

超低周波電磁界の健康影響

—WHO環境保健クライテリアの意味するもの—



2009年1月

財団法人 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



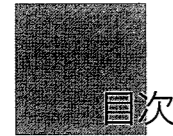
はじめに

世界保健機関(World Health Organization,以下WHOと略記)は、2007年6月に周波数100キロヘルツ(kHz)までの電界および磁界の健康影響についての評価報告書(環境保健クライテリア(Environmental Health Criteria,以下EHCと略記)238)を発表した。この報告書はWHO内に設置された国際電磁界プロジェクト委員会が、超低周波電磁界の健康影響について、これまでに報告された約2000編の学術論文や報告書などを検討、評価して、最新の知見をまとめ、各国の政府、関係機関に提言したものである。

超低周波電界および磁界は、電気が利用されている現代社会では広く存在するが、その発生や空間伝達のしくみ、計測の方法、生体との相互作用とその結果として起こる生体反応などを理解するためには、関連するさまざまな分野の知識の融合が必要である。環境保健クライテリアの内容は、電界および磁界の発生源の特徴やばく露評価の方法から、体内での電界および磁界の伝達とそれによって生物学的な作用が生じるとした場合に起こり得るメカニズム、およびその結果生じるかもしれない疾患を含む人体影響の可能性まで多岐にわたっている。その記述はかなり高度に専門的であるが、本要約版ではできるだけ平易な表現でその内容を的確に記述するようにつとめた。またWHOがこの報告書を作成することになった背景について国際委員会の委員であった大久保千代次氏に解説いただくとともに、日本の現状との関連性についても配慮を加えた。

財団法人大阪科学技術センターでは1997年に「電磁界(EMF)に関する調査研究委員会」を設置して以来、関連する問題の検討を続け、調査報告書や一般市民向けのパンフレットなどを作成し、電磁界に関する正確な知識の普及に努めてきた。委員会では今回のWHOの報告書は国際的にきわめて重要、かつ時宜を得た発表であると判断し、報告書の各章ごとの要約を専門研究者が分担するとともに、分担者の合議で検討して、この要約版を作成した。WHO報告書は英文446ページにフランス語とロシア語の要約が添付されている膨大かつ詳細な出版物であるが、この要約版は非専門家の方々にも十分理解できるように配慮してまとめるとともに、日本の現状に関連した豊富なデータを加えてあるため、専門研究者にとっても簡便で有益な資料集となるであろう。電磁界の人体影響に関する研究は、疫学および実験研究による解明が進み、本報告書はその集大成の決定版とも言える内容であるため、幅広い層の方々を読んで頂き、電磁界についての正しい理解が一層進むことを期待したい。

財団法人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
委員長 山本 幸佳



はじめに 1
 目次 4
 この冊子の見方・読み方 4
 電磁界とは 6

1 世界保健機関による電磁界の健康影響評価活動 7

1-1 国際電磁界プロジェクト 8
 1-2 IARCによる超低周波電磁界の発がん性評価 9
 1-3 WHOによる超低周波電磁界の健康影響評価作業 10
 1-3-1 タスク会議
 1-3-2 環境保健クライテリア(EHC)とメッセージ(Fact Sheet)
 1-3-3 超低周波電磁界の小児白血病への寄与リスクの見積もり
 1-3-4 リスク・コミュニケーションの必要性
 1-3-5 今後の研究課題 (中間周波数)

2 要約と将来の研究への提言 14

<WHO第1章>
 2-1 要約 15
 2-1-1 電磁界の源、測定とばく露
 2-1-2 人体内の電界と磁界
 2-1-3 生物物理学的なメカニズム
 2-1-4 神経行動学的作用
 2-1-5 神経内分泌系
 2-1-6 神経変性の疾患
 2-1-7 循環器系の疾患との関連性
 2-1-8 免疫学と血液学
 2-1-9 生殖と発生
 2-1-10 がん
 2-1-11 健康影響への評価 (予測)
 2-1-12 防護的な対策
 2-2 研究への提言 18
 2-2-1 発生源、測定およびばく露
 2-2-2 測定
 2-2-3 生物物理学的なメカニズム
 2-2-4 神経行動学的作用
 2-2-5 神経内分泌系
 2-2-6 神経変性の疾患
 2-2-7 循環器系
 2-2-8 免疫学と血液学
 2-2-9 生殖と発生
 2-2-10 がん
 2-2-11 防護的な対策

3 発生源、測定、ばく露、体内誘導電界と磁界 21

<WHO第2章・第3章>
 3-1 電界と磁界 22
 3-2 交流電磁界の発生源 22
 3-2-1 居住環境における電界
 3-2-2 職業環境における電界
 3-2-3 居住環境における磁界
 3-2-4 職業環境における磁界
 3-3 ばく露評価 27
 3-4 体内誘導電磁界 28
 3-4-1 電界のドシメトリー
 3-4-2 磁界のドシメトリー
 3-4-3 接触電流

4 生物物理学的メカニズム 30

<WHO第4章>
 4-1 直接的メカニズムについての考察 31
 4-1-1 誘導電流
 4-1-2 その他の直接効果
 4-2 間接的メカニズムについての考察 32

5 超低周波電磁界とさまざまな疾患 35

<WHO第5章～第10章>
 5-1 ヒトへの急性ばく露の影響 36
 5-2 いわゆる「電磁過敏症」 37
 5-3 がん以外の慢性的な影響 37
 5-3-1 神経内分泌系
 5-3-2 神経変性疾患
 5-3-3 心臓血管系疾患
 5-3-4 血液系や免疫系
 5-3-5 生殖と発育

6 超低周波電磁界とがん 39

<WHO第11章>
 6-1 白血病とは 40
 6-1-1 小児白血病の発生頻度
 6-1-2 小児白血病の病因
 6-2 超低周波電磁界ばく露と小児白血病に関する疫学研究 42
 6-2-1 IARC報告書(2002)までの知見の評価の要約
 6-2-2 IARC(2002)以後の疫学研究
 6-2-3 疫学研究結果の解釈において考慮すべき事項
 6-3 超低周波電磁界ばく露と成人のがんに関する疫学研究 44
 6-3-1 超低周波電磁界ばく露と乳がん
 6-3-2 超低周波電磁界ばく露と白血病、脳腫瘍、およびその他のがん
 6-4 超低周波電磁界ばく露とがんリスクに関する疫学的知見のまとめ 45

7 健康リスク評価と防護方策 47

<WHO第12章・第13章>
 7-1 健康リスクの評価 48
 7-1-1 有害性の確認
 7-1-2 ばく露量の測定
 7-1-3 ばく露量と有害程度の関係
 7-1-4 科学的に確実なリスク認定
 7-1-5 結論
 7-2 防護方策 50
 7-2-1 公衆衛生政策
 7-2-2 科学的知見
 7-2-3 「念のためという考え」に基づく政策立案
 7-2-4 超低周波電磁界への「念のための方策」についての勧告
 7-2-5 わが国における超低周波電磁界管理政策

8 参考資料 (物理的な補足解説) 60

おわりに 69
 電磁界(EMF)に関する調査研究委員会委員 70

この冊子の見方・読み方

各章の扉ページ
章の始まりを示すととも
章の要約を記載する

■ 1 ■ 世界保健機関による電磁界の健康影響評価活動

各章を表示するショルダー

1

世界保健機関による 電磁界の健康影響評価活動

世界保健機関 (World Health Organization 以下WHOと略記) 内の国際電磁界プロジェクト事務局に赴任し、環境保健クライテリア (Environmental Health Criteria 以下EHCと略記) 238「超低周波電磁界」の編纂作業に直接関わった大久保千代次氏に、WHOの取り組みをまとめていただいた。

その内容は、(1) WHOの国際電磁界プロジェクトの歩みおよびWHO傘下のIARCの「超低周波電磁界とがん」についての見解、(2) WHOそのものと国際電磁界プロジェクトとの関係、および(3) WHOとリスク管理 などである。

もともとWHOのEHC238は国際的な専門家たちの見解をまとめたものであって、WHO自体および関係する国際機関の決定事項や政策提言を各国に対して行うものではない、と巻頭に明記してある。「超低周波電磁界」に関してこうした基本方針は変わっていない。

¹ 国際がん研究機関 (International Agency for Research on Cancer)

要約
各章の内容を解りやすく
簡潔に述べる

脚注
各章の最初に登場する略語
の正式名を記載する

(見本ページのため、実際のページ内容とは異なります。)

■ 3 ■ 発生源、測定、ばく露、体内誘導電界と磁界

3-4-2 磁界のドシメトリー

磁界については、組織の透磁率が空気と同じであるため、組織内の磁界は外部磁界と同じである。ヒトおよび動物の身体は磁界を大きく乱すことはない。磁界の主な相互作用は、電界のファラデー誘導であり、導電組織の電流密度と関連している。(詳細は巻末の解説を参照)

均一な超低周波電界のヒトへのばく露に対するドシメトリーの主な特徴は次の通りである。

- 誘導電界および電流は、身体に対する外部磁界の方向に依存する。
- 体の内部の誘導電界は全体として、外部磁界が身体正面から背面に向かう場合に最大となる。
- 脳、脳髄液、血液、心臓、膀胱、眼球、および腎臓は、外部磁界が側面から側面へ向かう場合に最大となる。
- 磁界の向きが身体の垂直軸に沿う場合には誘導電界は最小となる。
- 身体が大ききほど誘導電界も大きくなる。
- 誘導電界の分布は、器管および組織の導電率に影響される。しかしその影響は強くない。

不均一で比較的大きい磁界 (たとえば空間的な勾配がある磁界) へのばく露は、職業上のばく露がほとんどである。これらのばく露は複雑な状況で発生しており、EHC238には高圧送電線の作業員に関する2つの分析について紹介されている。

3-4-3 接触電流

接触電流は、外部の電界または磁界が誘導する電界と同等以上の電界を組織に発生させる。電位の異なる導電面に触れ、身体に流れる電流経路が成立したときに接触電流は発生する。一般的に電流の経路は手から手または足である。接触電流の発生源は、電化製品のシャーシや、送電線下に駐車した自動車など、電界内に位置する導電性の大きな物体も接触電流の発生源となる。

解説3-7 日本における接触電流の機会

接触電流は、「非常に小さな感電」といえるかもしれない。日本の家庭では低圧配電系統 (100V) の接地と機器躯体の接地とが独立していることや、中性線の接地方式が海外と異なるため、常時接地電流が流れない、あるいは流れてもきわめて小さいことから、常時機器躯体や水道水栓と近くの人体との間に電位差が生じることはほとんどない。したがって、家庭内機器や水道管に起因する接触電流が流れることもほとんどない。

WHO記載の文章

WHO記載の文章に対する解説

用語解説・参考文献
各章毎に参考文献と
用語解説を記載し、
内容確認の利便性を図ります。

用語解説

| | | |
|-----|--|--|
| 5-1 | 二重マスキング法 (double blind test) | 被験者に発症のばく露負荷を与え、験者がその影響を認識するとき、被験者も験者もともに現在の負荷を知らされていない。こうすることによって被験者および験者の心理的効果を無く意味がある。なお、電磁界ばく露装置の製作にあたって、送電時に被験者に感じられる騒音、振動、熱などが発生しないようにする必要がある。 |
| 5-2 | 筋萎縮性側索硬化症 (amyotrophic lateral sclerosis, ALS) | 運動神経細胞の変性を起こす原因不明の慢性疾患の1つで、多くは中年以降に筋力低下、筋萎縮などが進行する。遺伝性の病型もある。有病率は10万人あたり5人程度である。 |

参考文献

- 3-1. The WHO International EMF Project. <http://www.who.int/neh-emf/en/>(URL) [accessed August 2, 2005]
- 3-2. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Biological effects of static and ELF electric and magnetic fields. ICNIRP, Munich, Germany. ISBN 3-9804789-03-0, 1997
- 3-3. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Exposure to static and low frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences(0-100 kHz), ICNIRP, Munich, Germany. ISBN 3-934994-03-2, 2003

(見本ページのため、実際のページ内容とは異なります。)

参考資料
より専門的な内容を8章に解説しています。

電磁界とは

電磁界とは、電界と磁界が合わさったものです。

強さの変わらない電界(静電界)と磁界(静磁界)の組み合わせからは特別な現象は生まれてこないのですが、電流の方向や強さが変化する(交流)と電界と磁界が互いに影響し合うようになり、電界があると磁界が生じ、磁界があると電界が生じる、というように次々と波のように遠くに伝わる現象が生まれます。この波を「電磁波」といいます。

一般に「電磁波」と呼ばれているものには、周波数が高いものから低いものまでさまざまなものがあり、周波数が高いものほど電磁波の持つエネルギーは高くなります。最も周波数の低い領域(300ヘルツ(Hz)以下)に分類される波は、電磁波としての性質が無視できるため、「超低周波電磁界(または単に電磁界)」と呼ばれます。

電磁界は、日常生活で電気を利用すればかならず発生します。

| 分類 | 名称 | 周波数f(Hz) | 波長λ(m) | 主な用途(例) |
|-----------|-----------|----------------------------|-----------------|--------------------|
| 電離放射線 | ガンマ(γ)線 | 3×10^{18} | ~10pm | ガンマ線(放射線)治療 |
| | X線 | $3 \times 10^{16 \sim 18}$ | 1pm~10nm | レントゲン検査、非破壊検査 |
| 非電離放射線 | 紫外線 | $3 \times 10^{15 \sim 16}$ | 1~400nm | 殺菌灯、日焼けサロン |
| | 可視光線 | $3 \times 10^{13 \sim 15}$ | 380~810nm | 光学機器 |
| | 赤外線 | $3 \times 10^{12 \sim 13}$ | 1~10μm | 赤外線リモコン、赤外線ヒーター |
| | サブミリ波 | $3 \times 10^{11 \sim 12}$ | 0.1~1mm | |
| | ミリ波(EHF) | $3 \times 10^{10 \sim 11}$ | 1~10mm | レーダー |
| | センチ波(SHF) | $3 \times 10^{9 \sim 10}$ | 10~100mm | 衛星放送(BS)、衛星通信(CS) |
| | 極超短波(UHF) | $3 \times 10^{8 \sim 9}$ | 0.1~1m | テレビ放送、電子レンジ、携帯電話 |
| | 超短波(VHF) | $3 \times 10^{7 \sim 8}$ | 1~10m | テレビ放送、FMラジオ放送、航空管制 |
| | 短波(HF) | $3 \times 10^{6 \sim 7}$ | 10~100m | ICカード、国際放送、ラジオ |
| | 中波(MF) | $3 \times 10^{5 \sim 6}$ | 0.1~1km | AMラジオ放送、船舶・航空機ビーコン |
| | 長波(LF) | $3 \times 10^{4 \sim 5}$ | 1~10km | IH調理器、船舶・航空機ビーコン |
| | 超長波(VLF) | $3 \times 10^{3 \sim 4}$ | 10~100km | IH調理器、無線航行 |
| | 極超長波(ULF) | $3 \times 10^{2 \sim 3}$ | 100~1000km | |
| 超低周波(ELF) | 300以下 | 1000km以上 | 家電製品、送電線などの電力施設 | |

注：周波数「ヘルツ(Hz)」は1秒間に振動する数で、電磁波の伝わる速さ「30万キロメートル/秒」を波長で割った数です。<周波数f(Hz) = 3×10^8 (m/s)/波長λ(m)>

環境保健クライテリア(EHC)238のタイトルは「超低周波(Extremely Low Frequency, ELF)」としていますが、評価する対象は100kHzまでの周波数を含んでいます。

1

世界保健機関による 電磁界の健康影響評価活動

世界保健機関(World Health Organization以下WHOと略記)内の国際電磁界プロジェクト事務局に赴任し、環境保健クライテリア(Environmental Health Criteria以下EHCと略記)238「超低周波電磁界」の編纂作業に直接携わった大久保千代次氏に、WHOの取り組みをまとめていただいた。

その内容は、(1)WHOの国際電磁界プロジェクトの歩みおよびWHO傘下のIARCの「超低周波電磁界とがん」についての見解、(2)WHOそのものと国際電磁界プロジェクトとの関係、および(3)WHOとリスク管理、などである。

もともとWHOのEHC238は国際的な専門家たちの見解をまとめたものであって、WHO自体および関係する国際機関の決定事項や政策提言を各国に対して行うものではない、と巻頭に明記してある。「超低周波電磁界」についてもこうした基本方針は変わっていない。

1-1 国際電磁界プロジェクト

1996年WHOは国際電磁界プロジェクトを発足させ、今年で満14年となる。リスク評価の対象とする電磁界は、商用周波を含む超低周波(ELF、>0-300Hz)電磁界(EMF)のみならず、静(定常、直流:0Hz)電磁界、中間周波(IF; >300 Hz-10M Hz)および無線周波(RF; >10M Hz-300 G Hz)電磁界と、広範囲に及んでいる。^{参考文献1-1}

国際電磁界プロジェクトの組織は、各国政府代表、共同研究センターおよび国際機関からなる国際諮問委員会(International Advisory Committee; IAC)により運営され、その事務局をジュネーブのWHO本部に置いている。

現在の事務局責任者はファン・デベンター博士(Dr.Emile van Deventer)で、その他非常勤のセコンドとしてイギリス健康保護局のサウンダース博士(Dr.Rick Saunders)とオランダ厚生省のファン・ロンジェン博士(Dr.Eric van Rongen)が必要に応じて参加している。私(大久保)は2005年4月から2年間同事務局に勤務した。

国際電磁界プロジェクトの詳細な情報は、そのホームページhttp://www.who.int/peh-emf/en/から得られる。超低周波電磁界の健康影響については、WHOと国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)の共催で1997年にボロニア(イタリア)で開催された国際セミナーの報告書が同委員会から刊行された^{参考文献1-2}。その後同委員会は2003年に静電磁界と超低周波電磁界(この場合対象とする周波数は300ヘルツ(Hz)以下ではなく中間周波数の一部を含む100キロヘルツ(kHz)以下である)の生物学的影響と健康影響をレビューしたモノグラフを発表した^{参考文献1-3}。このモノグラフがこの度の超低周波電磁界の健康リスク評価を行うのに貴重な資料となった。

共同研究センター

| 略称 | 名称(日本語表記) | | 名称(英語表記) |
|---------------------|-------------|---------|--|
| HPA-RPD (旧称NRPB) | 健康保護局放射線防護部 | イギリス | Health Protection Agency-Radiation Protection Division (旧称National Radiological Protection Board) |
| BfS | 放射線防護局 | ドイツ | Federal Office for Radiation Protection |
| NIOSH | 産業衛生研究所 | アメリカ | The National Institute for Occupational Safety and Health |
| | 空軍電波研究所 | アメリカ | Air Force Research Laboratory |
| | カロリンスカ研究所 | スウェーデン | Karolinska Institutete |
| ARPANSA | 放射線防護・核安全庁 | オーストラリア | Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency |
| | オタワ大学 | カナダ | Ottawa University |
| NIES | 国立環境研究所 | 日本 | National Institute for Environmental Studies |

国際機関

| 略称 | 名称(日本語表記) | 名称(英語表記) |
|--------|---------------|---|
| ICNIRP | 国際非電離放射線防護委員会 | International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection |
| IARC | 国際がん研究機関 | International Agency for Research on Cancer |
| UNEP | 国際環境計画 | United Nations Environmental Programme |
| ILO | 国際労働機関 | International Labour Organization |
| ITU | 国際通信連合 | International Telecommunication Union |
| EC | 欧州委員会 | European Commission |
| IEC | 国際電気標準会議 | International Electrotechnical Commission |
| NATO | 北大西洋条約機構 | North Atlantic Treaty Organization |
| IEEE | 電気電子学会 | The Institute of Electrical and Electronics Engineers |

1999年、電磁界の発がんリスク評価に関する臨時国際諮問委員会(IAC)が開催された。その会議では国際がん研究機関(IARC)が発がん性の評価を、WHOが発がん以外の健康影響を総合的に評価し最終的にEHCの刊行をめざすことが提案されて承認された。

1-2 IARCによる超低周波電磁界の発がん性評価

IARCは1969年に発足、当初は化学物質の発がん性評価を行っていたが、その後はたばこ煙などの混合物や、放射線などのばく露環境、さまざまな労働環境についても評価対象とした。

IARCはWHOの下部組織であるが、2008年までに935種に及び化学物質、混合物あるいはばく露環境の発がん性評価を統一した基準で進めており、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。IARC方式は、ある作用因子のヒトに対する発がん性の評価という立場から疫学研究結果(証拠)を重視している。基本的には疫学的証拠に基づいて評価が行われ、これらの証拠は「十分」、「限定されている」、「不十分」、および「なし」に分類される。また動物研究における証拠は「十分」、「十分とは言えない」、「限られている」、「不十分」、および「なし」に分類される。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安全側に立ったプロセスであるため、IARCによる評価は発がん性の可能性を肯定する結果になる確率が高い。この方法では、「動物における発がん性はない」という評価が認められるのはグループ4のみで、その場合でもヒトにおける発がん性の証拠が不十分であったことが示せなければならない。IARCの判定基準は敢えて単純化しており、これまでの科学的な証拠(発がん性)の確かさのみから判断が求められ、定性的評価を行う。発がん性の強さやそのメカニズム、社会的影響は判定基準の範疇外である。さらには、その判定に伴う規制や立法といった作業は各国の行政府や国際機関に委ねている。

2008年までに、935種の発がん性評価がIARCによって実施されている。評価結果は、グループ「1」、「2A」、「2B」、「3」、および「4」の5段階に分類されている。グループ「1」(発がん性がある)が105件、グループ「2A」(恐らく発がん性がある:probably)が66件、グループ「2B」(発がん性があるかもしれない:possibly)が248件、グループ「3」(発がん性について分類できない)が515件、グループ「4」(おそらく発がん性を示さない)が1件である。2001年6月に静的電磁界および超低周波電磁界に対する発がん性評価を実施し、超低周波電界に発がん性があるかもしれない(2B)という結論を出した。静電界、静電磁界、超低周波電界はいずれもグループ「3」と評価された。この結果は、1998年の米国電磁界ラピッド計画¹のNIEHS²作業部会報告書と類似しているが^{参考文献1-4}、1998年以降に蓄積された研究結果を踏まえて評価していることと、WHOの正式機関が評価したことが重要である。その詳細は2002年にIARCのモノグラフ第80巻として刊行された^{参考文献1-5}。

| 分類及び分類基準 | | 既存分類結果例 |
|--------------------------|--|--|
| グループ1: 発がん性がある | ヒトへの発がん性を示す十分な証拠がある場合 | カドミウム、ダイオキシン、たばこ(能動、受動)、エックス線など |
| グループ2A: おそらく発がん性がある | ヒトへの発がん性を示す証拠は限定的であるが、動物実験での発がん性に対して十分な証拠がある場合 | PCB、ホルムアルデヒド、ディーゼルエンジン排ガス、紫外線など |
| グループ2B: 発がん性があるかもしれない | ヒトへの発がん性を示す証拠が限定的であり、動物実験での発がん性に対して十分な証拠がない場合 | クロロホルム、鉛、コーヒー、ガソリン、漬物、ガソリンエンジン排ガス、超低周波電界など |
| グループ3: 発がん性を分類できない | ヒトへの発がん性を示す証拠が不十分であり、動物実験での発がん性に対して十分な証拠がない場合 | カフェイン、原油、水銀、お茶、静電界、静電磁界、超低周波電界など |
| グループ4: おそらく発がん性はない | ヒトへの発がん性がないことを示唆する証拠がある | カプロラクタム(ナイロンの原料) |

¹ 米国電磁界ラピッド計画(Research and Public Information Dissemination Program, EMF)

² 国立環境衛生科学研究所(The National Institute of Environmental Health Sciences, NIEHS)

1-3 WHOによる超低周波電磁界の健康影響評価作業

1-3-1 タスク会議

WHOでは2002年11月から種々の作業部会を組織し、作業部会は先に述べたICNIRPの2003年のモノグラフ³を参考に、超低周波電磁界に関するEHCのたたき台を作成した。2005年の初夏にWHOは、超低周波電磁界に関するEHC作成のためのタスク会議メンバーを決定し、タスク会議メンバーとIACメンバーにEHCのたたき台を配布した。そして7月末まで各メンバーからたたき台へのコメントを集めて、当時の国際電磁界プロジェクトの責任者レパチヨリ博士(Dr. Michael H. Repacholi)を中心に、事務局のファン・デベンター博士(Dr. van Deventer)、ファン・ロンゲン博士(Dr. van Rongen)、サウンダース博士(Dr. Saunders)、および私がコメントへの対応を行い、9月にはタスク会議メンバーにEHCの原案を配布した。タスク会議21名のメンバーは、専門性、性別、地域のバランスを考慮して事務局が推挙した。その中には宮越順二氏(弘前大学)や故兎眞徳氏(国立環境研究所)が含まれていた。また、6人のオブザーバーには、日本の近本一彦氏が含まれていた。タスク会議メンバーは、当人のみならず、その家族も事業者との利害関係が無いことが求められ、WHOへの宣誓書の提出が求められた。タスク会議メンバーを推挙するのは事務局であるが、承認するのは、われわれが所属するクラスターの長(WHOの副事務局長に相当)が行う。リスク評価会議(タスク会議)の席上、WHO事務局は発言権を持たない。更にはタスク会議で一旦承認された文章を、事務局はもちろん、クラスター長を含むWHO上層部も手直しする権利を持たない。事務局は引用文献のチェックといった文章の科学的な編集作業に携わるのみである。EHC作成に至る作業の詳細については、EHC238の序文を参照されたい^{参考文献1-6}。

2005年10月にWHOのジュネーブ本部で、リスク評価を目的とするタスク会議が開催された。タスク会議議長は、NIEHSのポーター博士(Dr. Christopher Portier)である。2007年6月18日、WHOは第12回IAC開催に合わせてEHC238を発刊した^{参考文献1-6}。

その全文はhttp://www.who.int/peh-emf/publications/elf_ehc/en/index.htmlからダウンロードできる。また環境省がその全文を日本語に訳している http://www.env.go.jp/chemi/electric/material/ehc238_j/index.html。さらにWHOは、超低周波EHC発刊日にWHOの公式見解としてメッセージ(Fact Sheet)No.322を発表した^{参考文献1-7}。日本語訳はhttp://www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs322_ELF_fields_jp_final.pdfから入手できる。

1-3-2 環境保健クライテリア(EHC)とメッセージ(Fact Sheet)

同じ日に、WHOが2つの文書を発表した経緯は以下のとおりである。EHCには各国への勧告文書が含まれている。WHOは、EHC238の勧告内容に対しては少し違和感を感じていた。実はEHCの内容を決定するのは、タスク会議メンバーであり、WHO事務局員ではないことは既に述べた。専門家で構成されるタスク会議の結論や各国への勧告に対して、異論がある場合も過去にはあった。もともとすべてのEHCには冒頭「この報告書はタスク会議を構成する専門家の見解をまとめたもので国際労働機関(ILO)、WHOなどの決定や方針を必ずしも代表する必要はない。」との「断り書き」が明記されている。そこで、WHOはプレスオフィスからその公式見解をメッセージ(Fact Sheet) No.322としてEHC238と同時に発表したのである。

WHOはEHC238に記載されている文章を並べ替えて、WHOのメッセージ(Fact Sheet)として編集している。EHCを作成するにあたってタスク会議メンバーは、会議の席上自分が指摘した点が訂正されているか目配りするが、文章全体の構成に十分に配慮できない場合があると思われた。会議日程上、時間的制約もある。そこでWHOは勧告文書を交通整理した、とも言える。以下に、WHOのメッセージ(Fact Sheet) No.322の要点を示す。

- 2002年にIARCが超低周波電磁界を「ヒトに対して発がん性があるかもしれない」と分類したが、これを追認する。しかし、全体として、小児白血病に関連する証拠は因果関係と見なせるほど強いものではない。

- 仮に因果関係があるとしてその寄与リスクを試算すると、小児白血病発症数の0.2~4.95%に相当する。仮に超低周波電磁界が実際に小児白血病のリスクを高めるとしても、公衆衛生上の影響は限定的である。
- 小児白血病以外の健康影響は、小児白血病に関する証拠よりもさらに弱い
- WHOからのガイダンスとして、政策決定者は、労働者及び一般人をこれらの影響から防護するために規定された国際的なばく露ガイドラインを採用すべきである。長期的影響に関しては、超低周波電磁界へのばく露と小児白血病との関連についての証拠が弱いことから、ばく露低減によって小児白血病の発症が減少するかどうか不明である。以上のことから、

1. 政府及び産業界は、超低周波電磁界ばく露の健康影響に関する科学的証拠の不確かさをさらに低減するため、研究プログラムを推進すべきである。
2. 加盟各国には、すべての利害関係者との効果的で開かれたコミュニケーション・プログラムを構築すること。
3. 新たな設備を建設する、または新たな装置(電気製品を含む)を設計する際には、ばく露低減のための低費用の方法を探索しても良い。ただし、恣意的に低いばく露制限の採用に基づく政策は是認されない。

これまで、WHOは科学的に不確実性を持つ電磁界へのprecautionary(以下、「念のための」と訳す。)なリスク管理手法としての公衆衛生政策の枠組み("Framework guiding Public Health Policy")の各国政府への提示を試みていた。しかし、タスク会議が開催された2005年10月の後、正確には2006年の年末にWHOの上層部がこの枠組みの提示を拒否した。その結果、2005年10月に作成されたEHCの各国政府への勧告には念のための(Precautionary)という文言が多く使用されているが、2007年6月に出されたFact Sheetには念のための(Precautionary)という文字は使用されていない。「念のための」リスク管理政策にはさまざまな選択肢があり、何もしないことから、電磁界を発生する技術や設備の使用を禁止することまで幅広い。磁界低減方策、研究推進、リスク・コミュニケーションの実施も含まれている。換言すれば、Fact SheetはEHCをもとにこれをWHOがどのように解釈するかをまとめた文書で、「念のための」対策として磁界低減に対する考え方以外はその見解が変わるものではない。確かにEHCと比べ、WHOは長期にわたる商用周波数磁界低減への「念のための」対策の採用については消極的である。WHOは確かな健康影響への公衆衛生政策を提言する立場にあるので、上記枠組み提言を中止したと言える。その結果、メッセージ(Fact Sheet)では磁界を低減することが健康リスクを低減するかどうか不明なので、磁界低減対策は「しても良い」といった表現にする一方、「念のための」対策オプションとしての研究やリスクコミュニケーションの促進は推奨している。

1-3-3 超低周波電磁界の小児白血病への寄与リスクの見積もり

リスク管理では、ハザード(障害性)の同定、ばく露量と反応関係、およびばく露量の評価が不可欠である。たとえば商用周波数磁界の短期的なばく露のハザードは誘導電流による神経系への影響(刺激作用)であり、多くの研究をもとに確立された影響と言える。刺激作用を誘発する閾値から、人体と磁界との物理的結合を考慮してその閾値に対応する外部磁界強度(磁束密度)を求め、これに労働環境では10倍、一般環境ではさらに5倍の安全率を考慮して国際的なガイドライン値を設定している。

一方、発がん性物質やその可能性が疑われる物質や因子には閾値という概念は存在しない。極微量でもそのばく露量に見合った影響があると考えられている。したがって理論的にはそのばく露をゼロにすべきであるが、多くの場合現代生活には不可欠に近い環境因子であることが多い。もし磁界ばく露が小児白血病を発生させる可能性があったとしたら、まさにその範疇に入る。われわれは電気の利用を中止することはできないのである。そこで電磁界ばく露による健康リスクを定量的に評価する必要が生じる。一般的に発がん性物質へのリスク管理手法として、リスクがある一定の確率以下であれば実質的に安全であると見なし得るばく露量であるVSD³という概念が導入されている。

どの程度の確率であれば実質的に安全であるかという判断は、科学の領域ではなく、各国政府の判断領域である。判断にはもちろん国民性も反映するであろう。わが国を始め、欧米では生涯の発がんリスクが

³ 実質的安全量(Virtual Safe Dose, VSD)

10⁻⁵~10⁻⁶以下をVSDと見なす場合が多い。ある環境因子Aによる発がんリスクが10⁻⁶であると仮定した場合、ある人間がこのAのばく露を生業受けた時のそのAに起因する発がん確率が1,000,000分の1、つまり100万人に1人であることを意味している。これを日本の人口1億2千770万人と平均寿命80歳を適用すると、1.277×10⁹×10⁻⁶/80=1.596となり、Aへのばく露による1年間の過剰発がん患者数は1.6人となる。Aへのばく露による生涯の発がんリスクが10⁻⁵であると仮定した場合は16人となる。これを「高い」と判断するか「低い」と判断するかは行政的判断が求められることになる。わが国の大気汚染基準や飲み水の水質基準では、発がんリスクが10⁻⁵以下をVSDと見なしている。もし商用周波数磁界と小児白血病の関連性に因果関係があると仮定した場合を想定すると、2002年の小児白血病患者発症数は450人であり、1%未満がハイリスクグループで2倍の確率で小児白血病が増加するので、年間の推定過剰リスクは、4.5人と試算される。10⁻⁵と10⁻⁶との間にあると言える。ただし、生涯リスクを計算すると0.8人で10⁻⁶以下となる。

1-3-4 リスク・コミュニケーションの必要性

電磁界のリスクを考えると、もっとも重要な位置を占めるのがリスク・コミュニケーションである。リスク・コミュニケーションの目的の一つに、すべての関係者（一般市民、労働者、行政、企業、研究者等）が、推定されるリスクの大きさを同一に共有することがある。いかなるリスク評価とリスク管理を行っても、リスク・コミュニケーションが十分に行われなければ、あるいは不成功に終われば、それまでの努力は無駄になると言ってもよい。国民に安心してもらい、安心してもらうまで行かなくても理解・納得してもらうことが不可欠である。

科学者はその教育過程で、ある物質（環境）に対し定性・定量的判断を行う能力を学んで行くが、国民の大多数はそのような教育を受けていない。新聞等のマス・メディアである物質（環境）の定性的な毒性情報を流すと、国民は定量的な考察抜きに「危険」と判断する。これまで経験したことのないある物質（環境）に対しては、安全が確認できなければ、「危険」と判断する。人類が進化の長い過程で獲得した知恵かもしれない。

話を商用周波数電磁界に戻そう。今般WHOは長期的な磁界ばく露影響として、磁界を国際がん研究機関（IARC）による「2B:ヒトに発がん性があるかもしれない」という評価を踏襲するものの、因果関係があると言えるほどその科学的根拠は強くないと指摘している。さらには磁界と小児白血病との量・反応関係は認められず、ばく露量そのものも何を指標として評価するか議論が多く、健康リスク評価への理論形成はきわめて困難である。リスク管理の選択肢として磁界低減方策を実施しても、低減により小児白血病発症が減少するという健康上の便益は不明としている。この論理展開は、ゼロ・リスクを求める傾向が多い一部の国民に十分納得して貰うには複雑である。「要は、危ないのか危なくないのか?」という質問に明快な答えは見当たらない。「不確実性のあるリスクであり、もし、小児白血病と磁界ばく露との間に仮に因果関係があったとした場合の過剰リスクが4.5人/年と推定される。生涯リスクで言えば10⁻⁶以下である。」と答えるしかないのが現状である。科学的な不確実性と過剰リスクの推定で国民が理解・納得し、安心してくれるかであろう。リスク・コミュニケーションが不可欠なゆえんである。

1-3-5 今後の研究課題（中間周波数）

最後に、EHC238が対象とする周波数は、300ヘルツ以下ではなく中間周波数の一部を含む100キロヘルツ以下であることに留意されたい。しかし、いわゆる中間周波数電磁界に関する研究は商用周波数電磁界に比べて乏しいため、極論すればリスク評価はほとんど行われていないと言える。中間周波数電磁界を使用する機器が国民生活に浸透している今日、中間周波数電磁界に関する健康影響の研究が急務である。

（大久保 千代次）

参考文献

- 1-1. The WHO International EMF Project, <http://www.who.int/peh-emf/en/>(URL) [accessed August 2, 2005]
- 1-2. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Biological effects of static and ELF electric and magnetic fields, ICNIRP, Munich, Germany, ISBN 3-9804789-03-9, 1997
- 1-3. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Exposure to static and low frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences(0-100 kHz), ICNIRP, Munich, Germany, ISBN 3-934994-03-2, 2003
- 1-4. Poitier CJ, et al. eds. Assessment of health effects form exposure to power-line frequency electric and magnetic fields- NIHESH Working Group Report. NIH Publication No.98-3981. Research Triangle Park: National Institute of Environmental Health Sciences, 1998
- 1-5. International Agency for Research on Cancer, Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields. IARC monograph on the evaluation of carcinogenic risks to humans, Vol.80. Lyon International Agency for Research on Cancer, 2002
- 1-6. World Health Organization, Environmental Health Criteria, Vol. 238, "Extremely low frequencies fields." Geneva, 2007.
- 1-7. World Health Organization, Fact Sheet, No. 322, http://www.who.int/peh-emf/publications/elf_ehc/en/index.html ,Geneva, 2007.

2

要約と将来の研究への提言

前章で論じたように超低周波電界および磁界にはく露されることが健康に有害であるかどうかを検討し、その結論の要約と今後の研究への提言を最初の章にまとめている。以下にその内容をさらに簡潔にまとめた。各章ごとに現在までの調査・研究の結論および今後研究すべきことが示されている、いわば詳細な目次である。環境保健クライテリア (Environmental Health Criteria以下EHCと略記) 238は、英文400ページほどの文書であるが、まず物理・電気工学に始まり、生物物理、多種多様な病気の話(特にがん)、そして最後に社会的な対応・政策に関する事項、と非常に幅広いものであり、一度目から全体を通読できるものではない。したがって読者はこの第2章(要約)(EHC238では第1章に相当)から、興味のある後続章に飛ばし読みをして頂いてもよいと思う。

WHOのタスク会議では長期にわたって超低周波電磁界の健康影響に関する研究結果を調べたが、小児白血病だけが唯一「超低周波磁界が関連するかもしれない」病気として残り、あとの諸疾患は「超低周波電磁界とは無関係」とされている。その小児白血病についても、疫学調査の結果だけでは「磁界が病気の原因」と言うには証拠不十分である、つまり動物実験の裏付けがない上に発病メカニズムの説明がつかない。もちろん、小児白血病について「超低周波磁界が唯一の病因だ」とは誰も言っていないし、最近ではもっと合理的な考え方が提唱されている。

2-1 要約

この報告書は、超低周波電界および磁界にさらされることが健康に有害であるか、を検討するものである。主な目的は、超低周波電磁界の生物学的な影響についての論文などを調べて、健康へのリスクを評価し、健康防護のための指針を提言することである。

2-1-1 電磁界の源、測定とばく露

電磁界は電流が流れていれば存在する。電気は現代社会に広く利用されているから、電磁界は私たちの環境のどこにでも存在する。電界に用いられる単位はボルト毎メートル(V/m)、あるいはその1000倍のキロボルト毎メートル(kV/m)であり、磁界にはテスラ(T)、その1000分の1のミリテスラ(mT)、あるいは100万分の1のマイクロテスラ(μ T)を用いる。

一部の研究において、小児白血病の発生頻度が増大するとされている強さ以上の磁界を浴びる可能性のある子供は少ない。平均で0.3マイクロテスラ以上浴びる子供は1~4%、平均で0.4マイクロテスラ以上浴びる子供は1~2%である。

職業的に電磁界にさらされる人は、電気事業にたずさわる技術者で0.4~0.6マイクロテスラ、高圧送電線作業員などで1.0マイクロテスラ、最大では10ミリテスラに達することがある。

2-1-2 人体内の電界と磁界

体外の電磁界によって、体内に電界と電流が生じる。その強さは一般に体外の5~6分の1である。地面に接している場合は脚部を通して電界が体内に達するが、足が絶縁されていればそれは弱い。体内に誘発される電流の強さは、臓器や組織の導電率によって異なる。

体内の磁界は、外部と同じ透過度である。

2-1-3 生物物理学的なメカニズム

電磁界の生物作用は直接作用と間接作用から成っているが、未知のことも多い。直接作用としては、神経ネットワークに誘導される電界、ラジカル・ペア、マグネタイトの3理論があるが、いずれが主であるかは分からないし、仮定条件を設定せねばならない。間接作用としては表面の電界によるショックがあるが、それが健康に影響するかは不明である。

2-1-4 神経行動学的作用

高圧電線からの電界にさらされると、それを体表面で感じる人があることは確実であり、ある条件下ではボランティアの5~10%が感じた。強い磁界であるMRI⁴で感じる人もある。目の網膜に超低周波電磁界を感じる人もある。

ボランティアでテストした神経学的な反応や電磁界高感受性などの意義については不明確であり、磁界の睡眠への効果についても不確実である。動物実験ではたしかに動物が超低周波電磁界を感じることは示されているが、意義は不明である。

2-1-5 神経内分泌系

電磁界の影響として神経内分泌系ではメラトニンの分泌に影響があるとの報告がある。しかし不一致の例もあり、メカニズムも不明である。メラトニン産生には日周期があるが、睡眠中に超低周波電磁界にさらしてもまったく影響がなかったとの報告がある。マウスの実験でも効果があったという研究となかったという研究があり、総合して考えると人体の健康に有害となる影響は生じないと言えよう。

⁴ 核磁気共鳴イメージング(Magnetic Resonance Imaging, MRI)

2-1-6 神経変性の疾患

超低周波電磁界が神経障害を生じて、パーキンソン病やアルツハイマー病に関与しているのではないかと、との仮説があるが実証されているとは言えない。

2-1-7 循環器系の疾患との関連性

電気ショックは健康に有害であることは明白であるが、超低周波電磁界が心臓-血管系に有害であるという証拠はない。

2-1-8 免疫学と血液学

超低周波電磁界の免疫学的な影響についての研究報告は不明確であり、10マイクロテスラから2ミリテスラの範囲で血球数やナチュラルキラー細胞数への影響は見られなかった。動物実験では雌マウスでナチュラルキラー細胞数の減少が見られたが、雄では見られず、ラットでは雌雄ともに変化なく不統一である。これ以外の報告も総合的に検討して、超低周波電磁界の免疫学的および血液学的影響はないと結論できる。

2-1-9 生殖と発生

父親あるいは母親が超低周波電磁界にさらされたことによる生殖学的な影響はまったく見られていない。母親が超低周波電磁界を受けると流産の可能性が増えるのではないかと報告があったが、不確実である。動物実験でも生殖および発生に対する超低周波電磁界にさらされた影響は見られず、不明確である。

2-1-10 がん

疫学

IARCは、2001年以前のデータに基づいて、超低周波電磁界はヒトに対して発がん性があるかもしれない(possibly carcinogenic to humans)と分類した。この判断は小児白血病の疫学研究を重視した結果であり、その後も変わっていない。白血病以外の小児がんについては、その結論は適用できないままである。その後女性の乳がんについての大規模な研究報告がいくつかあり、磁界ばく露の影響は見られなかった。脳腫瘍と成人白血病についても新しい研究報告があったが、電磁界ばく露との関係については認められないままであった。

その他の疾患や他のすべてのがんについても、電磁界ばく露との関係はこれまでどおり認められない。

実験動物での研究

小児白血病の実験動物モデルはない。ラットの自然発生の乳がんについては独立した3つの大規模研究があるが、いずれも磁界ばく露の影響は見られなかった。白血病とリンパ腫についてはネズミで超低周波電磁界の影響はみられていない。いくつかの長期間にわたるネズミの実験でも、造血組織、乳がん、脳腫瘍および皮膚がんの有意な増加はみられていない。

DNA鎖の切断などについては増大するとの報告があるが、それを否定する報告もあって不一致である。

これらを総合して、超低周波電磁界単独で腫瘍を生じる証拠はなく、他の発がん源との組み合わせの研究も否定的である。

細胞レベルの研究

一般的に50ミリテスラ以下の超低周波電磁界照射で遺伝子に変化を生じる報告はない。最近35マイクロテスラの低磁界でDNA損傷が生じたとの報告があったが不完全な内容であった。DNAに損傷を生じさせ

る要因に超低周波電磁界が相互作用を及ぼす証拠はない。

超低周波電磁界が細胞周期に影響するとか、細胞の増殖、細胞死(アポトーシス)、カルシウム・シグナル、細胞のがん化(トランスフォーメーション)などに関する報告も明白な結果ではない。

総合的な結論

以上を総合して2002年以後の研究からは、超低周波電磁界がヒトの発がん源である可能性があるというこれまでの分類はそのままよい。(疫学の限定的な証拠と実験動物や細胞レベルでの否定的な結果に基づく)

2-1-11 健康影響への評価(予測)

確実な人体に関するデータがある場合には、実験動物や細胞レベルの研究よりも信頼できる。人体におけるデータがなかったり不十分な場合には、実験動物あるいは細胞での研究がそのギャップを埋めるのに用いられる。

急性影響

100キロヘルツ(kHz)までの超低周波電界および磁界による生物への急性影響は確認されている。これに対応する国際的な基準も示されている。

慢性的な影響

継続的な低レベルの磁界ばく露(0.3~0.4マイクロテスラ以上)が健康影響を生じさせ、小児白血病の頻度を増大させることは疫学的研究によって示されている。このことは実験研究では支持されていない。したがってバランスをとった判断としては、十分に正しいとは言えないが、考慮すべき理由はかなりあると言えよう。小児白血病以外の疾患など、すなわち小児や成人のがん、うつ病、自殺、生殖異常、発育異常、免疫変化、神経学的疾患などへの超低周波電磁界の関与は、小児白血病に比べてきわめて不十分である。

2-1-12 防護的な対策

超低周波電界および磁界に対する防護的な対策は、有害な影響が確立されている場合には不可欠であり、これまで急性作用についてのみ2つの国際基準(国際非電離放射線防護委員会(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection,1998年)と電気電子学会(The Institute of Electrical and Electronics Engineers,2002年)、が公表されている。慢性影響があるかどうかについては、超低周波電磁界と小児白血病に限られた事実から不確実である。したがって慎重な「念のための」措置が求められる。しかしながら、「念のための」措置としてあいまいな基準にまで制限値を下げることは支持できない。それは科学的に正しくないだけでなく、高いコストがかかる上に防護的な効果を高めるのに必要とは言えない。具体的に以下の基準を提案する。

- 基準を作成する機関(政府)は、一般人と労働者に分けて超低周波電磁界ばく露基準の指針を示すべきであり、それは国際的なガイドラインに沿った原則に従うのが望ましい。
- 上記の機関は、超低周波電磁界のあらゆる発生源からの強さを測定し、上記基準を越えないようなプログラムを確立すべきである。
- 電力の市民生活における健康的、社会的および経済的な利益を害することなしに、不必要なばく露を減らす方法を導入することが望ましい。
- 政府、地方自治体および産業界は新しい施設や器具の作成に際して、低コストで上記の対策を考慮すべきである。
- 器具や装置からの超低周波数ばく露を減らすことは、より安全で、コストがあまり上昇しないなら検討すべきである。

- 現在使用している超低周波電磁界源を変更する場合には、超低周波電磁界の減少を、器具や装置の安全性、信頼性および経済性とあわせて検討すべきである。
- 地方自治体は送電線を新設したり、再配線する場合には、安全性に配慮しつつ不用意に地表の電流が増大しないように配慮せねばならない。現存する配線にまでその配慮をすることは高いコストとなるであろうし、必要とは言えない。
- 国の機関はすべての関係者が開かれた情報提供によって自分で決めることができるようにすべきであり、それによって各人が電磁界にさらされるのをどうしたら減らせるかを判断できるであろう。
- 地方自治体は超低周波電磁界を強く生じるような施設の設置に際しては、産業界、地方自治体、市民との協議を通じて計画の改良につとめるべきである。
- 政府や産業界は超低周波電磁界の健康影響についての未解明の諸点を減らすために研究計画を推進すべきである。

2-2 研究への提言

超低周波電磁界が健康影響を生じさせるかについて、理解にギャップがあることを確認することが健康リスクの評価に不可欠である。したがって以下の提言もそれに沿っている(表2-1に要約した)。これまで欠けていた中間周波数(300ヘルツから100キロヘルツ)についての研究が必要である。ボランティアによる研究にはヘルシンキ宣言(世界医師会、2004年)の倫理基準が守られなければならない。実験研究では、(1)再現性の確認、(2)発がん性との関連、(3)メカニズムの解析、および(4)それらの哺乳類やヒト材料での研究、が不可欠である。

2-2-1 発生源、測定およびばく露

各国における高い超低周波電磁界ばく露を伴う家屋の特性の把握は疫学的な評価にとって重要である。特に胎児や幼児の超低周波電磁界への影響、中でも家庭における床配線による暖房や、アパートの変圧器などについて調べなければならない。

職業的に高い超低周波電磁界ばく露を受ける可能性についても疑う必要がある。たとえば、MRI装置や運輸機関などの保守などに従事する人々である。

2-2-2 測定

これまでは、電磁界によって体内に誘導される電流に関する研究が主に行われてきたが、今後は体外のばく露によって体内にどのように電界が誘導されるかが問題となろう。

2-2-3 生物物理学的なメカニズム

2-1-3項で説明した3つのメカニズムのなかでは、ラジカル・ペア・メカニズムがもっとも起こり得ると考えられるが、人体影響にどのように働くかは不明である。特にどの低いレベルまでそのようなメカニズムと結びつくかの検討がなされなければならない。

2-2-4 神経行動学的作用

ボランティアを対象に、睡眠への影響や、精神的な活動への影響を、客観的な手法で定量的に研究することが望まれる。動物実験ではオピオイドやコリン産生への反応などによって、行動学的な作用について研究すべきである。

2-2-5 神経内分泌系

これに関連した報告はなく、研究への指針もない。

2-2-6 神経変性の疾患

ALS⁶が電気労働者に多いとの報告がいくつかある。これに超低周波磁界との因果関係があるかは研究が必要である。アルツハイマー病との関連性には疑問点が多く、死亡率ではなくて有病率を調べるべきである。

2-2-7 循環器系

優先的に研究すべき課題はない。

2-2-8 免疫学と血液学

これまでの研究結果は不確実であり、特に子供についてのデータがない。したがって幼若の動物を用いた研究が望まれる。

2-2-9 生殖と発生

超低周波磁界によって流産が増えるとの報告があるので、疫学的な研究が望まれる。

2-2-10 がん

疫学研究と実験およびメカニズムについての研究の食い違いは、超低周波磁界の健康影響で最も優先的に重要視すべき問題点である。疫学においては、他の原因との関係、および強い電磁界にさらされた集団などについての研究に重点がおかれなければならない。具体的には子供の脳腫瘍、成人のリンパ腫と脳腫瘍については研究が必要であろうが、成人の乳がんについては最近関連性が否定されていて優先的に研究する必要はない。

培養細胞を用いた研究については、これまでの研究の追試、確認が望まれる。

2-2-11 防護的な対策

科学的に不確実な問題についてどのような「念のための」措置をとるかの研究が必要である。超低周波磁界は「ヒトに発がん性があるかもしれないとの現在の判断にどのように対処するかが課題であるが、そのこと自体の研究は進んでいない。超低周波磁界の制限についてのコスト-利益、あるいはコスト-効果をどう評価するかの研究は多角的に行われてきたが、定量的に把握しにくい本課題への評価は容易ではない。

(武部 啓)

表2-1. 今後の研究への勧告

| | | 優先順位 (高、中、低) |
|--------------|---|----------------------------|
| 発生源、測定、ばく露 | 家庭内 MRIのように職業的にさらされる人のデータが不十分な場合 アメリカ以外の国での家庭内配線による子供への誘導電流 | 中 高 中 |
| 測定 | 体外と体内のばく露の評価 妊婦および胎児への体内誘導電流の推定 細胞構成や臓器以下のレベルの複雑な組織内のマイクロ測定 | 中 中 中 |
| 生物物理学的なメカニズム | 免疫細胞におけるラジカル・ペア・メカニズム 常磁物質の超低周波磁界作用における役割 超低周波電磁界によって誘導される体内電界の 神経ネットワークなどへの影響 | 中 低 高 |
| 神経行動学的作用 | ボランティアにおける睡眠、脳波などへの影響 実験動物を用いた妊娠中、出生後などへの影響 オピオイド、コリン産生への影響 | 中 中 低 |
| 神経変性の疾患 | ALSおよびアルツハイマー病との関連 | 高 |
| 免疫学および血液学 | 幼若な動物を用いた実験研究 | 低 |
| 生殖および発生 | 流産との関連性 | 低 |
| がん | 小児白血病の解析 小児脳腫瘍の解析 成人の白血病と脳腫瘍 子供の白血病の遺伝子導入(トランスジェニック)モデルネズミの開発 細胞レベルおよび実験動物における共発がん(co-carcinogenic)作用 細胞レベルでの遺伝毒性実験の再現性の確認 | 高 高 中 高 高 中 |
| 防護的な対策 | 科学的に不確実な問題についての健康「念のための」原則や政策の検討 電磁界に関するリスクの概念と情報伝達のありかたの検討 電磁界を低下させるためのコストと利益/コストと効果の検討 | 中 中 中 |

3

発生源、測定、ばく露、 体内誘導電界と磁界

放送・通信用電波と異なり、電力用の周波数50または60Hzの超低周波電磁界は電界と磁界を分けて取り扱うことができる。強い電界は静電誘導によって人体に感知されるが、弱い電界や磁界は感知されない。世界保健機関(World Health Organization以下WHOと略記)・環境保健クライテリア(Environmental Health Criteria以下EHCと略記)238の第2章では発生源とその実測値など、第3章ではばく露による人体内の誘導電界・電流などについてまとめられている。これらの章では海外の一般家屋におけるばく露値、家電製品類の発生源などが示されているが、このようなEHC238の記述に加え、ここでは日本の実測値や各国の電力設備に対する規制値を追加して「解説」として示した。たとえば、日本の架空送電線の電界規制は、世界的にみても厳しく設定されており、(2008年12月時点で)磁界規制はないもの的高鉄塔化や2回線送電などの設計思想によって、磁界レベルは海外の架空送電線と比較して小さくなることを紹介した。

3-1 電界と磁界

電界および磁界は、送電線やケーブル、住宅の配線や電化製品の内部など、電気が流れるところすべてに存在しており、商用電力の大部分が50または60ヘルツ(Hz)の周波数で運用されている。

電界は電荷から生じるため電圧に関係しており、電流とは関係がない。SI単位ではボルト毎メートル(V/m)で測定される。電界は導電性材料に大きく影響を受け、商用周波数では金属ボックスが実質的に完璧な遮へいとなる。建物も十分な導電性を有しているため、外部発生源による電界は建物内部において10~100分の1まで低下している。

磁界は、電荷の運動(電流)によって生じる、電流量は電圧とは関係しない。(8 参考資料(P.60) 参照) 磁束密度はSI単位ではテスラ(T)であるが、古い文献や一般的にはガウス(G)を用いることが多いかもしれない。1テスラは10,000ガウス、1マイクロテスラ(μT)は10ミリガウス(mG)である。

電界および磁界はともに、発生源の近くで最も大きくなり、距離とともに減少する。

解説3-1 送電線から発する磁界

磁界は電流によって生じる。1本の無限長直線に流れる電流によって生じる磁界は、距離に反比例して小さくなる。(8 参考資料(P.60) 参照) 一方、一般的な電力システムは3相交流であり、3本の電線が1セットになっている。それぞれの電線の電圧または電流は1/3周期の時間的なズレがあるため、各電線から発生した電界あるいは磁界を合成すると打ち消しの効果もあり、その大きさは距離に反比例ではなく、距離の2乗から3乗に反比例して小さくなる特徴をもつ(図3-1参照)。

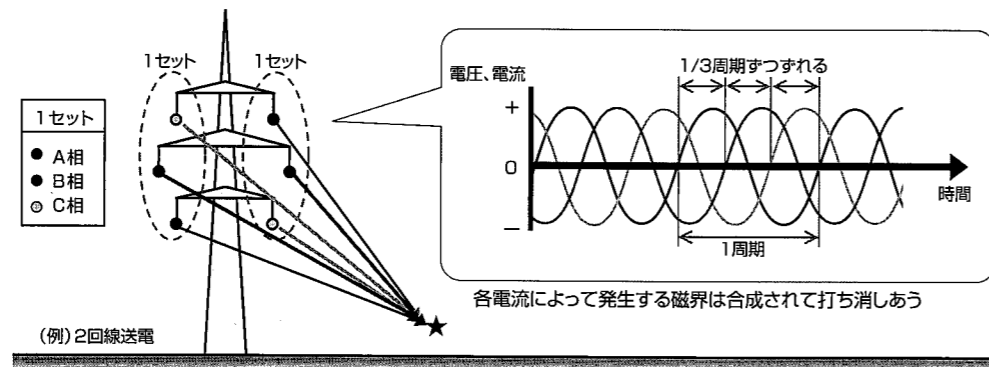


図3-1. 3相交流と磁界の打ち消し効果

3-2 交流電磁界の発生源

3-2-1 居住環境における電界

居住環境における超低周波電界の主な発生源は、架空送電線・配電線の運用や家庭での電化製品の使用などによる。架空送電線から生じる地表レベルの最大電界強度は、ほとんどの国において10キロボルト毎メートル程度である。

なお、ケーブルを地下に埋設している場合、地上には電界は発生しない。変電所の場合、その構外において大きな電界が生じることはほとんどない。

住宅内では、屋内配線から発生する電界は、金属管路の使用や壁の建材などにより遮へいされているため、ごくわずかである。電化製品から発生する電界は、その使用に関係なくコンセントに接続されている状態で常に商用周波数の電界が発生している。この電界は、発生源である製品から遠ざかることにより、急激に小さくなる。送電線の真下では、電界は数千ボルト毎メートルであるが、住宅内の商用周波数電界の平均値は最大で数十ボルト毎メートルである。

解説3-2 日本の架空送電線の電界制限値

日本の特別高圧の架空送電線は、電気設備に関する技術基準を定める省令(平成9年3月27日通商産業省令第52号、以下「技術基準」と称する。)の第27条によって、地表上1mにおける電界強度が3キロボルト毎メートル以下になるように施設されている(ただし、人の往来が少ない場所を除く)。この制限値は、1973年に500キロボルト(kV)送電が開始された際、送電線下における静電誘導による人の電界感知を懸念して実施された実験結果に基づき定められた。

図3-2は、500キロボルト試験送電線にて、被験者が傘をさした状態で歩き、傘の金属部を頬にあてたときの感知を調べたものである(被験者数約40人)。電界強度は5段階として、被験者にはその強度を知らせていない。ただし、被験者にはあらかじめ実験内容を説明し、わずかな感覚でも逃さないように注意を求めているため、実際の送電線下で一般公衆が先入観なしに感知する通常の条件に比べ、この実験結果の方が厳しい評価を与えることになると報告されている^{参考文献3-1}。この実験結果では3キロボルト毎メートルの電界強度において、被験者の半数がわずかな気にならない程度の刺激を感じており、この値が制限値として採用された。この日本の電界制限値は、世界的にみても厳しい制限値といえる。(P.36解説 5-2参照)

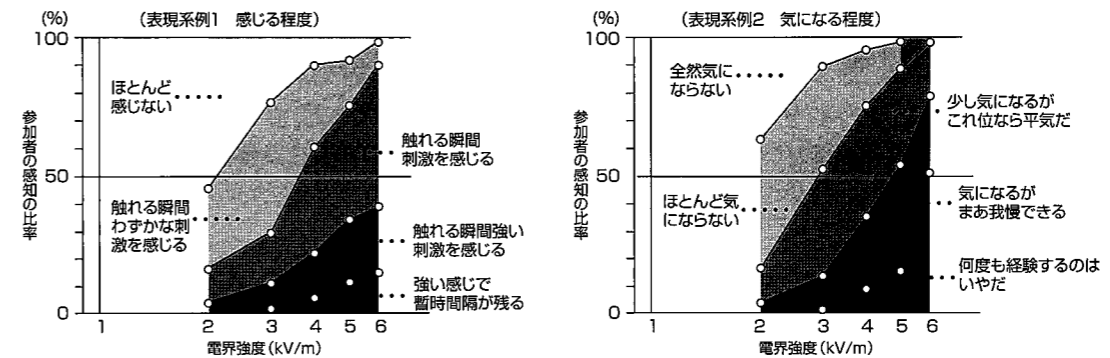


図3-2 送電線下における電界強度と被験者の感知

3-2-2 職業環境における電界

230~765kVの送電鉄塔に昇って作業する際には、電界は10~30kV/mに達する可能性がある。架線作業者は人体への静電誘導を緩和するため、導電性作業服等を着用し、電界を遮へいしている。

3-2-3 居住環境における磁界

地球からも静磁界が発生している。地磁気の強さは日本では約50マイクロテスラである。人工的な磁界の例として、送電線や配電線、地中ケーブル、配電用変電所や電車などから発生する超低周波磁界が挙げられる。

架空送電線から生じる磁界は一般的に電圧が高いほど電流も大きく、導体間の距離も離れているため、結果的に発生する磁界は(電圧そのものに影響を受けることはないが)大きくなる傾向がある。需要ピーク時には送電線下の地表付近において数十マイクロテスラまで達する可能性はあるものの、平均値では通常数マイクロテスラ以下であり、さらに一般的に送電線から数十m離れることにより数百ナノテスラ(nT)まで小さくなる。

解説3-3 日本の架空送電線からの磁界

日本の送電設備の形態と磁界レベルについて補足する。先にも述べたとおり、磁界は発生源からの距離が離れるほど急激に小さくなる。日本は国土が狭いことから、市街地にも送電設備を設置する必要性があるため、送電鉄塔は比較的高く、電線配置も垂直に設計されることが多い(図3-3参照)。また、電力を安定し

⁷ナノ(n)=10⁻⁹

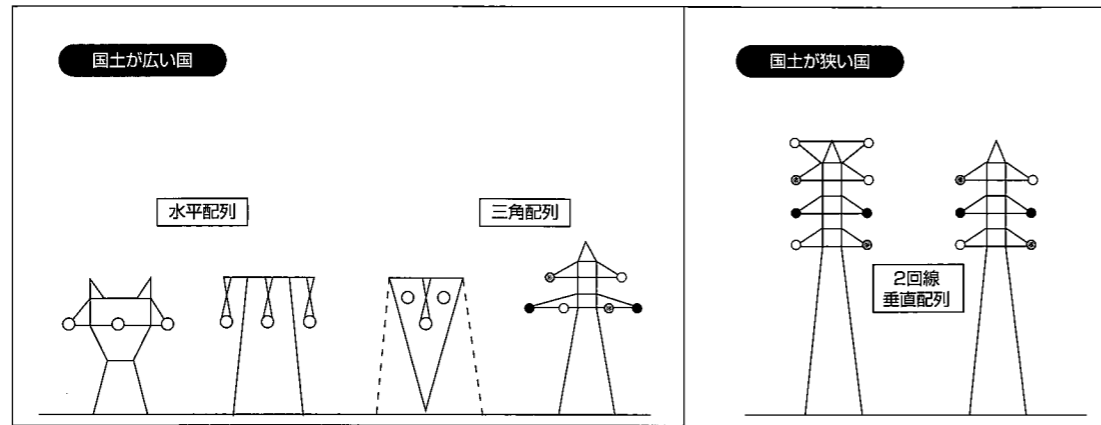


図3-3. 送電鉄塔の形状の違い

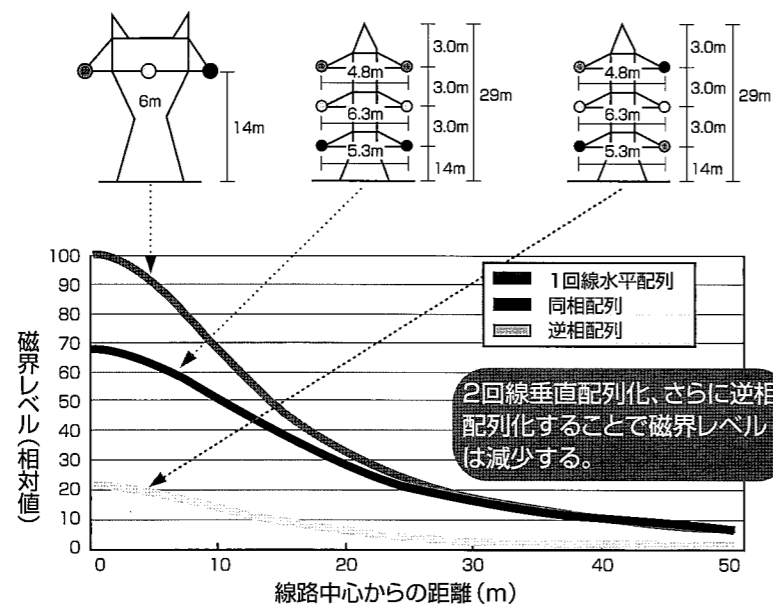


図3-4. 電線配置による磁界レベルへの影響

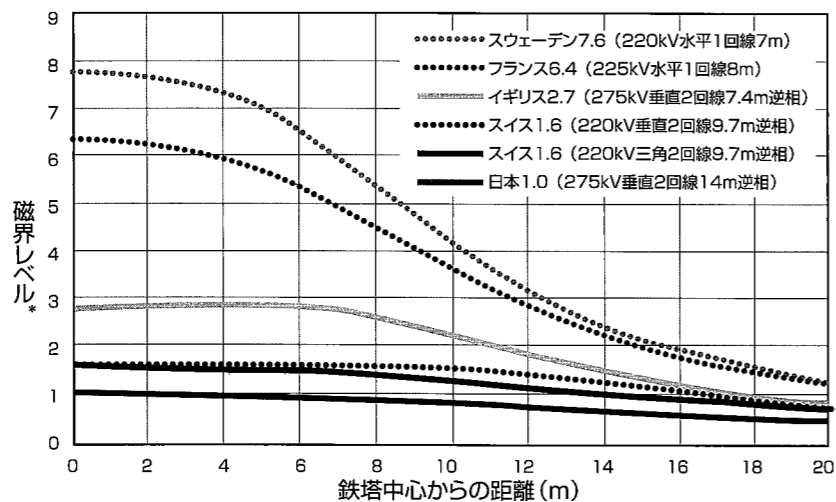


図3-5. 日本と諸外国との磁界レベルの比較 (220kV~275kV)

*日本(275kV逆相)の磁界レベル(鉄塔中心からの距離:0m)を1としている。
また送電線路1ルート当たりの電流を同一とした。

(図3-3、図3-4、図3-5 出典:経済産業省 電力設備電磁界対策ワーキンググループ報告書)

て供給するため、一般的に同一回路2回線送電方式が採用されており、超高压送電線の大部分は逆相配列となっている。これらは、厳しい電界制限を遵守するため、設計思想に取り込まれたものであり、結果的に磁界レベルの低減に寄与しているといえる(図3-4参照)。一方、海外では広い国土を利用できるため、送電鉄塔は比較的低く、電線を水平に設置されるケースがあり、磁界レベルは比較的大きくなる傾向がある(図3-5参照)。

磁界は電流によって発生するため、電力需要によって変化している。英国の家庭内における磁界は、一日では平均して2倍程度、年間では25%程度の変動があると報告されている。

家庭における主な磁界発生源は屋内配線ではなく、電化製品である。電化製品の電流は小さいループとして近似できることが多く、2つの逆向きの電流によって均衡しているため磁界レベルは小さい。しかし、電気モータ等、意図的に電化製品内に磁界を発生させる製品については、漏れ磁界低減のための設計によって発生する磁界が大きく影響を受けるため、小さくて安価な変圧器やモータなどを使用した製品からは大きな磁界が発生していることが多い。電化製品から生じる磁界は、通常距離の3乗に反比例して低下する。その結果、電化製品から発生する磁界は、そのごく近傍においてのみ影響を及ぼす傾向がある。また、多くの電化製品からは高調波が発生していることもあり、注意が必要である。もし高調波のスペクトル分布が不明の場合、広い周波数帯域の測定結果の解釈に誤解を招く恐れがある。電磁調理器具は数十キロヘルツ(kHz)の周波数にて稼働しているが、天板の前面から数十cmの位置において数マイクロテスラ以下である。

解説3-4 日本の電力線からの磁界

日本の電力設備から生じる超低周波磁界について、経済産業省が調査している。表3-1にスポット測定の結果を示す。この報告書では、比較的大きな値を示した路上変圧器やケーブル立ち上がり部の詳細な磁界分布測定が示されており、機器やケーブルから30cm離れることによって磁界レベルが約10~17%まで急激に減衰することが示されている。

また、季節による磁界レベルの変動を調査するため、長期連続測定も行われている。1年以上調査したデータはほとんどないが、一例として市街地に供給する特別高压送電線では、一日毎の最大磁界を比較すると夏季と春季では最大1.79倍の差があることを報告している。

表3-1. 電力設備周辺の磁界分布調査 (出典:経済産業省 電力設備電磁界対策ワーキンググループ報告書)

| 対象設備 | 測定箇所 | 最大値(μT) | 測定年度 | 測定日時 | 測定ポイント |
|------------|-------------------|---------|----------------------|-----------|---------------|
| 架空送電線 | 500kV | 87 | 2003 2004 2005 | 2004.9.1 | 地表1.5m |
| | 275kV | 100 | | 2004.7.28 | |
| | 220kV | 6 | | 2004.7.5 | |
| | 187kV | 39 | | 2005.8.23 | |
| | 154kV | 59 | | 2005.8.29 | |
| | 110kV | 10 | | 2004.7.13 | |
| | 77kV | 64 | | 2004.8.10 | |
| | 66kV | 197 | | 2004.9.2 | |
| 地中送電線 | 275kV | 5 | 2003 2004 | 2003.9.25 | 地表0m |
| | 154kV | 54 | | 2004.9.10 | 地表0.5m |
| | 77kV | 15 | | 2003.9.24 | 地表0m |
| 橋梁添架 | 154kV | 25 | 2003 | 2003.9.17 | 地表1m |
| 架空配電線 | 22kV, 6.6kV | 11 | 2003 | 2003.10.1 | 地表1m |
| 配電用変電所 | 66/22kV, 66/6.6kV | 13 | 2003, 2004 | 2004.7.22 | 敷地境界、地表1m |
| 路上変圧器 | - | 64 | 2003, 2006 | 2003.9.8 | 設備表面、地表0.3m |
| ケーブル立ち上がり部 | 6.6kV | 14 | 2003, 2006 | 2004.8.27 | ケーブル表面、地表1.5m |

解説3-5 家電製品からの磁界

図3-6.に、日本の身の周りにある設備、電化製品からの磁界レベルを示す。

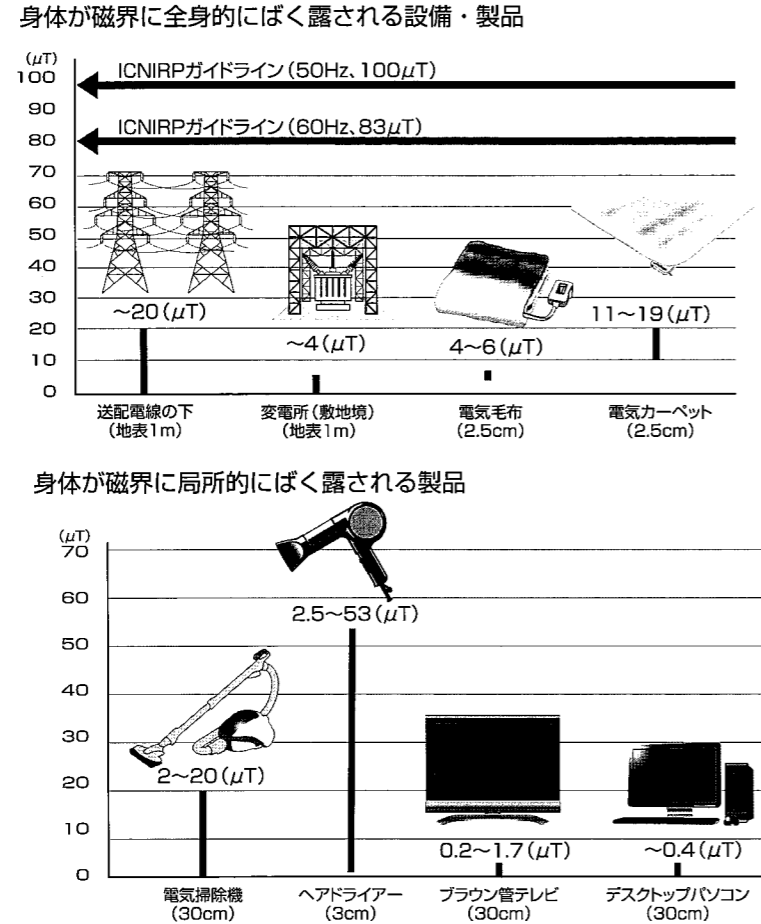


図3-6.身の周りにある設備・電化製品からの磁界レベル

(出典:経済産業省 電力設備電磁界対策ワーキンググループ報告書)

上図の全部及び下図の電気掃除機並びにヘアドライヤーについては「電力設備環境影響調査 平成15年度調査報告書(経済産業省原子力安全・保安院)」及び「電磁界影響に関する調査・報告書(1993年)通商産業省資源エネルギー庁」より引用しています。下図のブラウン管テレビ及びデスクトップパソコンについては「家電製品から発せられる電磁波(低周波磁界)測定調査」財団法人 家電製品協会 平成15年3月より引用しています。

3-2-4 職業環境における磁界

職種別の磁界ばく露の実態については多数の報告がなされている、その例を、8 参考資料(P.60)に示した。

解説3-6 超低周波電磁界に関する規制やガイドライン

国内外の一般環境の超低周波電磁界に関する規制やガイドラインを表3-2に示した。

日本には先にも述べたとおり、世界的にも厳しい電界規制はあるが、磁界の規制は定められていない(2009年1月現在、検討中)。

なお、ここでいう規制というのは法規に基づいた電気事業者の義務である。ガイドラインや勧告は法的な拘束力を持たない自発的な基準・方針であり、たとえば国際学協会が協議して提案したものもある。表3-2中に国際的ガイドラインの代表例としてICNIRP⁸ガイドラインを記載した、これはEHC238においても追認されている。

⁸ 国際非電離放射線防護委員会(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP)

表3-2 国内外の一般環境の超低周波電磁界に関する規制・ガイドライン
(出典:経済産業省 電力設備電磁界対策ワーキンググループ報告書)

| | 制定年 | 電界 | | 磁界 | |
|--------------------|-------|-----------|--------|---------------------|--------|
| | | kV/m | 区分 | μT | 区分 |
| 国際レベル | | | | | |
| ICNIRP | 1998年 | 5.0(50Hz) | ガイドライン | 100(50Hz) | ガイドライン |
| | 1998年 | 4.2(60Hz) | ガイドライン | 83(60Hz) | ガイドライン |
| 国レベル | | | | | |
| 日本 | 1976年 | 3 | 規制 | — | — |
| 米国 ^(注1) | | — | — | — | — |
| ドイツ | 1997年 | 5 | 規制 | 100 | 規制 |
| イタリア | 2003年 | 5 | 規制 | 100 ^(注2) | 規制 |
| スイス | 2000年 | 5 | 規制 | 100 ^(注2) | 規制 |
| オーストリア | 1994年 | 5 | ガイドライン | 100 | ガイドライン |
| フランス | 2001年 | 5 | 規制 | 100 | 規制 |
| スウェーデン | 2002年 | 5 | 勧告 | 100 | 勧告 |
| 英国 | 2004年 | 5 | ガイドライン | 100 | ガイドライン |

規制: 法規に基づいた義務 ガイドライン・勧告: 法的な拘束力を持たない自発的な基準・方針
(注1) 米国には国レベルの規制はないが、州レベルでは規制を設けているところもある。
(注2) スイス、イタリアでは本規制値(ばく露制限値)以外に住宅、病院、学校等の特に気を配ることが必要な場所において、設備に対して、「念のための政策」に基づいた磁界の放出制限値、あるいは、ばく露制限値を設定している。

3-3 ばく露評価

疫学研究のための電界および磁界へのばく露評価を特に困難とする事情は次の通りとされる。

- ばく露の無い人はいない。現代ではすべての人はある程度の超低周波電界および磁界にばく露されているため、ばく露の有無ではなく、程度の違いによって分類することになる。
- 被験者はばく露の識別をすることができない。電界および磁界にばく露された人は、それを感知することができないため、アンケート調査では過去のばく露状況を正確に把握することができない。
- 高ばく露と低ばく露の明確な区別ができない。高ばく露の平均強度と高ばく露に及ばない平均強度とを区別する差が小さい。家庭内の平均磁界は約0.05~0.1マイクロテスラであり、小児白血病と磁界に関するプール分析(アールポムら)では高ばく露カテゴリーとして0.4マイクロテスラを使用しているが、この2~4倍程度の違いのばく露を確実に分類する必要がある。
- 時間の経過に伴うばく露の短期的変動がある。特に磁界は、秒単位またはそれよりも長いタイム・スケールにて変動しており、被験者のばく露を評価する際に、この非常に変動しやすい量を1つの集計値として使用することになる。
- 時間の経過に伴うばく露の長期的変動がある。電界および磁界は曜日や季節によって年間を通して変動する、この変動を示すデータはほとんど存在していない。したがって過去のある期間におけるばく露状態を評価するためには何らかの仮説をたてる必要があり、個々人の評価については精度が期待できない。
- 空間におけるばく露の変動。磁界は同一建物内でも大きさが変わるため、人はさまざまな強さの磁界にさらされることになるが、個別のモニタリング以外の通常の方法では評価することができない。

人はさまざまな環境において電磁界にさらされる。ほとんどの研究では、住宅についての調査では家庭で、職場に関する調査では作業現場でばく露評価を実施している。ほとんどの疫学研究は、電界より磁界の研究に焦点を当てている。8 参考資料(P.60)に磁界のばく露評価手法を示す。

3-4 体内誘導電磁界

超低周波数の電界および磁界に身体がさらされると、身体内部に電界および電流が誘導される。ドシメトリーは、外部の電界および磁界と身体内部に誘導された電界および電流密度、またはこれらの界へのばく露に関連するその他のパラメータとの関係を表している。人体内に誘導された電界や電流は、容易に測定することができない。動物では測定されているがデータは限られており、精度も低い。

3-4-1 電界のドシメトリー

低い周波数では、身体は良導体とみなせるため、ヒトや動物の身体は、超低周波電界の空間分布を大きく乱す。身体外部の乱された電気力線は身体表面に対してほぼ垂直となる。身体内部の電界は外部の電界よりもかなり小さいが、体表面には振動する電荷が誘導され、これが身体内部に電流を誘導する。図3-7は、一様電界中のモデルにおいて、自由空間および両足が地面に接触した完全接地におけるモデル表面の電荷密度を示している。身体内部の電界は、両足で完全に接地している場合に最大となり、体が絶縁された状態(自由空間)と比較すると最大2倍になる。

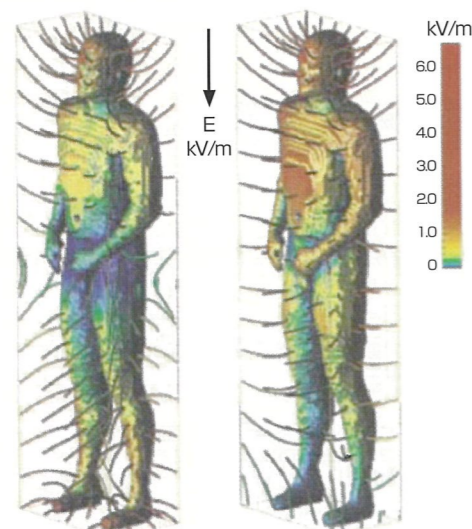


図3.7 60Hz、1kV/mの一様電界中のモデルの表面電荷密度(左:自由空間、右:両足が地面に接触した完全接地)

電界ばく露の計算は、人体によって電界分布が乱れるため、磁界ばく露の計算よりも困難である。不均一な人体の電氣的性質および複雑な外観と器官の形状のため、妥当な数値法は限られており、高解像度のドシメトリーとしてFDTD⁹や有限要素法が使われている。

超低周波電界へのヒトのばく露に関するドシメトリーの主な特徴は次の通りである。

- 身体内部の電界は通常、外部電界より5~6桁小さい。
- ばく露が主として垂直電界の場合、誘導電界の主な方向も垂直である。
- 地面と完全な接触状態にある身体に対しては強い誘導電界が生じ、絶縁された身体に対しては弱い誘導電界が生じる。
- 地面と完全な接触状態にある身体内部に流れる電流の合計は、組織導電率よりも、体の大きさや形状(姿勢を含む)によって決定される。
- 器官および組織に誘導される電流分布は、それぞれの組織の導電率によって決定される。

3-4-2 磁界のドシメトリー

磁界については、組織の透磁率が空気と同じであるため、組織内の磁界は外部磁界と同じである。ヒトおよび動物の身体は磁界を大きく乱すことはない。磁界の主な相互作用は、電界のファラデー誘導であり、導電組織の電流密度と関連している。(詳細は巻末の解説を参照)

均一な超低周波磁界のヒトへのばく露に対するドシメトリーの主な特徴は次の通りである。

- 誘導電界および電流は、身体に対する外部磁界の方向に依存する。
- 体の内部の誘導電界は全体として、外部磁界が身体正面から背面に向かう場合に最大となる。
- 脳、脳髄液、血液、心臓、膀胱、眼球、および脊髄は、外部磁界が側面から側面へ向かう場合に最大となる。
- 磁界の向きが身体の垂直軸に沿う場合には誘導電界は最小となる。
- 身体が大きいほど誘導電界も大きくなる。

● 誘導電界の分布は、器官および組織の導電率に影響される。しかしその影響は強くない。

不均一で比較的大きい磁界(たとえば空間的な勾配がある磁界)へのばく露は、職業上のばく露がほとんどである。これらのばく露は複雑な状況で発生しており、EHC238には高圧送電線の作業員に関する2つの分析について紹介されている。

3-4-3 接触電流

接触電流は、外部の電界または磁界が誘導する電界と同等以上の電界を組織に発生させる。電位の異なる導電箇所に触れ、身体に流れる電流経路が成立したときに接触電流は発生する。一般的に電流の経路は手から手または足である。接触電流の発生源は、電化製品のシャーシや、送電線下に駐車した自動車など、電界内に位置する導電性の大きな物体も接触電流の発生源となる。

解説3-7 日本における接触電流の機会

接触電流は、「非常に小さな感電」といえるかもしれない。日本の家庭では低圧配電系統(100V)の接地と機器躯体の接地とが独立していることや、中性線の接地方式が海外と異なるため、常時接地電流が流れない、あるいは流れてもきわめて小さいことから、常時機器躯体や水道水栓と近くの人体との間に電位差が生じることはほとんどない。したがって、家庭内機器や水道管に起因する接触電流が流れることもほとんどない。(8 参考資料(P.60)参照)

(志賀 健、世森 啓之)

参考文献

3-1. 電気協同研究第31巻第5号「超高压架空送電線の静電誘導」(1975)

4

生物物理学的メカニズム

超低周波電磁界が人の健康に影響を与えると言うのであれば、どのような機構によるものかは研究されるべきである。生物の構成成分または構成細胞に何らかの侵襲があって、その結果がんが発生するとか、人の神経系に何らかの悪影響を与えて正常バランスを崩すとか、いかなるメカニズムによる健康影響なのか、最低限もっともらしい妥当な説明が必要であろう。

ある強度以上の電界については人への影響は明白で閾値も知られている。一方、磁界については過去30年余の間に少なくとも十数通りの仮説が提出されたが、非常に強い磁界は別として、日常生活で経験する程度の弱い磁界では生物に影響しそうにない。世界保健機関 (World Health Organization以下WHOと略記) 環境保健クライテリア (Environmental Health Criteria以下EHCと略記) 238第4章ではその内のいくつかについて妥当性を検討している。

4-1 直接的メカニズムについての考察

この章では、超低周波電界および磁界について提案されているいくつかの直接的および間接的な相互作用の生物物理学的な妥当性について考察する。

健康に害を及ぼすレベルの超低周波電界および磁界のばく露は、ヒトを形作る基本的な要素と相互作用すると考えられ、この相互作用は最終的にはヒトの健康に害を及ぼすような細胞レベルの効果を与えると推察される。極めて低いレベルの超低周波電界および磁界が健康に害を及ぼすとすると、そこにはなにかしらの相互作用のメカニズムが存在するはずである。逆に妥当な相互作用のメカニズムが存在しなければ、ばく露による健康への影響について証明することができない。

メカニズムの妥当性の度合いは、科学的な原理や現在の科学的な知見にどのくらい適合しているかに依存する。また、同定された信頼すべきメカニズムが無い場合でも、非常に弱いばく露レベルでの健康影響の可能性を排除することはできない。

直接作用のメカニズムについては、分子レベルの応答の度合いについてそれが関与する物理法則により計算することができ、「シグナル」対「ノイズ」比(S/N比)を用いて効果を表す。S/N比が1以上であれば、界に起因している事象の変化があると考えられ、生物に影響を与えている現象である可能性がある。つまり事象の変化がバックグラウンドのノイズ以上である場合、提案されたメカニズムは界が組織と相互作用し潜在的に病気を引き起こす能力がある妥当なメカニズムだと認められる。このメカニズムはその変化がランダムノイズよりかなり大きい時や、周波数特異的な感受性がある場合、より妥当なものとなる。

4-1-1 誘導電流

商用周波数の電界および磁界は、生体内に電界を誘導し電流を誘発する。外部電界は生体の内部で極端に減衰されるが、内部電界は生体の内部で電流を誘発する。磁界は電界を誘発し、次に導電性のある生体内に電流を誘導する。

しかしながら、低いレベルの電磁界で観察される事象はこのような物理現象で説明することは難しい。そこで、細胞レベルでの生物学および物理学原理に基づいたメカニズムがいくつか提案されている。細胞の誘電特性を考えた場合、内部へはほとんど電流が流れず、外部からの超低周波電磁界によって誘導される電流は、細胞の周囲を流れることになる。その結果、その形状や電荷・化学的状態の変化を誘起し、その変化の増幅により細胞内部の機能変化をもたらすものと推測されている。

電磁界によって誘導される電流は、その周波数に比例している。送電線などの場合は、瞬時的な高周波要素を含んでいる可能性が考えられる。また、電磁界による誘導電流が組織を加熱する(誘導電流の熱効果)ことが考えられるが、その温度変化は非常に小さいものであると推測される。

細胞を取り巻く環境でランダムに動いているイオンは、ブラウン運動^{用語4-1}によって電気的な雑音状態にある。電磁界と生体の間で相互作用が存在すると仮定した場合、熱由来の電氣的ノイズ^{用語4-2}以上の電界が必要である。この状態における細胞膜内での電氣的ノイズと、超低周波数からのシグナルとをどのようにに区別するかが問題になる。細胞膜内にはヒートノイズ (Johnson-Nyquist noise) ^{用語4-3}、ショットノイズ (Shot noise) ^{用語4-4}、および1/fノイズ^{用語4-5}の3種類の電気ノイズが存在する。

解説4-1 細胞への作用メカニズム

この超低周波電磁界による細胞への作用メカニズムについて図4-1に示す。

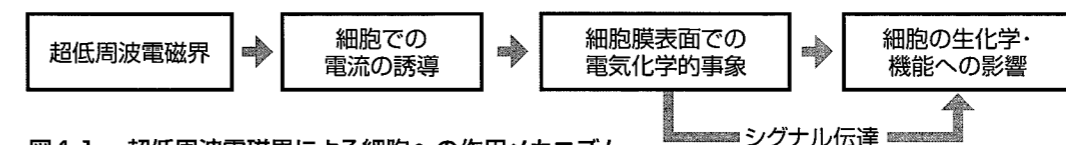


図4-1. 超低周波電磁界による細胞への作用メカニズム

超低周波電磁界のばく露により、最終的に人体に何らかの影響を及ぼすと仮定すると、図4-1で示したような段階を経ると考えられる。まず低周波電磁界のばく露により細胞での電流の誘導が起こる。次に電流が細胞膜と相互作用しシグナル伝達が起こり最終的に細胞の機能に影響を与えることになる。

4-1-2 その他の直接効果

電磁界の作用によって電離および化学結合の切断が誘発する可能性は、きわめて低いと考えられる。たとえば共有結合の切断には1~10エレクトロンボルト(eV)、水素結合の切断には0.1エレクトロンボルトのエネルギーが必要であるが、50ヘルツ(Hz)の電磁界のエネルギーは 10^{-12} エレクトロンボルトしかなく、これらの結合を切断するだけのエネルギーを有しない。したがって商用周波数の電磁界はDNAやタンパク質の化学結合を切断することができず、突然変異を直接誘発することはない。

電界、磁界ともに荷電粒子に対し力を与えることができる。生体内でみられる力の例として、内耳の有毛細胞(音の振動を感知する器官)の活動では1ピコ¹⁰ニュートン(pN)、細胞膜のイオンチャンネルを開閉するのに100ピコニュートンの力が必要であると推定されている。細胞膜で10億の分子を仮定した場合、外部電界で1ピコニュートンの力を発生させるためには 10^{10} ボルト毎メートル(V/m)の電位差が必要であり、磁界では10マイクロテスラ(μ T)の磁束密度が必要となる。(電磁波のエネルギーについては、8 参考資料(P.60)参照)

次に磁性粒子へ作用する力について考える。マグネタイト⁴⁻⁶は動物およびヒトの組織にごく少量であるが存在している。移動性の動物では地磁気⁴⁻⁷の微小な変化をマグネタイトで感知し、回遊に用いていることが知られている。ヒトの脳にもごく少量のマグネタイトが存在するが、このマグネタイトによりヒトが方向を見つけるのに役立っているという証拠は得られていない。また弱い地磁気を検知する能力も有していない。極端な仮説に基づく計算によると、超低周波電磁界のマグネタイトに及ぼす作用の下限値は5マイクロテスラであることが示唆されている。

静磁界および超低周波磁界により特定の化学作用に影響を及ぼす事例として、ラジカル・ペア・メカニズム⁴⁻⁸ (The radical pair mechanism) が挙げられる。1~2ミリテスラ(mT)より大きな実用磁界では、ラジカルの再結合反応の確率は増加するため、媒体の周囲に存在するラジカル数が減少する。一方、1ミリテスラ未満の磁界では、ラジカルの濃度は上昇するという報告がある。さらに生成したラジカル・ペアが影響をうける磁界が1ミリテスラ未満であること、また弱い磁界(地磁気に相当)が15~30%のラジカル再結合の収量を変える可能性を持つことなどが報告された。しかしながら、この領域での磁界に起因するラジカルの濃度または流量の変化では、細胞機能への生理学的影響や長期的な突然変異影響が生じうるとは考えにくい。また静磁界および超低周波磁界によって生じる変化が類似であることから、約50マイクロテスラの地磁気以下の商用周波数の磁界では大きな生物学的意味はないと考えられる。

また狭い帯域幅での生体効果のメカニズムとして「サイクロトロン共鳴」⁴⁻⁹、「ラーモアの歳差運動」⁴⁻¹⁰、「量子力学的共鳴現象」、および「確率共鳴現象」⁴⁻¹¹などが提唱されているが、一般的環境および職業環境でばく露する電磁界レベルでの相互作用についてどれも妥当な説明を提示しているとは認められるに至っていない。

なお電磁波のエネルギーについては8 参考資料(P.60)を参照。

4-2 間接的メカニズムについての考察

電磁界の間接影響として、接触電流⁴⁻¹²、宇宙線への電磁界の影響、そして送電線からの電磁界などが考えられる。

接触電流により、弱い電界(バックグラウンドのノイズ・レベル以上)が骨髄に誘導されるが、これらが健康へのリスク、たとえば発がん作用があるかどうかは不明である。また接触電流が各種疾病(小児白血病等)のリスクを高めるという疫学上の証拠もない。

宇宙線はヒトに悪影響を及ぼすことが知られており、送電線からの電磁界によって屈折、収斂され送電線

の付近では宇宙線の量が倍加するとの報告がある。しかし精密な測定によるとそのような増加は認められていない。また、架空送電線による電界が空気中の汚染物に作用し、人体への有害な作用を増加させる可能性が考えられた。空気中の汚染物としてはタバコの煙、ラドンの娘核種、化学汚染物、孢子、細菌、ウイルスなどがある。これらの有害物質が高圧送電線によるコロナ放電⁴⁻¹³(図4-2)の結果として荷電したイオンの雲により正および負に帯電し、呼吸器系や皮膚に沈着しやすくなり健康に有害な影響を及ぼす可能性があることが示唆されている。しかしながら、高いばく露を受ける個人を想定しても、仮に長期の健康リスクに対する影響があったとしてもコロナ・イオンは健康リスクの観点からは大きな影響はなさそうである。

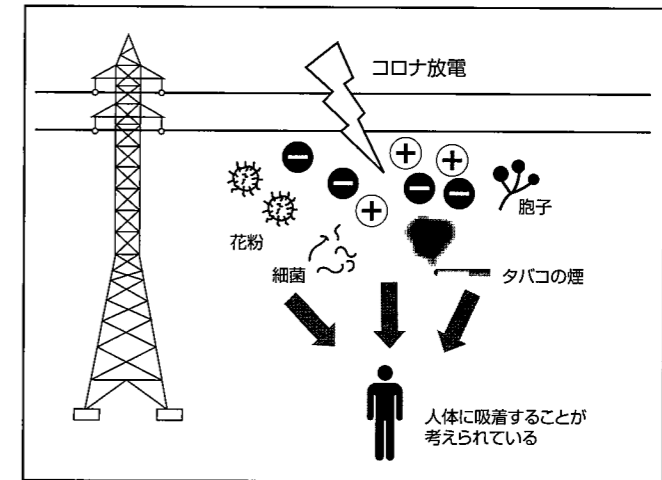


図4-2. 示唆された高圧送電線のコロナ放電による汚染物の帯電

上記で考察した直接的メカニズム(誘導電流、ラジカル・ペア・メカニズム対機構、マグネタイトなど)のいずれも、一般的に人々が遭遇するばく露レベルでは疾患発症率を上昇させる原因とはなりえない。事実、これらは数桁以上高いばく露レベルでのみ妥当性がある。また間接的メカニズムについてはまだ十分に研究されていない。妥当性のあるメカニズムが同定されていないことにより、有害な健康影響の可能性を排除することはできないが、生物学や疫学からのより強力な証拠の提示が必要を増すと考えられる。

解説4-2 磁気の生物作用

これまでに知られているおもな生体磁気現象の磁気強度と周波数の関係を図4-3にまとめて示す。

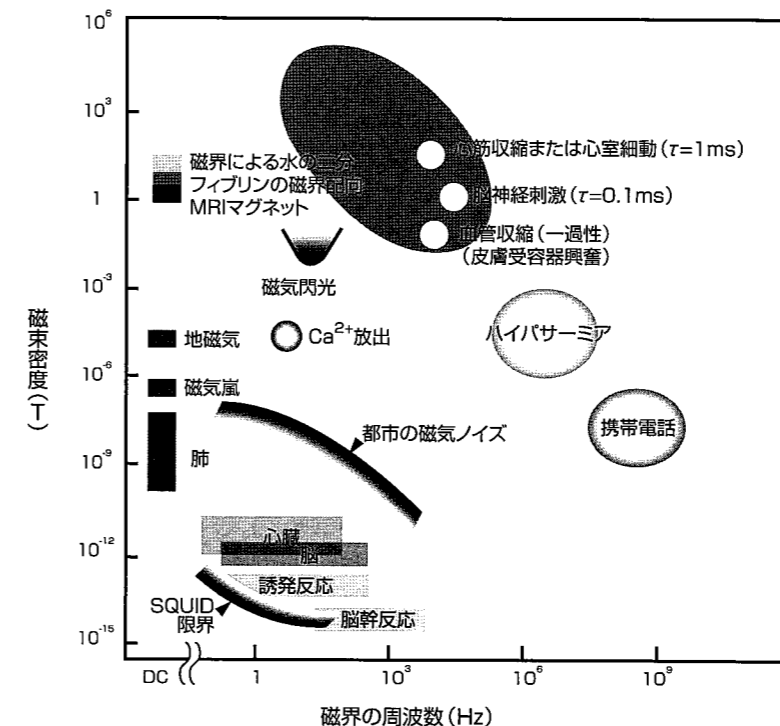


図4-3. さまざまな磁束密度および周波数における生体現象 (上野照剛: プラズマ・核融合学会誌 第75巻第1号 1999; 18-23)

表4-1. 細胞膜内に存在する電気ノイズ (バーンハーデン (Bernhardt 1997) より)

| | ノイズ源 | 特徴及び膜間における電位変化 | 組織でのしきい値強度 |
|-----|--------------------------------|--|-----------------|
| 4-3 | ヒートノイズ (Johnson-Nyquist noise) | 温度に関係し、生理学的温度では最大3μVの電圧を発生。 | 100 ~ 1000 mV/m |
| 4-4 | ショットノイズ (Shot noise) | イオン電荷及びキャリアの性質に依存。膜の電氣的ノイズの小さな発生源と考えられている。 | - |
| 4-5 | 1/f ノイズ | 膜チャンネルを通過するイオンの流れに起因し、約10μV程度の電圧変化を引き起こす。 | 100 ~ 1000 mV/m |

(清水 喜久雄)

用語解説

| | | |
|------|--------------|--|
| 4-1 | ブラウン運動 | 媒質中の微細な物体が、周囲の媒質の分子の熱運動による衝突を受けることによって起こす不規則な運動。細胞内でランダムに動いているイオンはこのブラウン運動によって電氣的な雑音状態にあるといえる。 |
| 4-2 | ノイズ | ノイズのそれぞれの特徴及び膜間で誘導される電圧上昇を表4-1に示す。 |
| 4-6 | マグネタイト | 磁鉄鉱。四三酸化鉄(Fe ₃ O ₄)や、それを多く含む天然鉱物をいう。移動性の動物では生体内に存在するマグネタイトと地磁気の相互作用によるトルクを生体が感知し方向を定めるメカニズムが存在している。 |
| 4-7 | 地磁気 | 地球の持つ磁気とそれによって生じる磁場の総称である。地磁気によりコンパスの針が南北を指し示す。地磁気の大きさは地域によって多少異なるが、日本では約50マイクロテスラである。 |
| 4-8 | ラジカルペア・メカニズム | 電子スピンの分極パターンに関する基本的なメカニズムであり、実用磁場による影響はラジカルにおける不対電子のスピンの相互作用に依存すると考えられている。ラジカルの濃度または流量は、磁界の変化によって変動する。原子や分子の軌道は、電子が2つずつ入ることで安定する。外殻軌道に位置する電子が対になっていないものを不対電子と呼ぶ。不対電子を持つラジカルは微小の磁石と見なすことができ、磁場による影響を受ける(磁性は電子の量子力学的な軌道運動やスピンによって生じる)。またラジカルは一つの分子もしくは二分子の分子間電子または水素原子の移動によって再結合を起こす。このラジカル対の生成と再結合は磁場と関係があり、化学反応の生成物の収率が磁場によって変化する。 |
| 4-9 | サイクロトロン共鳴説 | 生体内のイオンが膜を透過する際にサイクロトロン共鳴により磁界と結合し、膜透過性に変化が生じるという説でLiboffらにより提唱された。しかし物理的現象としてこのモデルを支持する根拠は現在のところ存在しない。 |
| 4-10 | ラーモアの歳差運動 | 磁場の中に置かれた原子核が外部磁場の方向を軸としてコマのような自転運動をする。これをラーモアの歳差運動と呼ぶ。 |
| 4-11 | 確率共鳴現象 | 適当な強さのノイズと弱い信号が非線形システムに入ってくるとき、ノイズが弱い信号入力を確率的に増幅し、かつその増幅率を最大にする最適ノイズ強度が存在するような現象。ノイズを利用して微弱な信号を検出することができる。 |
| 4-12 | 接触電流 | 機器に人体が接触した場合に流れる電流を接触電流といい、例えば家庭のバスタブの水栓に触れた際に生じる電流などをさす。一般的な接触電流は正常状態において0.25ミリアンペア(mA)というものであり、人体の特性に関する知見からこのレベルであれば正常状態においてはほとんどの人が電流を知覚せず有害な影響を生じないものとされている。 |
| 4-13 | コロナ放電 | 局所的に放射状の強い電界が存在する場合に現れる気中放電。高圧送電線では、電線表面の電位傾度が大きい箇所では絶縁破壊を起こして発生する。 |

5

超低周波電磁界と さまざまな疾患

世界保健機関(World Health Organization以下WHOと略記)の環境保健クライテリア(Environmental Health Criteria以下EHCと略記)238ではがん以外の疾患について次のように6つに大別して検討している:「神経行動」、「神経内分泌系」、「神経変性疾患」、「心血管系疾患」、「免疫学および血液学」、「生殖と発育」。本章では、超低周波電磁界が何らかの悪影響を及ぼすかもしれないと言われてきた疾患について、EHC238第5~10章のがん以外の多種多様な疾患について急性および慢性影響をまとめて次の順に紹介する。

- (1) 急性の電磁界ばく露の影響は人についてある限度までは実験可能であり閾値などもよく判っている、磁気閃光、皮膚異常感などがある。
- (2) いわゆる「電磁過敏症」という疾病については否定的である。
- (3) 最後に超低周波電磁界への長期間ばく露の健康影響については、過去の個人ばく露量を数値化することが困難なため疫学調査の信頼性に問題があるが、概して「影響ありとするには証拠不十分」とされている。

5-1 ヒトへの急性ばく露の影響

「神経行動」(EHC238第5章)では、超低周波電磁界の急性ばく露による直接作用がまず紹介されている。ヒトの感覚系の電磁界に対する反応はよく知られていて、その閾値(反応を起こしうる最低値)もヒトについてわかっている。低強度の超低周波電界は皮膚表面では体毛の動きやヒリヒリ感として感知される。一般に身体に不快感を起こさせる閾値は5~20キロボルト毎メートル(kV/m)であるが、個人差が大きい。EHC238では国際非電離放射線防護委員会¹¹ガイドラインを推奨している(解説5-1参照)。

この他、核磁気共鳴イメージング¹²、磁気パルス刺激などの医療・検査装置があるが、それぞれ関係学会の定める安全基準がある。なお、交流磁気パルスの視覚への影響は100年以上前(1896年)から「磁気閃光」として知られている、これは頭部に強い交流磁界パルス(たとえば20ヘルツ(Hz)、10ミリテスラ(mT))を与えると閃光を感じる現象である。

解説5-1 国際的なガイドライン

ICNIRPは1998年に一般の人々のための電磁界ばく露制限ガイドライン(参考レベル、表3-2参照)を提案した。その数値は短時間の電磁界ばく露によって即時的な健康影響を起こすばく露量を見定め、さらに安全係数を考慮したものである。ここで即時的な健康影響というのは、たとえば(a)末梢神経および筋肉の刺激、(b)導電性物体に触れることによって生じる感電および熱傷、(c)電磁界ばく露中のエネルギー吸収の結果生じる生体組織温度の上昇、などである。長期間のばく露に関してはまだ科学的結論が得られていないためこのガイドラインでは考慮されていない。

解説5-2 わが国の送電線規制

日本の架空送電線の電界規制値(送電線直下で3キロボルト毎メートル以下、表3-2参照)は2008年現在でも世界的にも厳しい基準である。これは1970年代に日本で50万ボルト送電線が作られた際に通産省の委員会(鳳委員会)で検討されて定められたものである。この時は実験送電線を作って電圧を変化させ、全委員が傘をさして送電線直下を通り抜けながら「頬に金属柄を当てて」体感し、大多数の委員が我慢できる程度の電圧を基準としたものである。ここで規制されたのは交流電界(50~60ヘルツ)であって、磁界は制限されなかった(P.23解説3-2参照)。最近の超低周波電磁界強度の測定結果(兜らの疫学)によれば、日本の家庭での磁界強度はアメリカ・カナダに比べてかなり低い。たとえば、平均ばく露量が0.4マイクロテスラ以上の家庭は(アメリカ)2.4%>(日本)1.2%>イギリス(0.37%)であった。これには3キロボルト毎メートルという送電線の厳しい電界規制が寄与している。

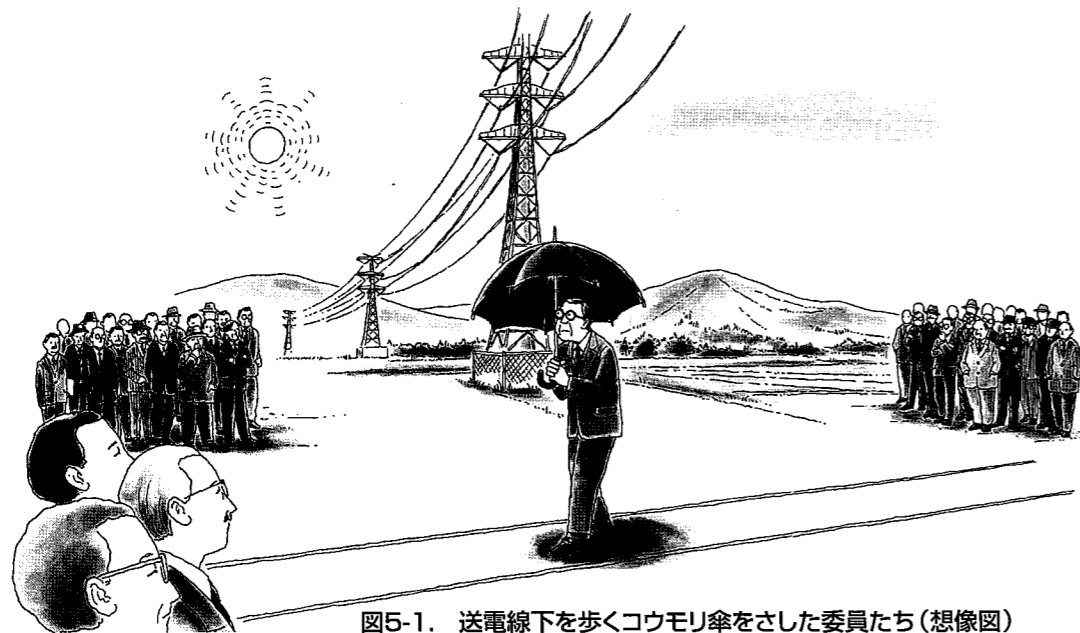


図5-1. 送電線下を歩くコウモリ傘をさした委員たち(想像図)

¹¹ 国際非電離放射線防護委員会(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP)

¹² 核磁気共鳴イメージング(Magnetic Resonance Imaging, MRI)

5-2 いわゆる「電磁過敏症」

「電磁過敏症」と称される状態がある。これは皮膚の異常、全身疲労、など一般的なさまざまな症状を訴えるもので、その原因の一つに超低周波電磁界があるとの説がある。さまざまな症状とは、たとえば不眠症、疲労感、集中力低下、めまい、眼精疲労、などで、時には皮膚症状(たとえば湿疹、かゆみ、灼熱感、など)もあり、化学物質などに対する過敏症を伴うこともある。反復していくつかの症状が現れるが、電磁界ばく露が直接原因かどうか必ずしも明確ではない。また、電磁界といっても超低周波数なのか、放送・通信用の高周波数なのか、必ずしも明確ではない。

「電磁過敏症」に関する過去の論文は正確なものが少ない。そこでWHOの国際電磁界プロジェクトでは2004年にシンポジウムを開催して検討した。その時点では、いわゆる「電磁過敏症」というのは特発性の(原因不明の)環境への非適応(idiopathic environmental intolerance, IHI)症候を呈し、主観的には電磁界ばく露が原因とされるものとの了解のもとで議論された。

最近の研究では、電磁界ばく露装置を作って「過敏症」者および健康人について二重マスク法¹³(被験者本人も検者もともにばく露・非ばく露の状態を知らないままで状態監視をする)により厳格に調べた論文がある、これらによれば「過敏症」者は必ずしも電磁界を感知できないし、また電磁界ばく露によって発症するとは言えないと結論されている。

したがって、EHC238第5章では、電磁界へのばく露が原因だという説を否定している。

その他、「神経行動」(EHC238第5章)の中では、超低周波電磁界へのばく露による影響として、主観的なものでは気分や集中力の変化、うつ病さらには自殺、客観的には他覚的な脳波や認知能力などの変化についての論文を検討している。いずれも電磁界の関与は証拠不十分と結論されている。

5-3 がん以外の慢性的な影響

電磁界に長年ばく露されていると何らかの神経系疾患・心血管系疾患などが起こらないか、と心配して様々な疫学調査・動物実験が行われた。EHC238第6章~第9章では成人の超低周波電磁界ばく露とがん以外の慢性疾患との関係が検討されている。以下その要点を紹介する。

5-3-1 神経内分泌系

「神経内分泌系」(EHC238第6章)については、たとえば電磁界ばく露と松果体メラトニン分泌との関係についてさまざまな研究が行われた。しかし、超低周波電磁界へのばく露がヒトに有害であるとの結論は出ていない。したがって、さらなる研究は不要とされている。

メラトニンは脳内の松果体から分泌されるホルモンであり日周リズム(昼夜リズム)に関係する。その分泌量は網膜に入る光によって調節されるため、夜間に分泌量が増し全身の内分泌系に影響を与える。ネズミを用いた実験では超低周波電磁界にばく露するとメラトニン分泌が減少するとの研究がある。もしヒトでもこのようなことがあれば内分泌系の何らかの異常が起こり得ると考えられて、さまざまなボランティア実験や疫学調査が行われた。しかし、ヒトに有害であるとの明白な証拠は得られなかった。

5-3-2 神経変性疾患

「神経変性疾患」(EHC238第7章)について、超低周波電磁界ばく露がALS¹³などの神経変性疾患を発症させる可能性について、長期間の職業的ばく露といくつかの神経変性疾患の関係についての疫学調査が検討された。すなわち超低周波電磁界へのばく露量の多い職業の人達に神経変性疾患が多発していないかどうか検討された。

アルツハイマー病、パーキンソン病、多発性硬化症などについては超低周波電磁界ばく露との関連は見

¹³ 筋萎縮性側索硬化症(amyotrophic lateral sclerosis, ALS)

出されなかった。こうした疾患の中でALSについては、電気関係の職業人に発症がやや多いという論文があるが、まだ明確な結論が得られていない。

成人の慢性疾患についての疫学調査では、超低周波電磁界への長期間のばく露量推定が困難であるという欠点がある。そこで通常はその人の過去の職業からばく露量を見積もっている。したがって、神経変性疾患に関する今後の正確な調査としては個人モニタリングを行いながら、大規模な前向きコホート疫学^{用語5-3}研究を行う必要がある。

5-3-3 心臓血管系疾患

「心臓血管系疾患」(EHC238第8章)については、環境または職業的に通常遭遇するばく露レベルでは超低周波電磁界によって心臓血管系疾患は起こらないと言い切っている。

急性影響の研究としては、ボランティアについて実験室内でばく露して脈拍数とその変動、血圧の変化などについての研究があるが、影響は見られなかった。また、長期間ばく露の影響を調べた疫学研究では、超低周波電磁界ばく露と心臓血管系疾患との間に関連は見られなかった。

5-3-4 血液系や免疫系

「血液系や免疫系」(EHC238第9章)については、免疫系の構成要素特にリンパ球などの白血球系細胞を用いた超低周波電磁界の影響については細胞学研究が多い。しかし、その結果は一貫性に欠けている。特に発育中の小児については研究例が乏しい。したがってEHC238では動物実験、とくに未成熟動物についての今後の研究を待ちたいとしている。

5-3-5 生殖と発育

「生殖と発育」(EHC238第10章)については、今までの疫学調査では超低周波電磁界の悪影響は証明されていない。また、動物実験でも有害な影響は見出されていない。全体として、生殖・発育・成長に対して悪影響ありとするには証拠不十分であると結論している。

(志賀 健)

用語解説

| | | |
|-----|---|---|
| 5-1 | 二重マスキング法 (double blind test) | 被験者に数段階のばく露負荷を与え、験者がその影響を観測するとき、被験者も検者ともに現在の負荷値を知らされていない。こうすることによって被験者および検者の心理的効果を除く意味がある。なお、電磁界ばく露装置の製作にあたって、通電時に被験者に感じられる雑音、振動、熱などが発生しないようにする必要がある。 |
| 5-2 | 筋萎縮性側索硬化症 (amyotrophic lateral sclerosis, ALS) | 運動神経細胞の変性を起こす原因不明の慢性疾患の1つで、多くは中年以降に筋力低下、筋萎縮などが進行する。遺伝性の病型もある。有病率は10万人あたり5人程度である。 |
| 5-3 | 前向きコホート疫学 (prospective cohort study) | ある集団、たとえば地域住民全部、について各個人の特定要因へのばく露量を測り、あと一定期間にわたって全員の追跡調査をする、その間に起った特定疾患の発生状況を調べる。その中でばく露量の多い群の疾患発生率と無ばく露ないし軽ばく露群での発生率とを比較する。コホート研究は費用も人数も時間もかかるが、疫学としては症例-対照研究よりも正確な結論が得られる。超低周波電磁界に関する疫学調査は症例対照研究しかに行われていない。これは患者群と対応する対照(健康)群のそれぞれについて、各個人のばく露量を測り、高ばく露者群での疾患発生率と低(～無)ばく露者群での発生率を比較する。短期間で調査可能であるが、情報の偏り(たとえば対照群の設定)によるエラーがおこりやすい。(詳細は次章、p42以下参照) |
| | 後ろ向きコホート疫学 (case-control study) | ある集団で各個人の過去ばく露量が推定可能なとき、現状から遡って解析するものである。広義に言えば症例-対照研究も含まれる。 |

6

超低周波電磁界とがん

環境保健クライテリア(Environmental Health Criteria以下EHCと略記)238第11章では、超低周波磁界とがんの関係、特に小児白血病、を論じている。しかし、白血病そのものについて解説がない。その欠点を補うため、この章の冒頭には白血病の解説を加えた。今日では小児の急性リンパ性白血病の80～90%は化学療法などによって治療する、したがって死亡統計を調べても研究にならず、発病統計を調べなければ病因を議論できない。また、胎児期に既に「前白血病」幹細胞が存在していること、およびこの細胞を持っていても後に必ず白血病を起こすものではないこと、がわかってきた。

次いでEHC238第11章の記載順に、超低周波磁界ばく露と小児白血病に関する疫学研究、さらに成人がんに関する疫学研究を紹介した。最後に、疫学から何が言えるか、特にある要因と疾患との間の因果関係にどこまで立ち入ることができるか解説した。

「生後数年間の極めて微弱な超低周波磁界ばく露が小児白血病の発生率を高める。」という命題は、過去30年ほど関係者を悩ませてきたが、世界各国で行われた多岐にわたる研究をまとめるとどうなるか。現時点では依然として「小児白血病の発生について超低周波磁界はその原因の1つであるかもしれない。しかし動物実験や細胞学実験の裏付けがなく、原因だとする証拠は不十分である。」というのが結論である。

6-1 白血病とは

血液は液性の成分である血漿と細胞成分である赤血球、白血球、および血小板からなる。これらの細胞は骨髄の中にある血液幹細胞が増殖、分化して産生されるもので、このような成熟した細胞となった段階で初めて血液中に出てくる。そのうち白血球はリンパ球（さらにT細胞、B細胞、およびナチュラルキラー（NK）細胞に分類される）と骨髄系細胞に分類される。白血病とは白血球が幹細胞から分化してくる段階のどこかでがん化して生じる。小児の場合、がん化する細胞はほとんどが分化段階の早期のものであり、がん化した細胞は、その段階で分化が停止し、未熟な状態のまま無制限に増殖する。増殖の主たる場は骨髄であり病気が進行すると、次第に白血病細胞は血管内やからだの至る所に浸潤していき、治療をしなければ数ヶ月以内に確実に死に至る疾患である。小児白血病はがん化する白血球の種類により大きく急性リンパ性白血病（ALL）と急性骨髄性白血病（AML）に分類され、それぞれ分化の途中のリンパ球、骨髄系細胞ががん化して生じたものである。これまでの治療の進歩により、現在ではALLの80～90%、AMLの70～80%が治癒する。本章では小児白血病の疫学と病因について概説する。

6-1-1 小児白血病の発生頻度

白血病は小児がんの中では最も頻度が高く、小児がん全体の約3分の1を占める。次に多い小児がんは脳腫瘍であり、両者で小児がんの約半分を占める。小児白血病の約75%はALLであり、残りはほとんどがAMLである。

小児白血病の発生頻度は概ね一定であり、小児人口10万人あたり毎年3～4人の発生がある。大阪府地域がん登録によれば年間約40人が発症している（大阪府の小児人口は現在約120万人）。小児白血病の発生頻度は人種や地域によって差が認められている。ALLは北アフリカや中東では比較的稀であり、インドや中国ではそれらの地域より多いが、先進諸国よりは少ない。一方、AMLは中国、インド、フィリピンなどのアジア諸国に多く、白血病の半分近くを占める。これらの地域差は診断技術や登録の精度の差による可能性も否定できないが、人種による遺伝的差異、環境因子が関与している可能性が考えられている。米国内における人種差では、リンパ性白血病は白人に多いのに対し、骨髄性白血病はアフリカ系アメリカ人に多い。骨髄性白血病はヒスパニックに最も多い。男女差では骨髄性白血病では認められないのに対し、リンパ性白血病では男児の方に多い。

年齢による発生頻度では、骨髄性白血病がどの小児年齢でも大きな差がないのに対し、リンパ性白血病では発生のピークは2～4歳にある。しかし、このピークは産業化に伴って現れてきたもので、イギリスでは1920年代に、米国では1940年代、日本では1960年代に見られるようになったが、発展途上国では未だ明らかではない。このピークは米国内ではアフリカ系アメリカ人では白人ほど顕著ではない。これに対する説明として、産業化に伴う白血病を引き起こす因子の増加、あるいは衛生環境が向上し病原体にさらされにくくなったことによる免疫力の低下（いわゆる衛生仮説）が考えられている。

白血病は特殊なものを除いて遺伝性は認められないが、白血病患児の家族内での発生頻度は一般より高く、患児の兄弟の発生頻度は2～4倍高率である。また、一卵性双生児であった場合はさらに高く、一方が白血病を発症した場合には25%の兄弟が白血病を発症する。しかし、年齢とともに発症の危険性は低下し、7歳以降には発症頻度は一般と変わらなくなる。このことは遺伝的背景（体質）、環境因子などが白血病の発症に関与していることを伺わせるが、一部では胎生期に胎盤を通じて一方で生じた白血病が他方に転移することで生じている。

6-1-2 小児白血病の病因

発がんのメカニズム

白血病に限らず、がんの発生には細胞の生存や増殖を制御している遺伝子の異常が生じることが必要である。細胞は何らかの異常を来した場合は、自殺遺伝子が働いて死に至る。一方、増殖が必要な場合は細胞外

から増殖に必要な刺激物質による信号が受容体から細胞内に伝わり、細胞内でその信号が伝達され最終的には細胞核に到達して遺伝子（DNA）の複製が行われ細胞は2個に分裂する。このような増殖の過程には暴走が起きないようにさまざまなチェックシステムが存在し、信号が強すぎたり、またいつまでも信号が入り続けることのないようにシグナルを負に制御するいくつかの制御系がある。さらに細胞が分裂する時にもそれをチェックするための閾門が設けられている。

一般的にがんは増殖信号が過剰に入りすぎるような遺伝子の異常が生じ、それに加えてそれらを抑制する制御機構や自殺遺伝子からの信号系、また、分裂のチェック機構などの異常が重なって初めて発生する。また、これらの原因となる遺伝子の異常は、増殖に伴う遺伝子の複製の時のエラーのほか、放射線や紫外線、発がん物質などによる遺伝子の損傷などによって生じる。このような損傷は日常的に生じ、しかも小さな損傷は細胞に備わっている修復機構によって修復されるが、このような損傷が偶然に発がんに関与する遺伝子に生じ、しかも修復されなかった場合に発がんに至る。このような遺伝子の損傷は年齢を重ねるほど積み重なっていくので高齢になるほどがんになりやすいことになる。

一方、小児期に発生するがん（白血病も含めて）はDNAの複製エラーなど細胞増殖の時に生じる異常が主たる原因となっている。すなわち、受精卵という1個の細胞から1人の人間となるまでに限りない回数増殖を行うことになり、DNAの複製エラーが生じる危険性が常に存在する。

白血病では前述したように、分化途中の白血球に上記のような遺伝子異常を生じ、発病に至る。リンパ性白血病では血液幹細胞からリンパ球系の細胞に分化した段階でこのような異常が生じる。一方、骨髄性白血病では血液幹細胞またはそれに近い細胞に異常が生じ、白血病に至ると考えられている。このような細胞を白血病幹細胞と呼び、これらの細胞は分裂しながら多くの細胞を生み出し、症状を呈することになる。発症後は体内に何億と存在する白血球のうち白血病幹細胞の割合は低い。したがって、元となる幹細胞のみを根絶すれば白血病は容易に治癒させることができる。しかし、血液幹細胞は極めて大切な細胞であるため、種々の薬剤などで障害を受けにくい性質を有しており、白血病幹細胞も同様の性質を持つ。そのため、現在のところ、正常な血液幹細胞に障害を与えず、白血病幹細胞にのみを根絶する有効な手段は同種骨髄移植以外には見出されていない。

小児白血病では、細胞分裂時に染色体（遺伝子を規定しているDNAが折り畳まれたものでひとつの細胞に23本存在する）が複製され、それぞれの細胞に分かれていくが、その時にある染色体が他の染色体と結合して生じる染色体転座が原因であることが多い。具体的にはリンパ性白血病では12番と21番の染色体が結合する転座、骨髄性白血病では8番と21番によるものが最も多い。これらの染色体が結合することにより、それぞれの染色体上に存在する遺伝子が合わさり、新たな機能を発揮するようになる。しかし、これだけの異常では白血病を発症することはなく、前がん状態と呼ばれる状況にとどまり、さらに別の遺伝子異常が加わった時に初めて白血病が発症する。

小児白血病を発症した子どもの出生時に採取保存されていた血液を調べると、白血病細胞と同一の染色体の異常を有する細胞が高頻度に見つかる。このことは既に胎生期に前がん状態にある細胞が出現していることを示している。さらに、健常児の出生時の血液中には100人から1,000人に1人の割合で、白血病に特徴的な遺伝子異常を有する細胞が存在する。このような新生児が成長の過程で、さらなる遺伝子の異常が生じた時に白血病を発症すると想像される。

発症に寄与する要因

白血病の発症と放射線との関連が言われてきた。広島、長崎での被爆者の研究ではある一定以上の被ばくを受けた場合は受けた被ばく線量に比例して発生頻度が増えると報告されている。小児と成人ではそれぞれリンパ性白血病と骨髄性白血病が多いといった特徴がある。しかし、胎生期に被曝した場合は、その発生頻度の上昇は認められていない。胎生期と出生後の医療目的での放射線被曝による影響については一定の見解が得られておらず、たとえそれによる発生頻度の上昇があったとしてもその割合は極めてわずかと考えられている。

電磁界へのばく露が小児白血病の要因となるとの報告が以前に行われ、以来議論が続いてきた。しかし、最近の報告ではその関連を否定するものが多く、現在ではその関与はないか、あるいはあってもわずかなものであると考えられている。

胎児期の化学物質の影響については、母親の喫煙、飲酒と出生後の骨髄性白血病発症との関連が示されている。また、石油製品、ベンゼン、除草剤、殺虫剤などの化学製品も骨髄性白血病の発症要因となる。乳児期に発症する白血病と妊婦のトポイソメラーゼⅡ阻害物質を含む食品、たとえばハーブ茶、フラボノイドなどの過剰摂取との相関を示唆する報告もある。一方、リンパ性白血病とこれらの因子との直接的な相関を示したものはない。リンパ性白血病の発症と除草剤、殺虫剤、母親の飲酒、避妊薬や女性ホルモン製剤の服用、ラドンによる被曝、化学物質による地下水汚染などとの関連の可能性が示されているが、異論も多く、たとえ関係があってもそれらの寄与はわずかと考えられている。

解説6-1 EMFばく露と発がん作用原との相互作用

EHC238(第11章)には電離放射線との相互作用についての記載がある。すなわち、EMFが発がんの促進(promotion)作用があるかどうかを調べた研究において、化学物質、電離放射線、紫外線との組み合わせが検討された。また肝臓がん、白血病/リンパ腫、乳がん、皮膚がんの前がん状態からがんへ進行するのにEMFが作用するかどうかを調べた。

- a. 肝臓の前がん損傷を調べた研究は2件あるが、いずれもEMFには促進作用がないとの結論であった。
- b. 白血病/リンパ腫については、マウスの化学物質による発がん実験へのEMFの促進作用の研究がある。その結果は肥大した脾臓や単核球数の著しい増加がみられ、白血病の発生に関係があるかもしれないことが示唆された。一方、X線誘発甲状腺がんではEMFには促進作用がない、またX線で確実に増大するリンパ腫は50ヘルツ(Hz)の磁場では増えないなどの報告がある。これらのほか、1997年から2000年にかけての4報の研究でもEMF単独、あるいは化学物質による発がんの増大はみられなかった。
- c. 複合遺伝毒性に関して、EMFとDNAあるいは染色体に障害を与える作用原との複合遺伝毒性効果を調べた5編の論文について、IARC¹⁴は2002年に検討し、EMFが効果を増大すると記述した。しかしながら、その後報告された11編の論文はいずれもEMFが他の発がん原の作用を促進することは示されなかった。全体的な結論としては、2002年のIARCモノグラフ以後に発表されたヒト、動物および細胞レベルの研究は、これまでの分類である「ELFは発がん性があるかもしれない」との結論を変えるものではない。

6-2 超低周波磁界ばく露と小児白血病に関する疫学研究

6-2-1 IARC報告書(2002)までの知見の評価の要約

住居における超低周波磁界ばく露と小児白血病との関連について多数の研究がなされてきた。これまでに2つのプール解析⁶⁻¹がなされ(オールボムらAhlbom et al., 2000; グリーンランドらGreenland et al., 2000)、それぞれ0.4マイクロテスラ(μ T)と0.3マイクロテスラを超えるばく露量で相対リスクが2.0と1.7と有意な上昇がみられた。このように、一致した関連性が報告されているが、データの元になる研究の多くが症例-対照研究⁶⁻²という方法を用いており、「選択のバイアス」、「交絡因子」、および「偶然」によりこのような関連性が部分的に説明できる可能性がある。

以上より、超低周波磁界ばく露と小児白血病の関連については、人を対象とした研究において限定的な証拠があると言える。しかし、超低周波磁界ばく露とその他のがんの関連についての証拠は不十分である。静電磁界ばく露あるいは超低周波磁界ばく露と人におけるがんとの関連についても証拠は不十分である。超低周波磁界の実験動物における発がんについても証拠は不十分である。以上より、超低周波磁界はグループ2B(発がん性があるかもしれない)に分類される。また電界はグループ3(発がん性を分類できない)に分類される。

6-2-2 IARC(2002)以後の疫学研究

IARCの電磁界ばく露の発がん影響に関する評価(2002)の後、結果が公表された日本と英国の研究結果の評価を行っている。

兜ら(2006)は、日本における0~15歳人口2,000万人の53.5%をカバーする18都道府県において1999~2002年にALLおよびAMLと診断された人を症例群として、それぞれの症例について1~3人の性、年齢、居住地域をマッチさせた人を対照群として、症例-対照研究を行った。超低周波磁界ばく露については、対象者が1日の最も多くの時間を過ごす部屋で行った。781人の症例に研究への協力を要請し、そのうち381人(参加率49%)が参加を承諾した。転居あるいはばく露レベルの測定ができなかったことを理由として69人が除外され、最終的には312人(ALL251人、AML61人)が解析対象となった。対照群は3,833人の候補者の中から1,097人(参加率28.6%)が参加を承諾した。そのうち調査が完全に行われた603人(ALLの対照495人、AMLの対照108人)が解析対象となった。白血病全体について、0.4マイクロテスラ以上ばく露群では0.1マイクロテスラ未満群にくらべてオッズ比が2.63(95%信頼区間0.77~8.96)であった。このオッズ比は、父母の学歴を調整してもあまり結果に変化がないことが確かめられている。ALLのみに限った解析では、0.4マイクロテスラ以上ばく露群の0.1マイクロテスラ未満群にくらべてのオッズ比が4.73(95%CI 1.14~19.7)であった。兜らの研究結果は、対象者数が少ないために不確実なものではあるが、IARCのプール解析の結果とよく一致している。参加率の低いことがこの研究のlimitation(制約)であり、この研究結果をデータベースに加えても全体の結果はあまり影響されないであろうとEHC238("Extremely Low Frequency Fields", EHC238)本文では述べられている(この項は、EHC238原文に加えて兜ら(2006)の原著論文により情報を補った)。

Draperら(2005)は、英国のさまざまながん登録の記録の中から1962~1995年の間に0~14歳でがんと診断された症例33,000例を同定した。1症例につき、性、出生年、出生地域をマッチさせた1例の対照を選び出した。最終的に解析に用いたのは、出生地域が高圧送電線から1km以内の9,700の小児白血病の症例-対照ペアであった。結果としては、高圧送電線からの距離に依存した小児白血病の相対リスクが観察された(500~599mで1.36、0~49mで1.67)。この研究は、対象人数が多い点と、低参加率というような選択のバイアスが避けられている点が長所としてあげられる。しかし、距離のみでは超低周波磁界ばく露の良い指標にはならないことも指摘されているので、超低周波磁界ばく露レベルの推定に基づきリスクを計算し直せば、より有用な情報が得られることが期待できるとEHC238では述べられている。

6-2-3 疫学研究結果の解釈において考慮すべき事項

超低周波磁界ばく露と小児白血病との間に一致してみられている関連については、偶然、選択のバイアス、誤分類、および交絡要因の影響によるもの、または真の関連の可能性が考えられる。

偶然の影響

対象者数が少ないと偶然的にランダム・エラーにより関連がみられる可能性がある。しかし、プール解析においては十分な人数について解析しているためこのような偶然が影響した可能性は小さいと考えられる。

選択のバイアスの影響

症例-対照研究においては、症例、対照、ともに参加率が低い場合が多く、選択バイアスの原因となりうる。プール解析を行った症例-対照研究の中で、ばく露レベルの測定を行っている研究では参加率が低く、このバイアスが関連の一部を説明できる可能性がある。しかし、登録事業を利用した研究においては94~100%の高い参加率を得ることができ有利である。オールボムAhlbomらのプール解析に用いられたノルディック諸国の研究は超低周波磁界ばく露の記録に基づく研究であり選択のバイアスの影響は受けないと考えられる。

誤分類の影響

超低周波磁界ばく露の推定は困難を伴うものなので、対象者を低ばく露、高ばく露群に分類する際に誤分類をひきおこしやすい。このような誤分類は一般的には関連を弱める方向に働くと考えられるため、プール解析でみられた関連を誤分類で説明することはできない。

¹⁴ 国際がん研究機関(International Agency for Research on Cancer, IARC)

交絡要因の影響

交絡要因としては、社会経済状態 (SES)、転居が多いこと、住宅のタイプ、ウイルスとの接触、環境タバコ煙、食事内容、交通量などが考えられる。しかし小児白血病の病因として確立した要因がないため、上述のような要因が交絡要因になっているという確証はない。オールボム Ahlbomらのプール解析では、これらの交絡要因の影響を検討しているが、関連のせいぜい2%程度しか説明できないという結果であった。

6-3 超低周波磁界ばく露と成人のがんに関する疫学研究

6-3-1 超低周波磁界ばく露と乳がん

IARC (2002) のモノグラフ発行以降、住居における超低周波磁界ばく露と乳がんリスクとの関連についていくつかの報告がなされた。いずれも、がん登録やコホート研究において掌握されたがんの症例を対象にした症例-対照研究デザインであるため、症例に関するバイアスは少ない。米国で行われた3つの研究では超低周波磁界ばく露と乳がんリスクとの間に有意な関連はみられなかった。ノルウェーの研究では、0.05~0.19マイクロテスラおよび0.2マイクロテスラ以上ばく露群ともに乳がんリスクとの有意な関連がみられた。しかし住居におけるばく露と職業的ばく露とを合わせたばく露量と乳がんリスクとの間では、対象者数が少ないが有意な関連はみられなかった。なおEHC238本文では、このノルウェーの研究については第1子出生時の年齢、学歴、住居のタイプなどの交絡因子となる可能性のある要因についての考慮が十分でないことが指摘されている。

また、電気毛布使用と乳がんリスクについて、いくつかの症例-対照研究が行われているが、有意な関連がみられたのはZhuら (2003) の研究のみで、この研究については参加率が低いことが問題点として指摘されている。

職業的な超低周波磁界ばく露と乳がんリスクについて、主に女性の乳がんについて近年いくつかの症例-対照研究の報告がある。米国ノースカロライナ州のがん登録を利用した研究では、0.59~0.90マイクロテスラばく露でオッズ比1.4と有意な高値となっているが、0.90マイクロテスラ以上のレベルではオッズ比は1.0~1.2で有意な上昇はみられていない。モンリオールにおけるがん登録を利用した研究では、10年以上の潜伏期間を有する症例および35歳までにばく露した症例についてオッズ比がそれぞれ1.2および1.4と有意な上昇を認めているが、EHC238本文ではばく露レベルの評価が職業に基づく粗い推定値であることを問題点として指摘している。

スウェーデンで最近行われた研究は、規模が大きく、またばく露評価を厳密に行ったものであるが、超低周波磁界ばく露と乳がんリスクとの関連はみられていない。

6-3-2 超低周波磁界ばく露と白血病、脳腫瘍、およびその他のがん

IARCモノグラフの後、電気毛布およびその他の電気器具使用と血液系腫瘍および脳腫瘍のリスクとの関連についていくつかの症例-対照研究の報告がなされた。クライナーマン (Kleinerman) ら (2005) の報告では、ドライヤーの使用と男女 (あるいは男のみ) のグリオーマの発症リスクとの間に有意な関連 (オッズ比1.7, 95%CI 1.1~2.7) がみられた。また男性のドライヤー使用と髄膜腫の発症リスクとの間に有意な関連がみられ、使用年数が長いほどオッズ比が高くなっていった。しかし、その他の報告では電気器具使用と白血病あるいは脳腫瘍の発症リスクとの関連については否定的な結果がほとんどであった。

職業的超低周波磁界ばく露と白血病および脳腫瘍リスクとの関連については、ネーバス・エシエン (Navas-Acien) ら (2002) がスウェーデンのコホート研究において、0.13~0.20マイクロテスラおよび0.20~0.30マイクロテスラばく露とグリオーマのリスクとの間に有意な関連を観察しているが、オッズ比は1.1から1.2と低く、>0.30マイクロテスラばく露では有意な関連はみられなかった。また髄膜種については有意な関連はみられなかった。フィンランドのコホート研究においても、職業的超低周波磁界ばく露と脳・神経系腫瘍のリスクとの間に有意な関連は観察されなかった。症例-対照研究デザインで職業的超低周波磁界ばく露と白血病および脳腫瘍リスクとの関連を調べた報告も、IARCモノグラフ以降いくつか存

在している。ニュージーランドからの報告では、超低周波磁界へのばく露レベルが最も高い群において白血病リスクとの有意な関連がみられている。EHC238本文では、ばく露レベル評価が過去の研究結果に基づいていることを問題点として指摘している。その他の報告では、いずれも職業的超低周波磁界ばく露と白血病および脳・神経系腫瘍リスクとの間には有意な結果は得られていない。

その他の成人のがんと超低周波磁界ばく露との関連についても、IARCのモノグラフ以降いくつか報告がなされているが、関連がみられないか、関連がみられても1つの報告にとどまるものばかりというのが現状である。

6-4 超低周波磁界ばく露とがんリスクに関する疫学的知見のまとめ

IARCが超低周波磁界を発がん物質分類のグループ2Bに分類したのには、小児白血病に関する疫学研究でみられた関連が大きく影響している。限定された証拠に基づくIARCの分類は、今回の2つの小児白血病に関する疫学研究結果を含めても変わりはない。IARCのモノグラフ以降も、小児の他のがんとの関連に関しては不十分な証拠しかみられない。

IARCのモノグラフ以降、超低周波磁界ばく露と女性の乳がんリスクとの関連について多くの報告がなされた。大規模でバイアスの少ない最近の研究結果により、この関連に関する証拠はかなり弱いものとなった。

大人の脳腫瘍および白血病に関しては、IARC以降の研究結果はIARCの結論を変えるようなものは見られていない。

解説6-2 疫学から見た因果関係の判断

表6-1に掲げたように、疫学的知見から、ある要因と疾患との因果関係を判断する基準として5つの条件があげられている (米国公衆衛生局長官報告書, 1964)。そこで、超低周波磁界と小児白血病の関係についてこの条件に照らして因果関係について考えてみることにする。

関連の強固性については、オッズ比および量反応関係がそのよい指標となる。オッズ比はプール解析においてせいぜい2.0くらいである。したがって関連は決して強いものではないと言える。またプール解析においても関連がみられているのは最もばく露レベルの高い群のみで明らかな量反応関係はみられておらず、この点でも強固性はそれほど強いものではないといえる。

関連の一致性については、これまでのいくつかの報告で高ばく露群では同様の関連がみられていること、2つのプール解析において同様の結論が出されていることなどから、ある程度の一致性は見られると言える。しかし関連なしとする症例-対照研究の結果も複数あることから一致性は強いものではないと考えられる。

関連の特異性に関しては、小児白血病に関連する要因として、家族歴、出生前後の放射線ばく露、先天異常などが報告されている。これらにくらべて超低周波磁界ばく露が発症要因として特に大きな比重を占めるとは考えにくく、特異性が高いということは考えにくい。

表6-1. 疫学的因果関係の条件

| 判断基準となる項目 | 内容 |
|-----------|---|
| 関連の強固性 | 要因と結果の関連の指標となるオッズ比や相対リスクなどの値が大きいこと、あるいは量反応関係がみられること |
| 関連の一致性 | 複数の異なる研究において同じような関連性が観察されていること |
| 関連の特異性 | 要因と結果が特異的な関係にあること |
| 関連の時間性 | 要因が時間的に先行し、その後に結果がおきていること |
| 関連の整合性 | 要因による結果 (疾患) の発生の機序について、生物学的に説明できること |

EHC238では、特異性に関連して、巻末注 (Appendix) において寄与割合 (attributable fraction) に関する推定を行っている。寄与割合とは、ある集団において発生した特定の疾患のうちで、ある1つの要因で説明できる部分の割合をいう。ここでは、発生した小児白血病のうちで超低周波磁界ばく露による部分

の割合を推定している。Appendixの表A.1において、日本では>0.4マイクロテスラを超える高ばく露群の割合が患者群で1.92%であったことを推定している。また、プール解析で得られたオッズ比をバイアス等で補正してオッズ比2.7という値を採用している。これらの仮定により寄与割合は表A.4にあるように1.5~3.2%と推定されている。他の国の推定値もそれほど大きく異なるものはなく、多くの推定値は0.5~5.0%の範囲となっている。そもそもこの推定値は因果関係がある場合にのみ意味を持ちうるものではあるが、仮に因果関係ありとしても、集団における小児白血病の発生の中のごく一部を占めるにすぎないことを示しているという意味で参考になる数字ではある。やはり特異性は高くないと考えてよいと思われる。

関連の時間性については、超低周波磁界ばく露と小児白血病の関係については研究の多くが症例-対照研究である。実際に住居におけるばく露レベルを測定している研究についてはばく露レベルは正確に測定できるものの、現在のばく露レベルが過去のばく露レベルと同じであるという保証はないため、時間性についてはやや弱い。がん登録を利用し、住居の送電線からの距離等の情報よりばく露レベルを計算した研究については過去のばく露レベルの推定の精度にかかっていると言える。

最後に、関連の整合性についてであるが、超低周波磁界と小児白血病の関係に関しては、この点が最も問題になると思われる。現在まで、低レベルの超低周波磁界ばく露がどのようなメカニズムで小児白血病を発生させるのか、生物学的に説明するモデルは全く見あたらない。実験動物においても低レベルの超低周波磁界が単独でがんを発生させるという結果は全く観察されていない。この点が今後に残された最も大きな課題である。

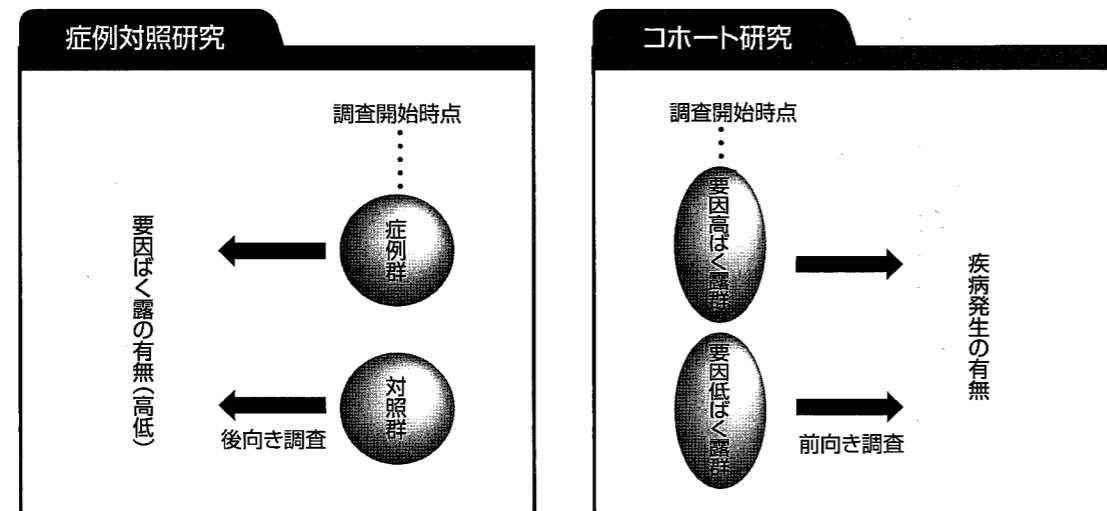


図6-1. 症例対照研究とコホート研究の研究デザイン

(原 純一、武部 啓、竹下 達也)

用語解説

| | | |
|-----|---------|--|
| 6-1 | プール解析 | 過去に行われた複数の研究の対象者1人1人のデータを合わせて大人数について関連の有無を検討する方法である。超低周波磁界と小児白血病のように個々の研究の高ばく露群の対象者数が少ない場合でも、プールすることによりサンプルサイズを大きくする利点があり、精度の高い解析が可能になる。 |
| 6-2 | 症例-対照研究 | 図6-1に示すように調査開始時点で既に疾患を発症した症例と比較のための対照とについて、さまざまな要因との関連の有無を検討する方法である。対照は症例と年齢、性などを一致させる。比較的短い期間に結果を導き出せる長所がある反面、対象者の参加率が低いことによる選択のバイアスなどの弱点も存在する。これに対してコホート研究は、ばく露レベルの異なる人々を追跡してばく露レベルの違いにより疾患の発症率が異なるかどうかの検討を行う(図6-1参照)。コホート研究の信頼性は高いが、小児白血病のように集団の中でその疾患の発症率が非常に小さい場合には大人数の集団の追跡が必要となる。この課題については費用、時間、マンパワーなどの点で現実的な方法ではない。 |

7

健康リスク評価と防護方策

この章では環境保健クライテリア(Environmental Health Criteria以下EHCと略記)238の「健康リスクの評価」と「防護方策」の2章をまとめて紹介する。

はじめに一般論として、有害原因があるとしてその「リスク」の認定と評価を行うための条件・根拠などを整理している。ついて「超低周波磁界のリスク」の性格を急性ばく露と慢性ばく露それぞれについて、特に慢性ばく露の健康影響について科学的な不確実性を強調している。

「防護方策」については一般論のほか、超低周波電磁界のように健康影響の有無が不確実な場合に、対応・対策・規制・政策をどうしたらよいか議論している。対策・政策面では、ヨーロッパ連合の影響が強いが各国の「用心深い」考え方が紹介されている。とりうる政策を4段階に整理して紹介し、各国の具体的なばく露制限値をまとめている。なお、最後に、日本の現状と対応について現在の状況を追加して紹介した。

7-1 健康リスクの評価

ある有害原因がありそうだ、というときには次の4つのステップを区別してリスク評価を行う必要がある。すなわち、(1) 有害性の確認、(2) ばく露量の測定、(3) ばく露量と有害程度の関係、および(4) 科学的に確実なリスク認定、である。対策はこれらに基づいて組み立てられるべきである。

有害性の確認

有害性の確認というのは、(1) 本当に超低周波電磁界がヒトの健康に有害であるかどうか、および(2) どんな場合にばく露がおこるのか、を明確にすることである。

ばく露量の測定

ばく露量の測定においてはどのような手段・道具でばく露量を計測すべきか、たとえば直接的な測定なら1回限りの測定から何日間かの個人ばく露量の記録にいたるまでさまざまな方法がある。間接的な推定なら個人アンケート調査とか計算機シミュレーションもある。

ばく露量と有害程度の関係

ばく露量と有害程度の関係は定量的に解析される必要がある。ただし、一般公衆が日常的にばく露される程度の超低周波電磁界では有害な慢性影響は現れない。

科学的に確実なリスク認定

最終的なリスク認定は十分な科学的根拠に基づく合理的なリスクの予想を示さねばならない。科学的に不明確な場合でも適当なばく露シナリオにより生ずるリスクの程度を示す必要がある。

このような健康リスク評価を取り入れて特定リスクへの対処を行うことになる。

7-1-1 有害性の確認

急性の効果

高強度の超低周波電磁界によって神経が刺激されるが、低強度のときは影響があっても不快感を覚える程度であり、一般公衆が受けるばく露強度では影響はない。

慢性の影響

弱い超低周波電磁界へのばく露によって小児白血病のリスクが高くなる、という疫学調査結果が認められている。ただし対照者の選択法およびばく露量の定量法に問題があるとの指摘がある。さらに超低周波電磁界へのばく露が小児白血病の原因であると断定するためには、動物実験や細胞実験による裏づけが得られなかった上に合理的な発病メカニズムも考えられない。したがって、超低周波電磁界が発病の原因であるというのは根拠不十分である。

7-1-2 ばく露量の測定

住居でのばく露

野外での最も高いばく露では、送電線の近傍で電界は数百ミリボルト毎メートル(mV/m)以下、磁界は20マイクロテスラ(μ T)以下である。先進国の住居でのばく露量の幾何平均は電界が数十ミリボルト毎メートル、磁界が0.02マイクロテスラ程度である。なお、交流磁界0.4マイクロテスラ以上の高ばく露住居は、国によって異なるが全体の0.4~3.3%である。(表7-1)

表7-1. 英日米それぞれの住宅ばく露%まとめ

| 磁界強度 (μ T) | 日本 (%) | 米国 (%) | 英国 (%) |
|-----------------|--------|--------|--------|
| 0.1未満 | 89.4 | 66.0 | 91.9 |
| 0.1~0.2 | 5.9 | 23.0 | 6.1 |
| 0.2~0.4 | 3.5 | 8.6 | 1.7 |
| 0.4以上 | 1.2 | 2.4 | 0.37 |

出典:米国(リネ(M.S.Linet)ら、1997)、英国(UKCCS、1999)、日本(兜らの症例-対照研究の原データを元に計算した、小児寝室915戸の1週間平均値)

職業上のばく露

作業環境での超低周波電磁界へのばく露量は磁界強度約10ミリテスラ(mT)まで、電界強度30キロボルト毎メートル(kV/m)までと考えられる。この電界値なら接触電流¹⁵⁾による微小な電気ショックを受ける。

7-1-3 ばく露量と有害程度の関係

閾値レベル

交流電界のヒトに対する急性影響は周波数によって異なるが、その閾値および安全係数から制限値が定められている。ただし、慢性影響については定められていない。

疫学手法

超低周波電磁界の慢性的な健康影響としては小児白血病だけが疫学調査の結果として疫学上の関連が言われている。すなわち住居での日常的な0.3~0.4マイクロテスラ以上のばく露は証拠不十分ながら「発がん性があるかもしれない(IARCの分類2B)」とされている。ただし、これには生物学的および動物実験上の根拠はない、疫学調査で見出された弱い関連が唯一の根拠である。

7-1-4 科学的に確実なリスク認定

急性影響

脳神経系への急性影響は明確であり、これを防ぐ意味で表7-2のような制限値が決められた。

表7-2. ICNIRP¹⁵⁾ガイドラインとIEEE¹⁶⁾スタンダード

| 周波数 | 一般公衆の電界の制限値(kV/m) | | 一般公衆の磁界の制限値(μ T) | |
|------|-------------------|------------|-----------------------|------------|
| | ICNIRPガイドライン | IEEEスタンダード | ICNIRPガイドライン | IEEEスタンダード |
| 50Hz | 5(10) | — | 100(500) | — |
| 60Hz | 4.2(8.3) | 5(20) | 83(420) | 904(2710) |

(カッコ内の数値は職業者)

慢性影響

疫学上の「関連」があるといっても、これからは直ちに超低周波電磁界が「病因」であるとは言えない。したがって小児白血病については、万一超低周波電磁界が原因であると想定した時、どの程度の病児が発生するかを計算し、ばく露量との関係から発生数を推定することになる。(世界中で100~2,400人、つまり年間発生数の0.2~5%程度という。)

リスク原因-結果関係の不確実性

EHC238では次の3点を議論している。

- 弱い超低周波電磁界への慢性的ばく露が小児白血病の原因でありうるという主張について、そのメカニズムがいくつか考えられたが、WHOのタスク会議がありうる説として紹介しているのは次の3つである。① 外部からの交流磁界によって生じる弱い誘導電流¹⁶⁾が神経系ネットワークに対して何らかの影響を与える可能性。② 体内の生化学反応で、対電子¹⁶⁾をもつラジカルが2つスピン平行のラジカル対¹⁶⁾をつくると、磁界内でその寿命が延長して反応速度が変化する可能性。③ 体内に微量に存在する強磁性マグネタイト¹⁶⁾が磁界内で多少の変化を起こして周囲の細胞活性に影響する可能性。ただし、これらのいずれもまだまだ証拠不十分である。要するに超低周波電磁界が如何なるメカニズムで生体に影響するのか判っていない。
- 有害ばく露量についての不確実性は「窓効果window effect」と呼ばれる説からくるものである。これは交流電磁界がある効果を示すのは特定の周波数と特定の強度でばく露したときに限る、という説である。「ばく露強度が大きいほど効果が強いという常識」に反する考え方であり、磁界効果に特有のものという説であるが、これには確固たる証拠はない。

¹⁵⁾ 非電離放射線防護委員会(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection). ICNIRP

¹⁶⁾ 電気電子学会(The Institute of Electrical and Electronics Engineers). IEEE

- 疫学の問題点もよく指摘されている。疫学調査結果は0.3~0.4マイクロテスラ以上の長期間ばく露により小児白血病リスクが高まるとしているが、結論づける前に「偶然このような数字が得られたby chance」、「ばく露量の測定ミスによる誤分類」、「対照者の偏り、選択の偏り」、「他の有害原因の混入」などを吟味する必要がある。これらのうちで「対照者選択の偏り」が問題視される。

7-1-5 結論

超低周波電磁界の急性影響については国際ガイダンスがありこれは確立している。慢性の健康影響では弱い超低周波電磁界による小児白血病のリスク増加が疫学上の関連ありとされるが、疫学結果だけを根拠に制限値を設定することはできない。これについてはなんらかの「念のための方策」precautionary measures（「precautionary」については、以下、「念のための」と訳す。）を示唆するにとどめる。

7-2 防護方策

EHC238の第13章は、「Protective measures」、すなわち、超低周波電磁界のリスク評価結果に基づき、そのようなリスクを管理するためにどのような防護方策を施すことが適切と考えられるのかをまとめた章である。

EHC238では、7-1でも紹介したとおり、超低周波電磁界のリスク評価結果を以下のように総括している。

- 神経系への急性影響は確認されており、このような影響が国際的なガイドラインの基礎となっている。
- 長期影響の可能性に関しては、いくつかの疫学研究が、日常的に弱い超低周波磁界にばく露されることが小児白血病のリスクを増加させる可能性があることを示唆しているが、このような証拠は因果的とみなすには十分に強いものではないため、超低周波磁界は依然として「発がん性があるかもしれない(2B)」と分類されたままである。

このように、長期影響の可能性についてははっきりとした結論が出ないままであり、このことが、このような影響の可能性に配慮した公衆衛生政策を立案する際に議論を巻き起こすことにもなる。EHC238第13章には、このようにリスク評価に科学的な不確実性を伴う場合にリスク管理方策を立案するにあたってどのような点に配慮すべきか、その結果として超低周波磁界の管理方策としてどのような方策が適切なのか詳細に示されている。

7-2-1 公衆衛生政策

公衆衛生政策の立案にあたっては、科学的根拠が重要であることは事実であるが、必ずしも科学的根拠にのみ基づいて政策立案が行われるわけではなく、それ以外にもさまざまな要因が考慮される場合が多い。たとえば、公衆衛生政策を採用することによって得られる社会的便益を最大化し、公衆衛生政策を実施するのに必要な直接的・間接的費用を最小化することがしばしば求められる。このような政策を立案する上で考慮される論点として、EHC238では以下のものを挙げている。

公衆の衛生と安全

政策の最大の目的は人々への危害を除去あるいは低減することである。健康への有害な影響は、通常、ばく露によって発生する疾病率や、影響の起こる確率で評価される。また、ばく露による過剰症例数や過剰死亡数、ばく露低減によって発生を防げる症例数、などで評価することも可能である。

政策実施に必要な費用

単に金銭的なものばかりでなく、政策に必要な社会全体としての費用は、費用の分配を考慮しなければ、以下の3つからなる。

- (a) 方策を適用することで社会全体に降りかかる直接的費用
- (b) 技術を最適な状態で利用できないことに起因するような、間接的費用
- (c) 有益な技術をいち早く導入するなど、政策によって発生する費用減

公衆の信頼

政策における公衆の信用度合いや、公衆衛生を十分に守るためにふさわしい方策として公衆がどの程度受け入れてくれるかは、多くの国において重要な目的である。さらに、安全に対する公衆の感覚は、それぞれのものが重要である。なぜならば、健康に関するWHOの定義は、病気や疾患のない状態だけを言うのではなく、社会的安寧状態も含むからである。

利害関係者の関与

公平で民主的であり、かつ透明性のある政策決定過程が重要である。利害関係者を関与させる方法としては、政策立案の各段階に利害関係者を参加させることや、提案された政策の実施に先立って利害関係者にコメントを提出する機会を与えることなどがある。このようなプロセスをとることにより、科学者や政策立案者が単独で作成する政策とは異なった政策が合法的に立案されることにもなる。

発生源を同等に取り扱うこと

ばく露を考慮する場合には、すべてのばく露発生源を同等に考慮することが望ましい(たとえば、超低周波電磁界に関して、家庭内の接地システム、電化製品、送電線、変圧器などから発生する磁界を低減する場合)。ばく露低減に関して最も費用対効果の高い方策に焦点を当てることが望ましい。政策立案者は、以下の2点について決定しなければならない。

- (a) 設備を新設する場合と既にある設備とを別に考慮するのかどうか
- (b) 非自発的なばく露と自発的なばく露とを別の政策で取り扱うことが妥当かどうか

より詳細な情報は、「念のための原則」(precautionary principle)に関するECのステートメントを参照してほしい。

倫理的、道義的、文化的、宗教的制約

利害関係者間の協議にかかわらず、政策が倫理的か、道義的か、文化的に受け入れ可能か、宗教的信義と矛盾しないかについて、個人やグループ間で意見の相違があるかもしれない。このような問題は政策の実施に影響を及ぼすので、考慮する必要がある。

修正可能であること

政策実施の結果を注意深く観察しなければならない。政策はバランスのとれたものでなければならず、最新の情報に基づくものでなければならない。また、新たな情報が得られた場合には修正可能なように十分な融通性がなければならない。

解説7-1 わが国の取り組み

わが国においては、超低周波磁界の公衆衛生政策を検討するための枠組みとして、2007年6月に「電力設備電磁界対策ワーキンググループ」が招聘された。このワーキンググループは、経済産業省に設置された審議会である「総合資源エネルギー調査会」のうち、「原子力安全・保安部会 電力安全小委員会」の下に設置されたグループで、WHOによるEHC238公表を踏まえて、日本の電力設備から発生する磁界の規制のあり方について議論を行うために招聘されたものである。政策担当者や、電力設備の所有・運用者である電気事業者はもちろんのこと、学識者、消費者団体、マスメディアなどの利害関係者が参加し、一般公開で議論が行われた。さらに、ワーキンググループが作成した報告書^{参考文献7-1}は公開され、1ヶ月間にわたり国民からのコメントを受け付けた^{参考文献7-2}。

なお、ワーキンググループの議論の対象は、あくまでも電力設備から発生する磁界の管理政策に限定されていて、これ以外の超低周波磁界発生源は考慮されなかった。しかしながら、家電製品や携帯電話などの電磁界放射実態や健康リスク評価などについては公衆の関心も電力設備と同様に高いことがワーキンググループでも確認された。

ワーキンググループにおける議論や報告書の詳細については後述する。

7-2-2 科学的知見

超低周波磁界の健康リスクとして、強い磁界にばく露されることにより神経系に対して急性の影響が見られることは科学的に確立されているが、弱い磁界に長期間ばく露されることで小児白血病のリスクが高まる可能性については因果関係が確立されていないことは前述したが、これらの健康リスクを考慮した政策の考え方について、EHC238では次のように述べられている。

- 電磁界ばく露によって生じる何らかのハザードの科学に基づく評価は、ばく露限度に関する国際ガイドラインの基礎を成し、公共政策上の対応に必須の情報を与える。
- 超低周波磁界への慢性ばく露が小児白血病のリスクを増加させるかどうかについては、科学的不確実性がある。加えて、そのようなリスクについて推定される影響は小さいこと、白血病は稀であること、0.4マイクロテスラを超える平均ばく露は稀であること、および、関連するばく露指標の決定における不確実性を考えれば、小児白血病データに基づき、磁界ばく露を0.4マイクロテスラ未満に低減することを目的とするばく露限度を実施することが、社会にとって有益ではなさそうである。

一般的に、公衆が日常的に受けている超低周波磁界のばく露レベルは、磁界の確立された影響から人体を防護するために定められた上記国際ガイドラインが示すばく露制限と比べるとかなり低い値であるため、健康上重大な懸念となるようなレベルではない。しかしながら、小児白血病との関連が因果的とは言えないまでも科学的に不確かな状況があることや、このような科学的な不確かさを踏まえてIARC¹⁷が超低周波磁界の発がん性を「2B」に分類したことから、公衆の間には低レベル磁界への長期間ばく露に対する不安が存在するも事実である。国によっては、このような科学的な不確かさを考慮すると、国際的なガイドラインに基づくばく露制限で十分な公衆防護政策になっているのかという議論を行っているところもある。このような状況を背景に、多くの国や地域で、「念のためという考え」(precaution)に基づく方策が検討されてきた。

7-2-3 「念のためという考え」に基づく政策立案

超低周波電磁界に関する既存の政策

EHC238では、7-2-2項で述べた「念のためという考え」について、以下のような説明を加えている。

- 「念のための原則」(Precautionary Principle;以下PPと称する。)は、有害性の確かな証拠以前に対処が必要となるかもしれないような、科学的に不確実な状況で適用されるリスク管理ツールである。これは、より科学的根拠のある対応を策定するための適切なデータが利用可能になるまで、潜在的に重大な健康への脅威に対して暫定的な対策をまとめることを正当化することを意図している。PPは国際法にも言及されており^{参考文献7-3, 7-4}、欧州環境法の基礎となっている^{参考文献7-5}。

超低周波電磁界へのばく露に対して「念のためという考え」を適用した結果としての公衆衛生政策として、いくつかの国で各様の政策を採用している。EHC238では、それらのうち、①賢明なる回避(Prudent avoidance)、②消極的規制アクション(Passive regulatory action)、③「念のための」放射制限(Precautionary emission control)、および④「念のための」ばく露制限(Precautionary exposure limits)の4つについて、それぞれの政策を次のように概観している。また、この4つの政策以外に超低周波電磁界に関していくつかの国で採用されている政策の例も併せて表7-3および表7-4のようにまとめている。

①賢明なる回避(Prudent avoidance)

この、「念のためという考え」に基づく政策は、商用周波電磁界のために策定された。これは、低費用から控え目な費用で、施設の向きを変えたり、電気システムや電気器具を再設計することによって、電磁界への人のばく露を低減させる措置を講じることと定義されている^{参考文献7-6}。「賢明なる回避」政策は、オーストラリア、ニュージーランド、スウェーデンを含む、いくつかの国々で採用されている。実施可能な低費用の方策として、新規の電力線の経路は学校から離す、送電線用地付近の磁界を減らすように電力線導体の相配列や配置を調整するなどがある。

②消極的規制アクション(Passive regulatory action)

この勧告は、超低周波電磁界問題のために米国で導入されたもので、ばく露低減のために実際の方策を定めるのではなく、個人のばく露低減のための方法について公衆を啓蒙するものである。

③「念のための」放射制限(Precautionary emission control)

この政策は、スイスで実施されたもので、放射レベルを「技術的および運用上可能な限り」低く抑えることによって、超低周波電磁界へのばく露を低減するために用いられている。放射を最小化する方法は、「金銭的に実行可能」であるべきである。制限されるのは、ある装置またはある分野の装置からの放射レベルであるが、一方、すべての電磁界発生源からの人々の最大ばく露レベルとして、国際的なばく露制限値が採用されている。

④「念のための」ばく露制限(Precautionary exposure limits)

「念のための」方策の1つとして、一部の国々ではばく露制限値の引き下げを実施している。たとえば、イタリアは2003年にICNIRPガイドラインを採用したが、電磁界ばく露に関してさらに2つの制限値を導入した。(a) 児童公園、住宅地、学校の構内など特定の場所に対する、ICNIRPガイドラインにおける参考レベルの10分の1の「注意値」、および(b) 新しい発生源および新築住宅にのみ適用される、より限定的な「品質目標」の2つである。50ヘルツ(Hz)に対して選ばれた値は、それぞれ10マイクロテスラおよび3マイクロテスラで、これらは恣意的なものである。そのレベルで起こりうる急性影響の証拠もなければ、3マイクロテスラのばく露が10マイクロテスラまたは100マイクロテスラのばく露よりも安全であると示唆する、白血病の疫学研究からの証拠もない。

表7-3. 「念のための」のアプローチの例

| 「念のための」アプローチ | 国 | 方策 |
|---|-------------------------------|---|
| 賢明なる回避 (Prudent avoidance) | ニュージーランド オーストラリア スウェーデン | ICNIRPガイドラインを採用し、ばく露低減のために低費用の自発的な方策を追加 |
| 消極的規制アクション (Passive regulatory action) | 米国 | ばく露低減のための方策について公衆を教育 |
| 「念のための」放射制限 (Precautionary emission control) | スイス | ICNIRPガイドラインを採用し、放射制限を制定 |
| 「念のための」ばく露制限 (Precautionary exposure limits) | イタリア | 恣意的な低減係数を用いてばく露制限値を引き下げ |

解説7-2 わが国の送電線規制

わが国においては、電力設備や家電製品などから発生する超低周波電磁界に関する「念のための」政策はこれまでのところ採用されていない。しかしながら、電力設備に関して言えば、わが国の電気事業者は、わが国の国情に応じた設備形成を行っており、そのことが結果的に電力設備周辺での磁界レベルを低いレベルに維持することにつながっている。

具体的には、わが国の特別高圧(7,000ボルト(V)を超えるもの)架空送電線については、電気事業法に基づく経済産業省令「電気設備に関する技術基準」(以下、「電技」と称する。)において、送電線地下上1mでの電界レベルを3キロボルト毎メートルに制限されている。この制限値は、ICNIRPガイドラインの電界に関する参考レベル(5キロボルト毎メートル)よりも厳しい制限値であり、この制限値を遵守するために、特に使用電圧の高い架空送電線(500キロボルト(kV)、275キロボルト、など)では、電線の高さを高くしたり、各相の配置を最適化するなどの配慮が行われている。このような配慮は、上述の磁界レベルを低減するための方策と共通するものであり、結果的に送電線周辺での磁界レベルは相当低いレベルで維持されている。

また、電技第40条では、「特別高圧の架空電線路は、その電線がケーブルである場合を除き、市街地その他人家の密集する地域に施設してはならない。ただし、断線又は倒壊による当該地域への危険のおそれがないように施設するとともに、その他の絶縁性、電線の強度等に係る保安上十分な措置を講ずる場合は、この限りでない。」と規定されており、市街地などへの送電線の施設を原則制限している。さらに、第48条第2項では、「使用電圧が170,000ボルト以上の特別高圧架空電線と建造物との水平距離は、当該建造物からの火災による当該電線の損傷等によって電気事業に係る電気の供給に著しい支障を及ぼすおそれがないよう、3m以上としなければならない。」と規定されており、500キロボルト、275キロボルトなどの架空送電線は建造物の上空を通過できない。すなわち、もともと架空送電線は建造物が多い市街地などを極力回避して建設されることが多く、このことも、居住環境における磁界レベルを低いレベルに抑制する要因となっている。

費用と実現可能性

健康リスク評価に基づく政策決定を行うにあたっては、その政策の結果として生じる社会的費用を考慮せざるを得ない。ただし、この場合に考慮すべき費用にはあらゆるものが含まれるべきであるし、ある政策を採用した場合の便益も併せて評価すべきである。

電磁界に対する「念のための」方策の費用や便益分析が、いくつかの国で行われている。EHC238では、分析にあたって考慮すべき費用や便益を、考えられる「念のための」方策ごとに表7-5のようにまとめるとともに、電磁界の健康リスク評価の結果を踏まえて、電磁界に対して「念のための」方策を適用することについては「安全過ぎるくらいの安全を望む社会の要求を受け入れる場合でさえも、非常に低費用の超低周波電磁界ばく露低減方策以上のことを正当化することは難しそうだ。」と述べている。

解説7-3 電磁低減技術とコスト

わが国においては、超低周波電磁界への慢性ばく露による健康影響の可能性を考慮した「念のための」方策についての費用および便益の分析を行った例はない。しかし、平成19年9月28日に開催された第3回「電力設備電磁界対策ワーキンググループ」において、原子力安全・保安院から「磁界低減技術とコスト評価」と題する資料が提示された。本資料は原子力安全・保安院が平成18年度に実施した委託事業のうち「電力設備電磁環境影響調査報告書」^{参考文献7-7}に基づくものである。

資料では、架空送電線に適用できそうな磁界低減技術（電流制限、高鉄塔化、逆相化、地中化、など）をいくつか取り上げ、それぞれの技術をわが国における標準的な架空送電線に適用する場合の費用の増加と磁界の低減効果とを、送電線を新設する場合と既設の送電線を改修する場合とでそれぞれ比較・検討したものである。

検討例をいくつか示すと、たとえば新設送電線に逆相配列を採用する場合、逆相配列を採用しない場合と比べて60～70%の磁界低減効果が認められるが、送電線建設費用はほとんど増加しない。一方で、新設送電線の線下に磁界補償ループを設置して磁界を低減する方法の場合、補償ループを設置することで磁界レベルが最大30%程度低減できるものの、送電線建設費用が10～30%増加する。わが国のすべての既設送電線を改修して磁界低減技術を適用する場合の費用も試算されているが、最も安い逆相化でも約400億円、送電線を地下埋設する場合では約250兆円必要との結果が示されている。

これらの検討結果は、以下のようにまとめられている。

- 新設送電線については、「磁界低減」と「コスト」の面から見れば、「逆相化」、「コンパクト化」、「高鉄塔化」、「ルート変更」が検討に値する技術と言える。また、既設送電線については、「逆相化」と「コンパクト化」が検討に値する技術と言える。
- しかしながら、日本の標準的な架空送電線は、世界で最も厳しい部類に入る電界規制（3キロボルト毎メートル）により、既にコンパクト化、高鉄塔化を設計思想に取り込んでおり、更なる適用の余地は限られる。
- 逆相化についても、超高圧（275キロボルト、500キロボルト）の送電線については、同様の理由により、既に標準設計となっており、適用の余地は非常に限られる。

表7-4. 一般公衆の電磁界ばく露制限のためのさまざまなアプローチ

| 国・機関 | 制限 | コメント |
|--------------------------|--|---|
| ばく露制限に基づく「念のための」政策 | | |
| イスラエル (2001) | 1μT | 新たに建設される設備 |
| イタリア (2003) | 100μT | |
| | 10μT | 1日4時間以上のばく露に適用される注意値 |
| | 3μT | 新たな線および住宅にのみ適用される品質目標 |
| 米国 | 15~25μT | 最大電流条件。州によっては規制(たとえばフロリダ州)または非公式ガイドライン(たとえばミネソタ)で定めている。 |
| | 0.2~0.4μT | 地方条例で採用(たとえばカリフォルニア州アーバイン市) |
| 発生源からの人々の分離に基づく「念のための」政策 | | |
| アイルランド (1998) | 既存の学校や建物から22m未満の距離内において新規の送電線や変電所は不可とする。 | 地方自治体は、学校や保育園の近隣においては電力設備に対する建設許可を与えない。 |
| オランダ (2005) | 電力線と子供が多くの時間を費やすことができる場所との間隔を大きくすることで、平均ばく露が0.4μTを超えないようにする。 | 既存の送電線の近くの新たな建物、または既存の建物の近くの新たな送電線に対して適用。 |
| 米国 | 既存の送電線近くでの学校新設の制限 | カリフォルニア州教育局が採用 |
| | 新規の線路は、技術的に不可能でない限り地下に埋設し、住宅地、学校、保育園、および青少年キャンプの近くには緩衝地帯を設ける。 | コネティカット州が採用 |
| 費用に基づく「念のための」政策 | | |
| 米国 | 十分な界の低減(15%を超える値)が達成できるならば、設計や経路に費用がかからない、あるいは低費用の代替案を採用する。プロジェクト費用の4%が目安。 | カリフォルニア州公益事業委員会が採用 |
| 非数値目標に基づく「念のための」政策 | | |
| オーストラリア (2003) | 達成が容易な場合はばく露を低減させる。 | |
| スウェーデン (1996) | レベルについての奨励のないばく露低減 | 新規の送配電設備の設計の際に電磁界を考慮すること、および、それらの設置は敏感な地域から遠ざけること。 |

- ルート変更についても、国土の狭い我が国では、人口密集地においてこれを考慮することには限界があると考えられる。
- 実際に各磁界低減技術を適用するに当たっては、コスト算定で省略した項目等、工事の実情に応じて更なる費用が必要。
- 各磁界低減技術を適用するに当たっては、磁界低減以外の供給信頼性、設備の保守性、作業員の安全、周辺環境（景観問題を含む）などへの影響があり、これらについても併せて考慮することが必要。
- 送電線は、形態、設計条件、経過地の環境等が様々であり、磁界低減技術を全ての送電線に一律に適用することは適当でないと考える。

7-2-4 超低周波電磁界への「念のための方策」についての勧告

上記のような考察を踏まえ、EHC238では、

- 各国は科学に基づく国際的ガイドラインを採用することが奨励される。電磁界の場合、国際的な基準策定の調和が、各国が目指すべき目標である。
- 基準を補足するために「念のための」方策が考慮される場合は、科学に基づくガイドラインを損なうことがないような方法で適用されるべきである。
とした上で、超低周波電磁界に適用可能な「念のための」方策として、以下の10事項を勧告している。
- 政策立案者は、一般公衆および労働者の双方に対し、超低周波電磁界ばく露に関するばく露ガイドラインを制定すべきである。双方のばく露レベルに関する指針のための最良の情報源、および科学的レビューの原則は、国際的なガイドラインである。
- 政策立案者は、一般公衆および労働者の双方に対し、ばく露制限を超えないことを保証するため、すべての発生源からの電磁界の測定を含む、超低周波電磁界防護プログラムを確立すべきである。
- 電力が健康、社会および経済にもたらす便益を損なわないならば、ばく露低減のための非常に低費用の「念のための」手順を実施することは合理的であり、是認される。
- 政策立案者および自治体の計画担当者は、新たな設備の建設および新たな機器（電気製品を含む）の設計の際に、非常に低費用の方策を実施すべきである。
- 安全性の向上など、他の追加的便益が得られるならば、あるいは、低費用または費用がかからないならば、装置・機器からの超低周波電磁界ばく露を低減するために、技術的手法に対する変更を検討すべきである。
- 既存の超低周波電磁界発生源の変更を検討する場合は、安全性、信頼性および経済面と併せて、超低周波電磁界の低減を考慮すべきである。
- 地域当局は、新たな施設の建設または既存の施設の再配線の際に、安全性を維持しつつ、意図しない接地電流の低減のための配線規則を施行すべきである。配線に関する法令違反または既存の問題点の同定のための未然防止策は、費用がかかりそうであり、正当化されそうにない。
- 国の当局は、すべての利害関係者による、情報を提示した上での意思決定を可能とするため、効果的で開かれたコミュニケーション戦略を実施すべきである。これには、個人が自分のばく露をどのように低減できるかについての情報を盛り込むべきである。
- 地方当局は、大規模な超低周波電磁界発生源の立地の際に、産業界、地方政府および市民との間のより良い協議を含む、超低周波電磁界発生源施設の計画を改善すべきである。
- 政府および産業界は、超低周波電磁界ばく露の健康影響に関する科学的証拠における不確実性を減らすため、研究プログラムを推進すべきである。

表7-5. 各政策オプションの分析に関連する要因

| オプション | 便益の考慮に関連する要因 | 費用の考慮に関連する要因 | |
|-----------|---|--|--|
| 何もしない | 小児白血病は比較的稀な病気であり、疫学研究で言及されたレベル（すなわち、時間加重平均の推定値が0.3または0.4μT超）にばく露される割合はごく小さい。 政策の有効性に関しては多くの不確実性があり、これは科学の進歩とともに低減されるであろう。利用可能な唯一のオプションの費用が高い場合には、正式なアクションを講じない方がより適切かもしれない。 証拠が現れた時に、政策の調整が可能である。 | 病気の負担を低減する可能性がない。 不確実性の低減と、将来のより良い知識へ向かう進歩がない。 当局への信頼を損なう。 懸念する市民が、自ら事態に対処するかもしれない。 | |
| 研究 | 不確実さを低減し、より良い決定を容易にする。 科学の基礎に貢献する。 解決策の策定に役立つ。 | 優先度がより高い分野からのリソースの転用。 研究結果を待つ間は対策が遅れるかもしれない。 | |
| コミュニケーション | 知識ある公衆は、 -さまざまなレベルの超低周波電磁界ばく露の受容可能性をより良く評価できる。 -超低周波電磁界ばく露リスクの誤った認識による公衆の関心を減らすことができる。 -情報提供者への信頼を増すことができる。 知識ある公衆および労働者は、 -超低周波電磁界発生源に関する意思決定プロセスに関与することができる。 -ばく露を最小限にするために、どんな電気製品を購入するか、または、それをどこへ置くかについて、情報を与えられた上で決定することができる。 -ばく露を最小限にするために、発生源の設計に対する市場の力に影響を与えることができる（たとえば、電気毛布）。 | 正当化されない警戒または関心を高める可能性がある。 ばく露の理解が難しい場合、または、ばく露が非自発的で避けることが難しい場合、有効性は限定的かもしれない。 | |
| 緩和 | 新たな施設の計画変更 | 新たな施設の必要性の再評価。 ばく露を最小限にするための、異なる計画シナリオを比較することで、不必要なばく露を避ける。 利用可能な最善の技術を利用する。 オプションが新規施設の計画段階で考慮されるため、費用が低くなる。 | 新たな施設の建設について、技術設計の代案を提示する必要がある。 費用には、土地の占有化、資産価値の低下、および補償支払いが含まれるかもしれない。 |
| | 既存施設の工学的変更 | 遮蔽の設置、家屋および送電システムにおける配線方式の変更（相の分割、地上高を上げる、地下埋設等）など、防護的方策を講じることによるばく露の低減 | 費用の相当部分は、修復よりも当該箇所の同定にかかるかもしれない。 既存の設備に導入される変更は、より高い費用を生じる。 費用には、土地の占有化、資産価値の低下、および補償支払いが含まれるかもしれない。 |
| | 電気製品への工学的変更 | 磁界へのばく露の低減 | 電気製品の費用（またはサイズまたは重量）の増加 |
| 国家基準 | ばく露制限 | 保健防護のための当局のアクションにおける公衆の信頼感が増加するかもしれない。 | 科学に基づくガイドラインを損なうかもしれない。 偏りの安心感を与えかねない。 さほどでないばく露をさらに低減させようとするインセンティブを妨げるかもしれない。 遵守の費用 より緩い基準が新しい科学的証拠によって正当化されても、その方向に変更するのは難しい。 |

注) 第1のオプション以外のすべてのオプションは、国際的なガイドラインの採用ではなく、「何もしない」との関係で評価している。

7-2-5 わが国における超低周波電磁界管理政策

3-2-1項でも述べたが、日本では、電気設備に関する技術基準を定める省令(平成9年3月27日通商産業省令第52号、以下「技術基準」と称する。)の第27条によって、人の往来が少ない場所を除いて地表上1mにおける電界強度が3キロボルト毎メートル以下になるように特別高圧の架空電線路は施設されている。この制限値は、1973年に500キロボルト送電が開始された際、送電線下における静電誘導による人の感知現象が懸念されて実施された実験結果に基づき検討されたものである。

一方で、電力設備から発生する超低周波磁界を制限する規制はわが国にはなかった。経済産業省 原子力安全・保安院では、このような日本の状況と、WHOで進められてきた超低周波電磁界の健康影響評価作業の内容を踏まえ、一般の人々が生活する環境で電力設備から発生する超低周波磁界の規制のあり方を検討する必要があると判断し、2007年4月、原子力安全・保安部会 電力安全小委員会に「電力設備電磁界対策ワーキンググループ」を設置した。

「電力設備電磁界対策ワーキンググループ」は、2007年6月1日に第1回会合が開催された後、同年12月20日まで計6回の会合が開催された。会合では、2007年6月18日に公表されたEHC238の内容が紹介されるとともに、同時に公表されたファクトシートNo. 322をWHOの正式見解としてワーキンググループでの議論の根拠文書とすること、議論の対象を電力設備から発生する商用周波数に限定すること、などが議論の前提として合意されるとともに、疫学研究の解説や海外の規制動向などさまざまな情報が議論の材料として提供された。また、市民団体からの意見も募集され、会合で紹介された。

ワーキンググループは、6回に及ぶ議論の結果を報告書としてまとめた。報告書で示された政策提言を以下にまとめる。

- 原子力安全・保安院は、国際非放射線防護委員会(ICNIRP)が1998年に定めた一般の人々へのばく露ガイドラインの制限値(参考レベル)(100マイクロテスラ(50ヘルツ)、83マイクロテスラ(60ヘルツ))を基準値として採り入れる等必要な諸規定の整備、改正を行うべきである。
- 国は、磁界の測定・計算方法、評価条件(電流条件等)を決定し、電気事業者に対し、明確に示すべきである。
- 磁界ばく露と健康影響との関係に不確かさが残っていることから、引き続き、その不確かさを低減させるため、産学官が協力して研究を推進すべきである。
- 不安や疑問を持つ人々との信頼感の構築を目指すリスクコミュニケーションの増進を目的とした、中立的な常設の電磁界情報センター機能の構築が必要である。
- 電気事業者は、幼稚園、保育所、小学校等多数の子供が定期的に集まる場所、あるいは、その他にも電磁界の健康影響について強い不安を抱いている住民が住む地域の近傍に電力設備を新たに設置する場合には、磁界低減に科学的な根拠は見出せないものの、近隣住民等の心情に配慮して、住民との合意形成に格別の努力を払うべきである。
- 電気事業者が新たに設置する設備について既に実施してきている高鉄塔化、鉄塔コンパクト化、逆相配列化などの磁界低減に向けた努力を可能な範囲で引き続き継続することが望ましい。

これらの提言を受けて、2008年11月4日、財団法人電気安全環境研究所内に「電磁界情報センター」が設置された⁷⁸。電磁界に関する利害関係者間の有効なリスクコミュニケーションの実現に向けて、「電磁界情報センター」機能構築が進められているところである。

(志賀 健、世森 啓之)

用語解説

| | | |
|-----|--------|--|
| 7-1 | 接触電流 | 3-4-3参照(p.29) 用語解説4-12参照(p.32)および参考資料参照(p.66) (参考:環境省の訳の用語解説より) 人体と同等のインピーダンスをもつ電気回路を通じて、エネルギーを有する絶縁された導電性(金属製)物質と地表との間に流れる電流 |
| 7-2 | 誘導電流 | 4-1-1参照(p.31)、および参考資料参照(p.63) |
| 7-3 | 不对電子 | 用語解説4-8参照(p.34) |
| 7-4 | ラジカル対 | 用語解説4-8参照(p.34) |
| 7-5 | マグネタイト | 用語解説4-6参照(p.34) |

参考文献

- 7-1. 電力設備電磁界対策WG報告書、資料(経済産業省 原子力安全・保安部会)
- 7-2. 「電力設備電磁界対策ワーキンググループ報告書(案)」に対する意見募集の結果について(経済産業省 HP)
- 7-3. EU - European Union (1992). Treaty on European Union. Official Journal of the European Communities, C 191.
- 7-4. UNCED - United Nations Conference on Environment and Development (1992). Rio Declaraaconf 15126-1.htm, accessed 20-2-2007).
- 7-5. EC - Commission of the European Communities. Communication on the Precautionary Principle. 2000 (http://europa.eu.int/comm/off/com/health_consumer/precaution.htm, accessed 16-2-2007).
- 7-6. Nair I, Morgan MG, Florig HK. Biological effects of power frequency electric and magnetic fields: background paper. Washington, DC, Office of Technology Assessment, Congress of the United States, 1989 (OTA-BP-E-53).
- 7-7. 平成18年度 電力設備電磁環境影響調査(情報調査提供事業のうち電磁環境整備調査)調査報告書 経済産業省 原子力安全・保安院 委託調査、平成19年3月、日本エヌ・ユー・エス株式会社
- 7-8. <http://www.jeic-emf.jp/index.html>

8

参考資料 (物理的な補足解説)

EHC238本文には物理解説が含まれている、本章では必要な事項を以下にまとめた。また若干の資料を追加した。以下、EHC238に従って次の順で解説を進める。

- 磁界
- 居住環境における電界・磁界
- 職業環境における磁界
- ばく露評価手法
- 体内誘導電磁界
- 電界のドシメトリー
- 磁界のドシメトリー
- 接触電流
- 電磁波のエネルギー

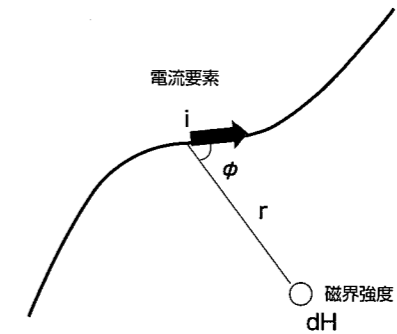


図8-1. 電流要素による磁界

磁界

電流経路が複雑な形状であっても、細かく分割した電流要素に分けて考えることができるため、図8-1に示すように、電流の短要素によって生じる磁界はビオ-サヴァール (Biot-Savart) の法則により次式で表すことができる。

$$\frac{dH}{dl} = \frac{i}{4\pi r^2} \sin \phi$$

ここで、dH は位置rにおける、導体要素dlにある電流要素iによって生じる磁界の要素である。また、phiはdlとrとの角度である。

解説8-1

最もシンプルな条件として、図8-2に示すような1本の無限長直線上に流れる電流Iアンペア (A) によって距離rメートル (m) の位置に生じる磁界の強さHアンペア毎メートル (A/m) は、 $H = \frac{I}{2\pi r}$ で表すことができる。さらに測定可能な物理量である磁束密度Bマイクロテスラ (μT) で表すと、

$$B = \mu_0 H, \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ (真空の透磁率) より, } B = 0.2 \times \frac{I}{r} \text{ となる。}$$

磁束密度はSI単位ではテスラ (T) であるが、古い文献や一般的にはガウス (G) を用いることが多いかもしれない。1テスラは10,000ガウス、1マイクロテスラは10ミリガウス (mG) で換算できる。

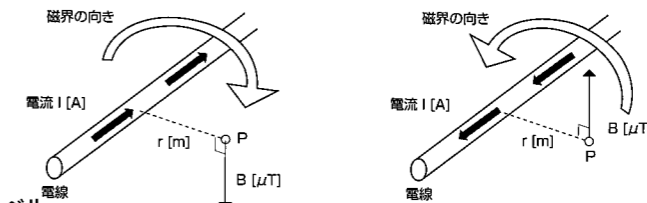


図8-2. 1本の電線による磁界レベル

磁界は鉄やその合金などの透磁率が非常に高い材料 (強磁性材料) によって乱されるが、超低周波磁界をこのような材料でシールドするためには、小さな領域を防護する方法 (たとえばコンピュータのディスプレイは、外部磁界の周波数とディスプレイの同期周波数が異なる場合、この周波数の差により、画像が揺れることがあり、これを防護する方法など) が現実的である。

静電界または静磁界は、はっきりと区別できる現象であるが、時間変動する電荷分布では電界と磁界が結合する状態となり、周波数が高くなるにつれその結合は強くなる。電界および磁界の特性、相互作用は、Maxwellの方程式により説明できる。

電界および磁界はベクトル量であるが、複合的なばく露では、ベクトル量の異なる複数の界 (場) が重なり合うことになり、生じる界 (場) は複数のベクトルを加算した複雑なものとなる。一般的に電力設備から発生する界 (場) は、空間内で回転する変動界となるため、電磁界の測定では、このような特性を考慮する必要がある。

居住環境における電界・磁界

地球からも磁界は発生しており、数ミリ秒から10¹²秒の範囲において継続的に変化している。地磁気の最大の特徴は、地球の回転軸に沿った双極子界に非常に似ていることである。界の鉛直成分は、磁極で最大70マイクロテスラ程度であり、磁気赤道で0に近づく。逆に水平成分は、磁気赤道で最大30マイクロテスラ強であり、磁極で0に近づく。人工的な磁界の例として、送電線や配電線、地中ケーブル、配電用変電所や電車などから発生する磁界が挙げられる。

解説8-2

a) 架空送電線から生じる電界は、電圧、送電線からの距離、電線の位置関係によって決定される。また、電線半径も関係があり、電線が太くなるほど地表レベルにおいて大きい電界が発生する。電線の相順 (A相、B相、C相の配列) によっても大きさは変化する。逆相配列は、距離による減衰が大きいので、他の配列よりも電界強度は小さくなる。架空送電線から生じる地表レベルの最大電界強度は、ほとんどの国において10キロボルト毎メートル程度である。架空送電線から生じる磁界は、電流、送電線からの距離、電線の位置関係によって決定される。電力需要の変化に伴い1日または年間を通して電流値は変化するため、磁界の大きさも変化する。また、架空送電線の電線は定格よりも低い負荷で運用されているため、実際に測定される平均磁界は理論的に計算される最大磁界 (使用している電線に流すことができる最大電流を条件としている) よりも非常に小さくなっている。

日本の架空送電線の磁界の大きさは、経済産業省の報告書によると、562箇所の測定の最大値では10マイクロテスラ程度 (地表1.5m) である。^{参考文献8-1} (表3-1参照(P.25))

b) 地中送電線から生じる電界は、ケーブルを地下に埋設しているため、地上には電界は発生しない。これは、地面が電界を遮蔽する効果を持つことと、ケーブル内部に電界を遮蔽する金属シースが使われていることに起因する。地中送電線から生じる磁界は、地中ケーブルの、各導体が絶縁されているため、それぞれ接近して敷設することが可能であり、磁界は小さくなる傾向がある。しかしながら、導体は頭上10mの位置ではなく、地中1mの位置に存在するため、架空線より接近した状態となる。英国の400キロボルト (kV) または275キロボルト地中ケーブルの計算例では、直接埋設、ケーブル間0.5m、埋設深さ0.9mの条件において、中心線上の地表1mでは最大96.17マイクロテスラ (平均24.06マイクロテスラ) であるが、中心線から5m離れた位置では最大13.05マイクロテスラ (平均3.26マイクロテスラ) という結果が示されている。地中送電線の電圧階級によっては、ツイスト・ケーブル (トリプレックス・ケーブル) を用いることもあり、これは導体間隔が狭くなるだけでなく、導体が螺旋状に巻かれるため磁界の打ち消し効果が大きくなり、磁界はかなり小さくなる。

日本の地中送電線の磁界の大きさは、経済産業省の報告書によると、74箇所の測定の最大値では16.4マイクロテスラ (地表0.5m) である。^{参考文献8-1} (表3-1参照(P.25))

c) 変電所から生じる電界は、その構外において大きな電界が生じることはほとんどない。配電用変電所構内において、母線やその他の設備が金属製のキャビネットに収められていれば、電界は遮蔽されて小さくなる。また、超高压の変電所は、通常、安全柵が設置されており、変電所敷地境界から主要な電界発生源までの距離も離れているため、結果的に電界は小さくなっている。変電所から生じる磁界は、一般公衆が接近可能な変電所の周囲において、多くの場合、変電所に入入りする架空送配電線または地中送配電線に起因している。変電所構内において、磁界の主な発生源は母線であり、電圧が高い変電所ほど電流の大きさや母線の分離も大きいと考えられるが、変電所境界から母線までの距離も長くなるため、電圧が低い変電所と比較して磁界レベルはそれほど変わらない。

日本の配電用変電所の磁界の大きさは、経済産業省の報告書によると、13箇所の測定の最大値では4マイクロテスラ (地表1m) である。^{参考文献8-1} (表3-1参照(P.25))

d) 配電線は、電界または磁界の発生という観点から送電線との違いはあまり無いが、現実的には、送電線にはほとんど存在しない中性線が配電線には存在する場合があります。そこに電流が流れている。多くの国において、中性線延長上の複数地点で接地がされており、連結した中性線接地となる。中性線を複数接地すると、電流が接地自体にも流れるため、異なる経路を通過して変圧器や変電所へ戻る可能性がある。この逸脱した電流が水道管などの導体を通り、家庭内に磁界をもたらす可能性がある。この電流は一般的に1~数A程度と低い傾向にあるが、送電線から離れた家庭においては、この電流によって発生する磁界が背景界と呼ばれる発生源となる。

日本の架空配電線の磁界の大きさは、経済産業省の報告書によると、11箇所の測定の最大値では1.13マイクロテスラ (地表1m) である。^{参考文献8-1} (表3-1参照(P.25))

e) 住宅内では、屋内配線から発生する電界は、金属管路の使用や壁の建材などにより遮蔽されているため、ごくわずかである。電化製品から発生する電界は、その使用に関係なくコンセントに接続されている状態で常に商用周波数の電界が発生している。この電界は、発生源である製品から遠ざかることにより、急激に小さくなる。送電線の真下では、電界は数千ボルト毎メートルであるが、住宅内の商用周波数電界の平均値は最大で数十ボルト毎メートルである。

職業環境における磁界

職業別の磁界ばく露の実態については、多数の報告があり、本解説書では表8-1に一例をまとめる。

表8-1. 職種別磁界ばく露レベル例

| 職種 | 平均磁界ばく露 | 備考 |
|---------------------|-------------------------|--|
| 発電所作業員 | 0.18~1.72μT | 英国AGNIR ¹⁸ (2001年) や米国NIEHS ¹⁹ (1998年) |
| 変電所作業員 | 0.8~1.4μT | |
| 架線作業員 | 0.03~4.57μT | |
| 電気工 | 0.2~18.48μT | |
| アーク溶接 | 手: 1mT超 胴体: 数百μT | 何百Aもの電流が流れている溶接ケーブルに作業員が接触することもある。 |
| 誘導炉の近傍 | (最大) 1~60mT | スウェーデンの報告 0.1~1.0mの距離 |
| 鉄道 (乗客) 鉄道 (作業員) | 0.3~290μT 10~6,000μT | フィンランドの報告 |
| 工業用マシン | 0.32~11.1μT | 作業員の胸の高さ 稼動するモータ近傍 |

解説8-3

日本における職業環境の磁界ばく露の実態調査^{参考文献8-2}は、平成9年~平成14年にかけて厚生労働省から委託を受けた中央労働災害防止協会にて調査されており、溶接作業員において局所的に最大1,410マイクロテスラ、加熱溶解設備作業員において最大564マイクロテスラの磁界ばく露が観察されている。この報告書では、これらの設備や機器から発生している電磁界の特性等を考慮することにより、回避行動などでばく露レベルを下げる事が可能としている。

ばく露評価手法

人はさまざまな環境において電磁界にさらされる。ほとんどの研究では、住宅についての調査では家庭で、職場に関する調査では作業現場でばく露評価を実施している。ほとんどの疫学研究は、電界より磁界の研究に焦点を当て、表8-2に磁界のばく露評価手法を示す。

体内誘導電磁界

超低周波数の電界および磁界に身体がさらされると、身体内部に電界および電流が誘導される。ドシメトリーは、外部の電界および磁界と身体内部に誘導された電界および電流密度、またはこれらの界へのばく露に関連するその他のパラメータとの関係を表している。

超低周波数の領域では、ばく露は電界強度 (E)、電束密度ベクトル (D)、磁界強度 (H)、磁束密度 (B) により示される。これらのパラメータはすべてベクトルであり、任意の位置rにおける媒質特性による界の強度は、次の式で表すことができる。

$$D(r) = \hat{\epsilon} E(r) \quad B(r) = \hat{\mu} H(r)$$

ここで $\hat{\epsilon}$ は複素誘電率、 $\hat{\mu}$ は複素透磁率であり、生物学的媒質では、 $\hat{\mu}$ は μ_0 (真空の透磁率) である。準静的な条件では、電界と磁界は個別に計算することができ、同様に体内誘導電界も個別に評価できる。電界と磁界の同時ばく露に関しては、重ねあわせにより評価する。

基本的なドシメトリーは局所的な誘導電界であるが、ICNIRP²⁰など電流密度を使用するばく露ガイドラインもある。このガイドラインでは、ドシメトリーの限度を組織1平方センチメートル (cm²) あたりの平均電流密度で表している。内部誘導電界 (E) および誘導電流密度 (J) はオームの法則により、次の式で表すことができる。

$$J = \sigma E$$

ここで σ は組織の体積導電率を表す。

¹⁸ 非電離放射線に関する独立諮問グループ (Advisory Group on Non-Ionising Radiation, AGNR)
¹⁹ 国立環境衛生科学研究所 (The National Institute of Environmental Health Sciences, NIEHS)
²⁰ 国際非電離放射線防護委員会 (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNRP)

初期のドシメトリーは人体を均一な導電率を持つ楕円体または単純化したモデルで表しており、全身および局部での電流測定が不十分であったが、現在では、多くの研究所にてMRI²¹データを活用した解剖学的構造に基づいた身体の不均一要素から構成されるモデルが開発されている。それらのモデルは30以上の器官および組織を特定し、1~10mmの単位立方格子(ボクセル)で表している。ボクセルにはさまざまな器官および組織の測定値に基づく導電率が設定されている。

表8-2. ばく露評価手法の比較

| ばく露評価 | メリット | デメリット |
|--------------|--|---|
| 発生源への接近記録の作成 | ・当該発生源からの電界および磁界に対するばく露を非常に大雑把ではあるが把握することができる。 | ・その他の発生源によるばく露や発生源からの距離による変動について考慮することができない。 |
| ワイヤコード(注1) | ・通常の磁界レベルを超える可能性のある住居を分類する簡単な評価手法である。 ・目で確認できる電力設備からの距離や特性に基づいて住居を分類することができるため、住居内への立ち入りは不要である。 ・磁界レベルが潜在的に高い住居を特定するには有用である。 | ・家庭内の発生源は考慮していない。 ・多相回路の相順による打ち消し効果や実際の負荷パターンの違いが考慮されていない。(電流値を無視している) |
| 計算(注2) | ・磁界測定値が0.2μT未満の家のほぼすべてを計算によって分類できることが報告されている。 | ・0.2μTを超過するケースでは、一戸建住宅は85%正しく分類できたのに対し、アパートの場合は50%しか分類できなかったとの報告がある。 |
| 測定(注3) | ・存在するすべての発生源からのばく露をとらえることができる。 ・発生源を前もって特定する必要はない。 ・限られたカテゴリーに分類する必要が無いため、さまざまな閾値やばく露反応関係を調査することが可能。 ・スポット測定は、最も簡単な測定方法。 ・長期測定(通常24~48時間)は、子供の寝室を測定するケースなどに適用可能。 | ・スポット測定では、時間的な変化を補足できないことがある。(日中の変化や1週間の変化、季節変化を測定することが困難である) |
| 被験者の身体に計器装着 | ・個人が出かけるすべての場所、時間において測定が可能。 | ・症例-対照研究でこの手法を用いると年齢または疾患に関して行動が変化するため、ばく露評価時に誤分類を発生させる可能性がある。 |

(注1:ワイヤコード)

4つの単純な仮説に基づき分類する。●電磁界強度は、発生源からの距離に応じて減衰する。●架空引き込み線によって各家庭に電力を供給するすべての電柱において電流は減少する。●同じ電圧条件では、より大きい電流を送るため、電線本数を増やすか太い電線が必要になる。●線路を埋設する場合、ばく露の寄与度は無視できる。これらの規則により、住居のばく露環境を最大5種類(超高電流構成:VHCC、通常高電流構成:OHCC、通常低電流構成:OLCC、超低電流構成:VLCC、および地下埋設:UG)に分類する。北米の研究にのみ利用されている。

(注2:計算)

電力線の導体配置や電力線から住居までの距離、電流の記録をすべて利用して、対象の家がいろいろな時期にばく露された磁界レベルを計算する。この計算モデルとワイヤコードとの共通点は、磁界が電流、距離に応じて変化するという物理法則に基づく信頼性と目視可能な送電線以外の発生源を無視している点である。両者の違いは、ワイヤコードは電線の種類と太さを潜在的な電流の尺度としているが、この計算モデルは概算の年平均電流を電気事業者より得ている。

(注3:測定)

症例-対照研究における対照とばく露調査の全回答者のばく露に基づく算術平均をまとめた表より、一般的に約4~5%が0.3μTを超える平均ばく露値と推測されるが、韓国では7.8%が0.3μTを超過するとの報告がされている。日本の調査結果は、兜らによる症例-対照研究(調査数603件、2006年)の報告がある。小児の寝室における磁界レベルを1週間連続測定したときの算術平均値が0.1μT以下は542件(89.9%)、0.4μT以上は5件(0.8%)である。

²¹ 核磁気共鳴イメージング(Magnetic Resonance Imaging, MRI)

電界のドシメトリー

解説8-4

国内においても、外部電界による生体内誘導電流評価研究が実施されている^{参考文献8-3}。千葉、伊坂らによる研究(1998年)では、頭部組織の頭皮、頭骨、脳脊髄液組織層および脳組織を考慮したモデル化を行い、頭部脳内に誘導される電流密度を有限要素法によって解析している。その結果、1kV/mの商用周波数電界により脳内に誘導される電流密度は、頭部脳脊髄液組織層の厚さ4mm、その導電率1.0ジーメンス毎メートル(S/m)、脳の導電率0.065ジーメンス毎メートルの条件において0.06~0.18mA/m²の範囲にあることが示されている。また、脳中心位置の電流密度は、頭部諸組織の導電率を0.1ジーメンス毎メートルで均一とした場合と比較して約22%低減していることが示されている。これは頭内部の構造や導電率の差異により、頭部内の誘導電流は分散、集中を生じているが(図8-3)、均一モデルではこれらを模擬できないため不十分であり、実際に近い頭部モデルが必要であることを示している。

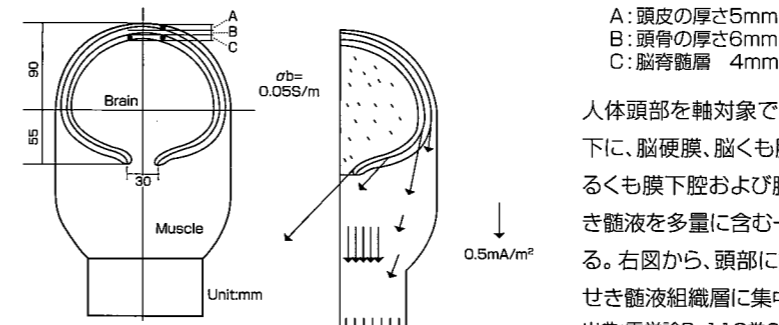


図8-3. 軸対称頭部組織構造の形状(左)と頭部組織内電流密度のベクトル図(右)

A: 頭皮の厚さ5mm
B: 頭骨の厚さ6mm
C: 脳脊髄液層 4mm

人体頭部を軸対象でモデル化する場合、頭皮、頭骨の組織下に、脳硬膜、脳くも膜、脳せき髄液によって満たされているくも膜下腔および脳軟膜の組織があるが、これらを脳せき髄液を多量に含む一つの組織とみなしてモデル化している。右図から、頭部に誘導された電流は導電率の大きい脳せき髄液組織層に集中して流れていることがわかる。

出典:電学論B, 118巻6号、平成10年「電力周波数の電界により人体モデル頭部脳内に誘導される電流密度分布」

千葉教生(米子高専) 伊坂勝生(徳島大学)

磁界のドシメトリー

磁界については、組織の透磁率が空気と同じであるため、組織内の磁界は外部磁界と同じである。ヒトおよび動物の身体は磁界を大きく乱すことはない。磁界の主な相互作用は、電界のファラデー誘導であり、導電組織の電流密度と関連している。

均一な組織では、電気力線は管状となる。異なる導電率で構成された均一でない組織では、部位と部位の界面にも電流が流れる。最も単純なモデルとして体の外形と一致させた等価円ループを用いると、誘導電界と電流密度は次式で表すことができる。

$$E = \pi f r B \quad J = \pi f \sigma r B$$

ここで、fは周波数、rはループ半径、Bは電流ループに垂直な磁束密度ベクトルである。

解説8-5

日本国内の研究では、誘導加熱調理器近傍の人体誘導電流について検討されている^{参考文献8-4}。鈴木、多氣らは、米国ブルックス空軍基地研究所が公開している全身人体ボクセルモデルをアレンジして、インピーダンス法を用いた計算によって1cm²の断面での電流密度の平均値を考察している。得られた結果より、誘導加熱調理器のごく近傍(磁界レベルが局所的にICNIRPガイドライン参考レベルを超過する箇所)において、人体誘導電流密度の評価を実施したところ、ICNIRPガイドラインの基本制限未満(10%程度)であることが報告されている。

解剖学的な身体モデルと数値法を使用して得られたデータの信頼性を評価するため、2つの研究グループの比較が行われている。英国とカナダの2グループは、SPFD法²²に基づき、それぞれ独自に開発した導出法を適用しているが、組織の大部分において計算パラメータの差は1%以下、数ケースにおいてのみ差が2~3%であった。1~2%程度の差は精度分析において通常予想される範囲である。

²² スカラポテンシャル有限差分法(Scalar Potential Finite-Difference method, SPFD)

接触電流

Dawsonらは2001年、大人と子供のモデルの両手両足に電極を取り付けて、接触電流をシミュレートすることにより電界の計算を行っている。接触電流による脳への電界は無視できるほど小さく、60ヘルツ(Hz)、1マイクロアンペア(μA)という小さい接触電流により、子供の骨髄において平均1ミリボルト毎メートル(mV/m)の電界が発生していることが示されている。また、電界中にある自動車への接触電流は、自動車の接地状況に依存しており、1キロボルト毎メートル(kV/m)当たり約5マイクロアンペア発生する。

解説8-6

海外の低圧配電系統の場合、中性線の接地と機器のシャーシの接地を共有しているため、中性線の接地箇所を流れる電流による電圧降下によって、機器躯体と近くにいる人体との間に電位差が生じる場合がある。そして人体が機器に触れた場合、この電位差によって人体に接触電流が流れる可能性がある。

また、系統の接地を水道管で取ると、水道管を介して中性線の接地電流が流れることになり、上記と同じような作用によって水道の水栓部分に触れた際に接触電流が流れることがある。

一方、日本で用いられている低圧配電系統は、主として単相3線方式(+100ボルト、0ボルト、および-100ボルト)または三相4線方式($\frac{200}{\sqrt{3}}$ V、 $\frac{200}{\sqrt{3}}$ sin120° V、および $\frac{200}{\sqrt{3}}$ sin240° V/+100V、0V、および-100V)であり、このうち0Vの線(中性線)が、高/低圧変圧器の2次側で接地されている。また、系統途中の何箇所かで接地される場合もある(図8-4)。変圧器2次側での接地のみであれば、接続されている機器側での漏電事故などが無い限り、接地線を通じた電流が流れることはない。また、複数接地がある場合には、中性線を流れている電流が接地極間を分流する場合があるが、水道管などの金属に直接接地を取ることがまれであるため、このような電流は一般的にきわめて小さい。

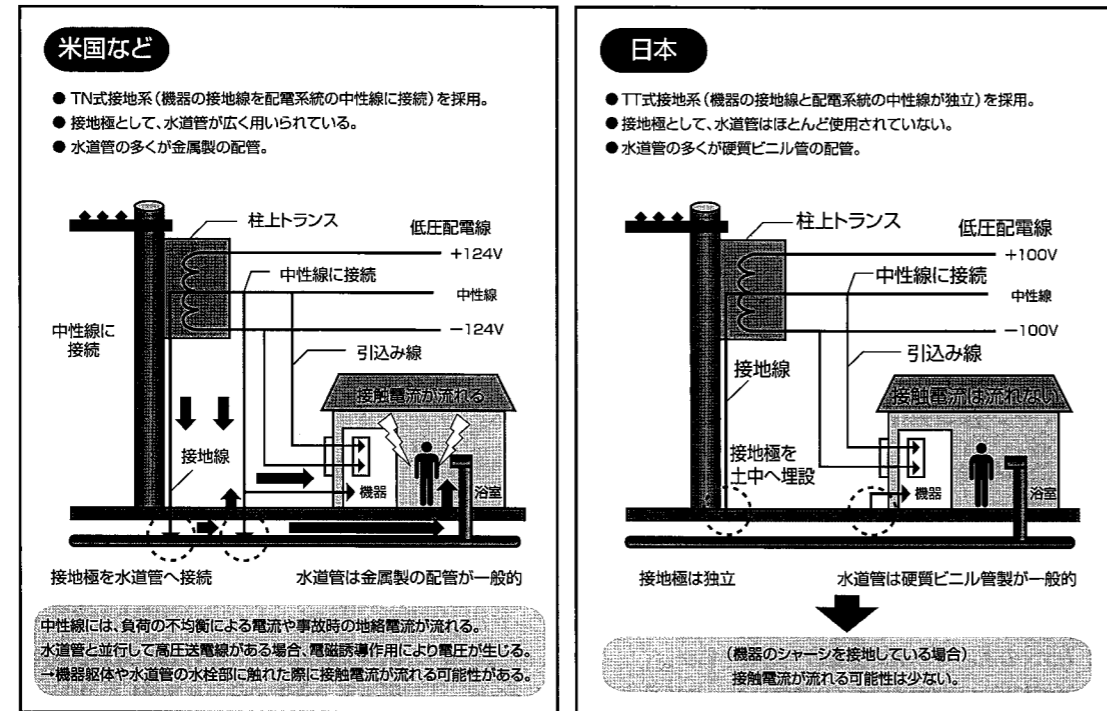


図8-4. 水道管を介した接地電流に起因する接触電流のイメージ

(志賀 健、世森 啓之)

電磁波のエネルギー

電磁波を粒子として扱った場合のエネルギーは以下の式により求められる。

$$E = hf = h \frac{c}{\lambda} = \frac{1.24 \times 10^{-6}}{\lambda} [eV]$$

h : プランク定数 (6.62×10⁻³⁴J・s)
f : 波数
λ : 波長
c : 光速 (3×10⁸m/s) である。

上の式から分かるように、エネルギーは波長が長いほど(すなわち周波数が短いほど)小さい。商用周波数50ヘルツでは波長が6,000キロメートルと極めて長いので、エネルギーとして化学結合を切断する能力はない。比較として、波長1.0ナノメートルのX線の場合は1,200eVのエネルギーがあり、電離作用により化学結合を切断する能力がある。

電界、磁界ともに荷電粒子に対し力を与えることができる。生体内でみられる力の例として、内耳の有毛細胞(音の振動を感知する器官)の活動では1ピコ²⁴ニュートン(pN)、細胞膜のイオンチャンネルを開閉するのに100ピコニュートンの力が必要であると推定されている。細胞膜で10億の分子を仮定した場合、外部電界で1ピコニュートンの力を発生させるためには10¹⁰Vm⁻¹の電位差が必要であり、磁界では10マイクロテスラの場合が必要となる。

表8-3. 粒子としてのエネルギーの比較

| | 波長 | エネルギー(eV) |
|-----------|----------|---------------------|
| X線 | 1.0 nm | 1,200 |
| 紫外線 | 100 nm | 12 |
| 可視光線(青色) | 500 nm | 2.5 |
| 赤外線 | 10 μm | 0.12 |
| 送電線(50Hz) | 6,000 km | 2×10 ⁻¹³ |

解説8-10

表8-4に、1キロボルト毎メートル、0.1マイクロテスラの電界と磁界が外部から加わった場合に生体内の構成分子に働く力を示す。このように環境で見られる電界のレベルと磁界による力は非常に小さいことがわかる。外部から加わる電磁界によって生体内に変化を生じさせるには、電磁界によって生じた力は極めて小さな値であるといえる。

表8-4. 生体に働く外部50/60Hz電磁界 (Valberg 1997より)

| 電磁界による力 | 力(pN = 10 ⁻¹² N) |
|-----------------------------|-----------------------------|
| 10億の荷電分子に働く電界(1kV/m)による力 | 6×10 ⁻¹¹ pN |
| 細胞膜内分子への60 Hz、0.1 Tの磁界が与える力 | 2×10 ⁻⁶ pN |
| 磁界、0.1 mTの磁界による10億の分子に働く力 | 1×10 ⁻⁷ pN |
| 生体内でみられる力 | |
| 内耳の単一有毛運動細胞の活動 | 1 pN |
| 微小管に働くキネシン1分子 | 3 pN |
| 細胞膜イオンチャンネルを開閉するのに必要な力 | 14 pN |
| 静止電位、50mVの細胞膜での10億の荷電分子 | 16 pN |
| バクテリア、鞭毛のモーター(10nm半径)で生じる力 | 100 pN |

(清水喜久雄)

参考文献

- 電力設備電磁界対策 WG 報告書、資料(経済産業省 原子力安全・保安部会)
- 電磁場ばく露に関する調査研究報告書(平成9年度~平成14年度総括報告書)、中央労働災害防止協会労働衛生調査分析センター
- 電力周波数の電界により人体モデル頭部脳内に誘導される電流密度分布、千葉・伊坂、電学論B, 118巻6号 平成10年 T.IEE JAPAN, Vol.118-B, No.6, 627
- 加熱調理器近傍の加熱周波数磁界の測定と人体誘導電流推定、鈴木・多氣、電気学会論文誌、基礎・材料・共通部門誌、Vol.A-125, No.5, pp.427-433 2005

²³ ナノ(n)=10⁻⁹
²⁴ ピコ(p)=10⁻¹²

 おわりに

(財)大阪科学技術センターでは、1997年度に商用周波数電磁界の人の健康への影響に関して、それぞれの専門分野の学識経験者を中心に「電磁界(EMF)に関する調査研究委員会」を設置し、内外の情報収集やデータの分析を行ってきた。

この間、1999年度は解説書として「電磁界遊泳」を、2000年度には中・高校教員を対象にした解説書「電磁界環境と健康影響～調査・研究の現状と動向～」とQ&A方式の簡易解説書を完成させ、2001年度からはこれら解説書を利用して正しい知識の普及を図ってきた。

2003年度には疫学の専門分科会を設置し、疫学に関する知見の蓄積を図るとともに、中・高校教員を対象にした解説書「超低周波電磁界に関する疫学研究の現状と課題」をまとめ、その後、一般向けのパンフレット「電磁界の健康影響について～電磁界の安全性を確かめる研究の現状～」を作成した。

2004年度には「WHO国際EMFプロジェクト動向調査分科会」を設置し、世界保健機関(WHO)による環境保健基準(EHC)の公表後に予想される社会不安の高まりや予防原則適用要求などの社会反響に対応すべく、情報の収集および分析活動を進めてきた。

また、様々な科学イベントなどの機会を利用して、科学的実験などを行い、電磁界に対する理解の促進を図ると共に、その実験・工作メニューの検討を行っている。

2007年6月にWHOが電磁界の健康影響に関する評価活動の一環として、詳細な報告書(環境保健クライテリア238とファクトシート322)を公表した。この報告書では、超低周波電磁界の健康リスク評価として、これまでの国際がん研究機関などの国際機関の報告を全面的に支持する内容であり、居住環境に存在する電磁界の危険性は指摘されていない。これを受けて今回、電磁界調査研究委員会ではWHOから発信される情報の分析・整理を行い、高校の理系教員、電気・電力の理系研究員、オピニオンリーダーを対象に解説書「超低周波電磁界の健康影響-WHO環境保健クライテリアの意味するもの」を発行することとなった。

一方、国内においては、WHOの報告書の公表を受け、経済産業省では、電力設備電磁界対策ワーキンググループを2007年6月に電力安全小委員会の下に設置し、実効的な対策方法について議論が行われた。

その結果、国際非電離放射線防護委員会が1998年に定めた一般の人々へのばく露ガイドラインの制限値(参考レベル)(100マイクロテスラ(50ヘルツ)、83マイクロテスラ(60ヘルツ))を基準値として採り入れるべきとの提案があった。また、低レベルの磁界による健康影響について科学的な知見を踏まえた対処として更なる研究プログラムの推進とともに、リスクコミュニケーション活動の充実が期待されている。磁界ばく露による健康影響に関わる正確な知識が、国民に正しく伝わっていないことから生じる問題の解消には、リスクコミュニケーションの増進を目的とした、中立的な常設の電磁界情報センター機能の構築が必要であるとされている。

ワーキンググループの報告を受け、経済産業省において、電磁界情報センター構想の検討が行われ、2008年11月4日に、(財)電気安全環境研究所(JET)内に「電磁界情報センター」(所長=大久保千代次氏・明治薬科大学大学院客員教授)が設立された。

電磁界（EMF）に関する調査研究委員会委員（順不同）

| | | | |
|----------|--------|---------------------------|-------|
| 委員長 | 山本 幸佳 | 大阪大学 | 名誉教授 |
| 委員・幹事 | 志賀 健 | 大阪大学 | 名誉教授 |
| 委員・幹事 | 飯田 敏行 | 大阪大学 大学院工学研究科電気電子情報工学専攻 | 教授 |
| 委員・幹事 | 武部 啓 | 近畿大学 原子力研究所 | 特別研究員 |
| 委員・幹事 | 伊坂 勝生 | 徳島大学 | 名誉教授 |
| 委員・幹事 | 西澤 邦秀 | 名古屋大学 | 名誉教授 |
| 委員・幹事 | 内藤 克彦 | 名城大学 | 名誉教授 |
| 委員・幹事 | 鏡森 定信 | (独)労働者健康福祉機構 富山産業保健推進センター | 所長 |
| 委員・幹事 | 辻本 忠 | (財)電子科学研究所 | 専務理事 |
| 委員・幹事 | 木下 富雄 | (財)国際高等研究所 | フェロー |
| 委員・幹事 | 樋脇 治 | 広島市立大学 大学院情報科学研究科 | 教授 |
| 委員 | 竹下 達也 | 和歌山県立医科大学 医学部公衆衛生学教室 | 教授 |
| 委員 | 原 純一 | 大阪市立総合医療センター | 副院長 |
| 委員 | 土田 昭司 | 関西大学 社会学部 | 教授 |
| 委員 | 清水 喜久雄 | 大阪大学 ラジオアイソトープ総合センター | 准教授 |
| 委員 | 駿地 真由美 | 追手門学院大学 心理学部心理学科 | 准教授 |
| 委員 | 王 紅兵 | 広島大学 医学部 公衆衛生学 | 助教 |
| オブザーバー委員 | 宮越 順二 | 弘前大学 大学院保健学研究科 | 教授 |
| オブザーバー委員 | 小田 啓二 | 神戸大学 大学院海事科学研究科 | 教授 |

執筆者（順不同）

| | |
|---------|-------------------------|
| 山本 幸佳 | 大阪大学名誉教授 |
| 志賀 健 | 大阪大学名誉教授 |
| 武部 啓 | 近畿大学原子力研究所特別研究員 |
| 竹下 達也 | 和歌山県立医科大学教授 |
| 原 純一 | 大阪市立総合医療センター副院長 |
| 清水 喜久雄 | 大阪大学准教授 |
| 大久保 千代次 | 電磁界情報センター所長 |
| 世森 啓之 | 電磁界情報センター情報調査グループマネージャー |

発行 財団法人 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

〒550-0004
大阪市西区靱本町1丁目8番4号
電話 06-6443-5320

2009年1月 第1版
2009年10月 第2版

本冊子の一部または全部の無断転載を禁じます。