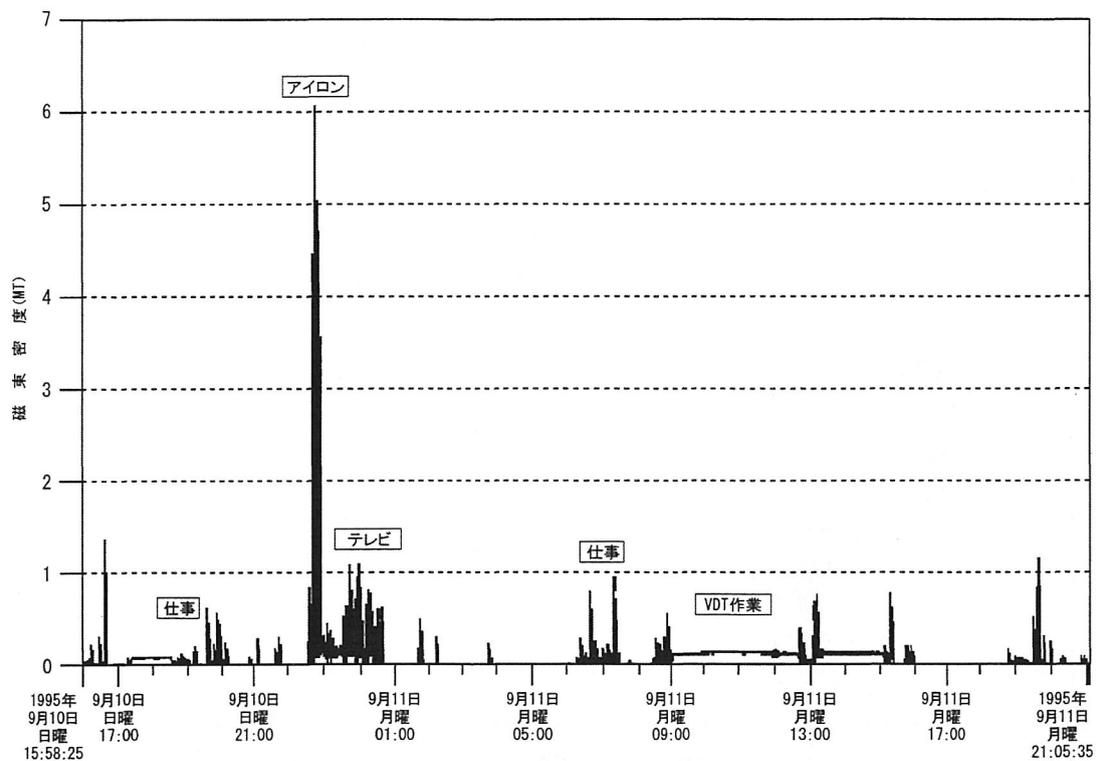


図 5.3. ある主婦の磁界曝露の時間変化

このように曝される磁界の強さが時間的に変動する場合、どのような量で表すべきかについては、確立されていないのが現状である。ある時間内の平均値とすべきか、あるいはあるレベル（閾値）を超える時間に注目すべきか、磁界の時間的な変化の割合や周波数が重要な要素となるのか、詳しい生物影響のメカニズムが解明されなければ結論は出ないと思われるが、しかしながら、これらの中で「時間平均値」は、まず第一候補と考えることができよう。

曝される人から見た平均曝露磁界の強さは、前節のデータから計算すると居住環境では最大でも約  $0.5 \mu\text{T}$  にしかない。

### (3) 電磁界は危険なのか？

本章では、我々の身のまわりにある電磁界発生源とそれらによる曝露量（平均磁界強さ）を紹介してきた。また、前章までに、生物影響に関する研究や疫学研究結果、これらに対する国際機関の見解、各国での基準やガイドラインが説明された。

これらを参考にすれば、「電磁界は本当に危険なのか？」という疑問に対する

答えを導くことが出来るのだろうか。

残念ながら、この疑問に対する絶対的な解答は存在しない。それは、2つの重要な判断——つまり、現在までに得られている科学的証拠をどのように判断するか、また、健康に対して悪影響を及ぼす多くの原因の中でこの電磁界によるリスクをどの程度重み付けるか——によって答えは変わってくるからであり、従って個人々々の感覚に依存している。

科学的証拠とは、現在までに報告された数多くの研究結果や調査結果のことである。既にこれまでの章で説明されたように、その中には、電磁界の人への影響を示唆するものや否定するものもある。国際機関や各国省庁の見解は、これら研究・調査の手法の妥当性やデータの信頼性などきめ細かく検討した結果であり、表現の違いこそあれ「現時点では、居住環境の電磁界が人の健康に及ぼす影響は認められない」というものである。なお、この見解中の「認められない」という語句は、科学的正確さを保つためには避けられない表現である。なぜなら科学では、どんなものでも「絶対安全である」とは証明できず、どのように試みても悪影響がないことを示すことしかできないからである。

もう一つの判断もまた困難な問題である。我々のまわりには、健康に悪影響を与える原因は数多く存在する。例えば、ガンの発生では、タバコ、アルコール、ウイルス、日光（紫外線）、放射線などが知られているが、これらより、普段摂取している食物（栄養）が割合として最も高いことはあまり意識されていない。その他、有害物質には、農薬、食品添加物、アスベスト、ダイオキシン、窒素化合物などの大気汚染物質など数えればきりが無い。

通常、身体への影響には、これ以上の量では起こらないというレベル（閾値）があると考えられており、これに安全係数を加味していわゆる規制値が決められている。しかし電磁界の場合、リスクが小さすぎるために、閾値が見つかっていない。

過大評価からくる無用な恐怖感は、逆にストレスなどの精神的な影響を与えることもあるので、本テキストのような情報源によって、できるだけ正確な知識を得ることが的確な判断には不可欠である。

<参考文献>

- 1) 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
- 2) (財) 日本環境協会：「電磁環境に関する調査研究」、平成 3 年
- 3) (財) 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
- 4) WHO, Environmental health criteria 35, Extremely low frequency fields, , World Health Organization, Geneva, 1984
- 5) WHO, Environmental health criteria 69: Magnetic fields, World Health Organization, Geneva, 1987
- 6) N. Wertheimer, E. Leeper. 1979. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *Am. J. Epidemiol.* 109:273-284
- 7) J. P. Fulton, S. Cobb, L. Preble, L. Leone, and E. Forman. 1980. Electrical wiring configurations and childhood leukemia in Rhode Island. *Am. J. Epidemiol.* 111:292-296
- 8) L. Tomenius. 1986. 50-Hz electromagnetic environment and the incidence of childhood tumors in Stockholm County. *Bioelectromagnetics* 7:191-207
- 9) D. A. Savitz, H. Wachtel, F. A. Barnes, F. A. John, E. M. Tvrdek, J. G. 1988. Case-control study of childhood cancer and exposure to 60-Hz magnetic fields. *Am. J. Epidemiol.* 128:21-38
- 10) M. Coleman, C. M. J. Bell, H. L. Taylor, and M. Primic-Zakelj. 1989. Leukemia and residence near electricity transmission equipment: A case-control study. *Br. J. Cancer* 60: 793-798
- 11) R. Lin, P. Lu. 1989. An epidemiologic study of childhood cancer in relation to residential exposure to electromagnetic fields. P. A-40 in Project Abstracts: The Annual Review of Research on Biological Effects of Electric and Magnetic Fields. DOE/EPRI Contractor's Review Meeting. Bioelectromagnetics Society, Frederick, Md.
- 12) A. Myers, A. D. Clayden, R. A. Cartwright, and S. C. Cartwright. 1990.

- Childhood cancer and overhead power lines: A case-control study. *Br. J. Cancer* 62:1008-1014
- 13) S. J. London, D. C. Thomas, J. D. Boorman, E. Sobel, T.-C. Cheng and J. M. Peters 1991. Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia. *Am. J. Epidemiol.* 134: 923-937
  - 14) R. Lowenthal, J. Panton, M. Baikie, and J. Lickiss. 1991. Exposure to high tension power lines and childhood leukemia: A pilot study [letter]. *Med. J. Aust.* 155:347
  - 15) M. Feychting, A. Ahlbom. 1993. Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish high-voltage power lines. *Am. J. Epidemiol.* 138: 467-481
  - 16) J.H. Olsen, A. Nielsen, and G. Schulgen. 1993. Residence near high-voltage facilities and the risk of cancer in children. *Br. Med. J.* 307: 891-895
  - 17) E. Petidou, D. Kassimos, M. Kalmanti, H. Kosmidis, S. Haidas, V. Flytzani, D. Tong, and D. Trichopoulos. 1993. Age of exposure to infections and risk of childhood leukemia. *Br. Med. J.* 307:774
  - 18) P.K. Verkasalo, E. Pukkala, M.Y. Hongisto, J.E. Valjus, P.J. Drvinen, K.V. Heikkil, and M. Koskenvuo. 1993. Risk of cancer in Finnish children living close to power lines. *Br. Med. J.* 307: 895-899
  - 19) A. Fajardo-Gutierrez, J. Garduno-Espinosa, L. Yamamoto-Kimura, D.M. Hernandez-Hernandes, A. Gomez-Delgado, M. Mrjia-Arangure, A. Cartagena-Sandoval, and M.C. Martinez-Garcia. 1993. Residence close to high-tension electric power lines and its association with leukemia in children (in Spanish). *Biol. Med. Hosp. Infant Mex.* 50: 32-38
  - 20) M. Linet, E.E. Hatch, R.A. Kleinerman, L.L. Robinson, W.T. Kaune, D.R. Friedman, R.K. Severson, C.M. Heines, C.T. Hartsock, S. Niwa, S. Wacholder and R.E. Tarone. 1997. Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic leukemia in children. *New Eng. J. Med* 337: 1-7

- 21) L.M. Green, A.B. Miller, P.J. Villeneuve, D.A. Agnew, M.L. Greenberg, J. Li, K.E. Donnelly. 1999. A case-control study of childhood leukemia in southern Ontario, Canada, and exposure to magnetic fields in residences. *Int. J. Cancer* 82: 161-170
- 22) L.M. Green, A.B. Miller, D.A. Agnew, M.L. Greenberg, J. Li, P.J. Villeneuve, and R. Tibshirani. 1999. Childhood leukemia and personal monitoring of residential exposures to electric and magnetic fields in Ontario, Canada. *Cancer Causes and Control* 10: 233-243
- 23) M.L. McBride, R.P. Gallagher, G. Theriault, B.G. Armstrong, S. Tamaro, J.J. Spinelli, J.E. Deadman, S. Fincham, D. Robson and W. Choi. 1999. Power-frequency electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia in Canada. *Am. J. Epidemiol.* 149: 831-842
- 24) UK Childhood Cancer Study Investigators. 1999. Exposure to power-frequency magnetic fields and the risk of childhood cancer. *Lancet* 354: 1925-1931
- 25) M.B. Bracken, K. Belanger, K. Hellenbrand, L. Dlogoza, T.R. Holford, J.E. McSharry, K. Addeso, and B. Leaderer. 1995. Exposure to electromagnetic fields during pregnancy with emphasis on electrically heated beds: Association with birth weight and intrauterine growth retardation. *Epidemiology* 6: 263-270
- 26) D.A. Savitz, D.P. Loomis. 1995. Magnetic fields exposure in relation to leukemia and brain cancer mortality among electric utility workers. *Am. J. Epidemiol.* 141: 123-134
- 27) T. Tynes, A. Anderson, F. Langmark. 1992. Incidence of cancer in Norwegian workers potentially exposed to electromagnetic fields. *Am. J. Epidemiol.* 136: 81-88
- 28) G. Theriault, M. Goldberg, A. B. Miller, B. Armsorong, P. Guenel, J. Deadman, E. Imbernon, T. To, A. Chevalier, D. Cyr and C. Wall. 1994. 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: 550-572
- 29) C. Johansen, J. Olsen. 1998. Risk of Cancer among Danish utility workers-A nationwide cohort study. Am. J. Epidemiol. 147: 548-555
  - 30) NRC National Research Council, Committee on the Possible Effect of Electromagnetic Fields on Biologic Systems. 1997. Possible Health Effects of Exposure to Residential Electric and Magnetic Fields. Washington:National Academy Press
  - 31) (社)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
  - 32) 関根泰次、(社)電気学会、電磁界生体影響問題調査特別委員会、第一回電磁界の生体影響に関するシンポジウム要旨集、平成9年7月11日
  - 33) 電波通信審議会、答申「電波利用における人体防護のあり方」、平成9年4月24日
  - 34) WHO, Health and safety guide No. 27, Magnetic fields, health and safety guide, World Health Organization, Geneva, 1989
  - 35) Non-ionizing radiation committee of the International radiation protection association, Interim guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields, Health Physics, 58,1(1990)
  - 36) The international non-ionizing radiation committee of the international radiation protection association, Protection of the patient undergoing a magnetic resonance examination, Health Physics, 61, 923-928(1991)
  - 37) International commission on non-ionizing radiation protection, Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields, Health Physics 66, 100-106(1994)
  - 38) 国際非電離放射線防護委員会、「時間変化する電界、磁界及び電磁界への曝露制限のためのガイドライン (300GHzまで)」、1998年4月
  - 39) The Council of the European Union. 1999. Council recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz)

電磁界(EMF)に関する調査研究委員会

- 委員長 山本幸佳 (大阪大学 ラジオアイソトープ総合センター 教授)  
内藤克彦 (名城大学 理工学部 電気電子工学科 教授)  
辻本 忠 (財団法人 若狭湾エネルギー研究センター主席客員研究員)  
樋脇 治 (広島市立大学 情報科学部 助教授)  
西澤邦秀 (名古屋大学 アイソトープ総合センター長 教授)  
西川雅弘 (大阪大学大学院 工学研究科 教授)  
小田啓二 (神戸商船大学 商船学部 助教授)

順不同

発行所 財団法人 大阪科学技術センター  
電磁界調査研究委員会

〒550-0004  
大阪市西区靱本町1丁目8番4号  
電話 06-6441-5323

本冊子の一部又は全部の無断転載を禁じます。