

科学的検証から電磁界の健康問題を考える

弘前大学大学院保健学研究科* 宮越 順二

I. はじめに

近年、電磁界曝露**の人体への影響、特に発がんに対する影響の有無について活発に議論されている。生活環境には、家電製品の発生する電磁界はもちろんのこと、医療におけるMRIや電磁界加温装置、また変電所や送電線下の交流磁界など、地球上の自然界に存在する以上の電磁界に曝される機会が増している。我々が現在から将来にかけて生活環境中曝される可能性が高いのは、医療の診断におけるMRIの強定常磁界や主として商用周波数領域における変動磁界、つまり極低周波(ELF: Extremely Low Frequency) 変動磁界、そして最近の普及ぶりが目覚ましい携帯電話を代表とした高周波領域の電磁界(主として我が国では900MHzおよび1.5GHz)やIHクッキングヒーターからの中間周波数帯電磁界(数10kHz)である。

電磁界の生体影響を評価する上で、疫学と生物研究の間で必ずしも一致した結果が得られているわけではない。電磁界生体影響研究に用いられている磁束密度は、居住環境における影響を主眼にしているため、その曝露レベルの多くは非常に低いものである。そのため、短時間曝露で細胞に対する顕著な影響が認められないのも当然かも知れない。このことは、放射線生物学の分野で取り扱っている低線量放射線の生体影響研究の難しさと非常によく似ているようにも思われる。表1に、電磁界の生体影響の主な評価指標をまとめた。本

稿では、これまでの科学的検証を基に、ELFを中心として電磁界の健康影響について解説する。

表1 電磁界生体影響の主な評価指標

研究分類	対象	評価指標
インビトロ (In vitro) 研究	細胞	細胞増殖、DNA合成、染色体異常、染色分体異常、微小核形成、DNA鎖切断、遺伝子発現(タンパク発現)、シグナル伝達、イオンチャンネル、突然変異、トランスフォーメーション、細胞分化誘導、細胞周期、アポトーシス、マイクロアレーを用いたヒト遺伝子発現など
インビボ (In vivo) 研究	実験動物 (ラット、 マウスなど)	発がん(リンパ腫、白血病、皮膚がん、乳腺腫瘍、肝臓がんなど)、生殖や発育(着床率、胎仔体重、奇形発生など)、行動異常、メラトニンを主とした神経内分泌、免疫機能など
疫学研究	ヒト	発がんやがん死亡(脳腫瘍、小児および成人白血病、乳がん、メラノーマ、リンパ腫など)、生殖能力、自然流産、アルツハイマー症など
人体影響	ヒト	心理的・生理的影響(疲労、頭痛、不安感、睡眠不足、脳波、心電図、記憶力など)、メラトニンを主とした神経内分泌、免疫機能など

II. 細胞実験研究

これまでのほぼ全ての報告では、磁束密度の大きさに関係なくELF電磁界の曝露により細胞が致死に至ることは観察されていない。また、細胞増殖の変化についてもその成長曲線で比較した報告

* 〒036-8564 弘前市本町66-1

** “電磁場や電磁波”と表記する場合もあるが、ここでは“電磁界”で統一する。また、放射線分野では“照射”を用いているが、非電離の分野では一般的に“曝露”を用いているので、ここでは“曝露”表現に統一する

では、電磁界の影響として有意な効果は認められていない。

これまでmT*オーダー以下の磁束密度における変動電磁界曝露の影響として、多くの研究者により、染色体異常の頻度が調べられている。総合すると、 μ Tレベルの比較的低密度の電磁界では、染色体異常の上昇は観察されていない。数mT以下の磁束密度のELF電磁界曝露により細胞の染色体異常が引き起こされる可能性は、無視できるかまたは非常に低いものと考えられる。一方、ELF電磁界のエネルギーでは、物理的に直接DNA鎖切断を引き起こすとは考えられない。実際、これまでの研究成果から細胞にELF電磁界を連続曝露しても一本鎖切断は観察されていない。ただ、ヨーロッパでの一部の研究で、数10 μ TのELF間欠曝露で細胞の小核形成頻度が上昇するという情報もあるが、これまでに再現はされていない。

ELF電磁界の遺伝子レベルにおける影響で、これまで活発に議論されてきた分野の1つとして、遺伝子発現があげられる。とくにがん遺伝子の1種であるc-mycの転写について研究されてきた。c-myc遺伝子は細胞の増殖に深く係わっており、増殖因子などの刺激により、その転写活性が一過性ではあるけれども高まることで知られている。一部の研究で陽性効果が報告されたが、再現実験の結果、ELF電磁界曝露によりc-myc遺伝子の発現増強は観察されていない。ストレス反応として、特に熱ショック蛋白質 (HSP)の発現に関して、その電磁界による増強効果が報告され、電磁界の細胞に対するストレスという観点から議論されている。ELF電磁界によるHSPの発現については、陰性と陽性の報告が共にあり、この点については、研究方法の違いもあり、現時点で結論づけるのは難しいと考える。ちなみに、著者らの研究結果では、ストレスタンパクHSP70については、ELF電磁界による発現の増強は観察されていない。

以上述べてきたELF電磁界の細胞レベル評価に加えて、詳細は関連資料を参照されたい^{1), 2)}。

世界的に携帯電話の利用は飛躍的に伸び、この高周波電波の生体に対する影響について、国際的議論が活発に行われている。高周波に対する生体影響評価研究は、その多くは現在進行中であるが、細胞レベルにおいては、これまでに比較的論文報告もなされている。高周波の場合、現時点で、線量の考え方として、specific absorption rate (SAR: 比吸収率、単位は W/kg^{-1})や面積当たりのワット数 ($W \cdot m^{-2}$)を採用して議論が行われている。中間的評価であるが、これまでの研究成果から、電波による熱効果のないレベルでは、多くの報告は高周波の影響に否定的である。

III. 動物実験研究

ELF電磁界生体影響評価の一環として、マウスやラットを用いた動物実験での検証が1990年代を中心として、数多く進められてきた。多くの動物実験研究では、そのほとんどが発がんへの影響を検討するものだったが、その他、生殖に関するもの(特に胎子の発育や催奇形性について)、神経系に関するもの(特に行動や感覚機能について)や免疫機能に関するものも行われてきた。もし、電磁界曝露が発がん過程に影響を及ぼしているとするれば、ELF電磁界曝露がイニシエーション、または、プロモーション過程に影響しているかどうか、大きな議論とされてきた。このような観点から、動物を用いたELF電磁界曝露実験はイニシエーション/プロモーションモデルで行われてきた。検討されたELF電磁界の磁束密度は数 μ Tから1mTまで幅広く行われ、白血病、乳腺腫瘍、脳腫瘍、皮膚がんなどを中心として調べられた。結果として、ごく一部の研究において、ELF電磁界曝露により白血病や乳腺腫瘍の増加を認める報告があったが、ほとんど多くの研究結果は、ELF電磁界による発がん影響はないという陰性結果であった。発がん以外の研究(生殖、行動、免疫など)に関する結果も同様で、ほとんどの報告がいわゆる「影響なし」であった。従って、これまで行われてきた動物実

* 1 mT (ミリテスラ) = 10 Gauss (ガウス)

験からの検証において、明確なELF電磁界の影響は見られておらず、「影響あり」とする十分な証拠はない^{1), 2), 3)}。

1997年にトランスジェニックマウスを用いて、電波により白血病が増加するという報告があり⁴⁾、2000年代に入り高周波電波の発がんへの影響評価も活発に行われている。欧米や我が国を中心として動物実験研究が推進されてきている。これまでの研究報告からは、そのほとんどの結果は、動物の発がんをはじめ、体重や寿命に関して電波の影響を認めていない⁵⁾。ただ、多くの研究は現在進行中であり、まだ確定した結論には至っていない。前述のトランスジェニックマウスの陽性結果についても、再現実験が行われている。

IV. 疫学研究

疫学研究は、細胞や動物実験に比べて、ヒトのデータという意味で一般社会に対する影響力は大きいものがある。しかしながら、その反面、人々はいろんな環境で生活しており、研究の主題となる因子について純粋に調査することは不可能であり、結果を左右しかねない集団の選別方法や他の影響因子（選択バイアスや交絡因子という）が統計的評価を狂わす可能性は排除できない。前述したように、低周波電磁界の発がん影響を初めて指摘したのは、1979年の疫学研究報告である⁶⁾。その後、国際的な議論が高まる中、1990年代には、欧米で数多くの低周波電磁界に関する疫学研究が実施された⁷⁾。2000年に入って、我が国でも国立環境研究所のとりまとめで、この分野の疫学研究が初めて行われた⁸⁾。

図1は、低周波電磁界（正確にはELF磁界）と小児白血病の発生について、9カ国の疫学研究をまとめたものである⁹⁾。解析結果は、0.4 μ T未満（ほぼ99.2%の家庭が対象となる）の生活環境に住んでいる子供の低周波磁界曝露と白血病発生リスクとの間には関連性がなく、「影響なし」と考えられる。しかしながら、居住環境の低周波磁界レベルが0.4 μ T以上の場合（約0.8%の子供が対象となる）、白血病の相対リスクがほぼ2倍に増加し、こ

れら疫学研究のプール分析の結果では、統計的な有意性があることを示している。我が国での疫学研究結果もほぼ同じような傾向を示している。なお、小児の他のがんや成人のがんに関する疫学研究結果からは、低周波電磁界の「影響はない（関連性が認められない）」と考えられている。この疫学研究での小児白血病増加という結果について、これまでのところ生物学的な作用機構は明らかではなく、また、前述した、疫学研究結果の精度を下げる選択バイアスや交絡因子の可能性も完全には否定できないと考えられている。

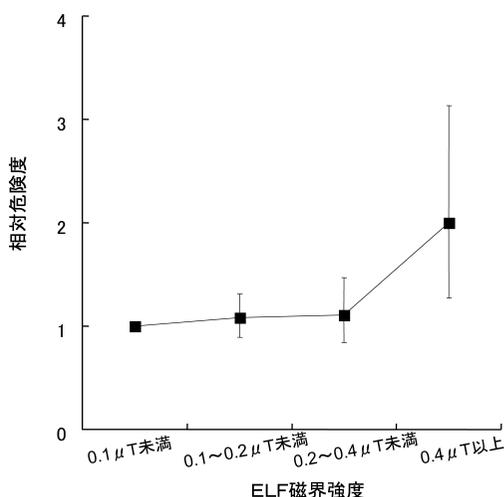


図1 9カ国の小児白血病の症例対照研究プール分析

一方、携帯電話を対象とした高周波電波に関する疫学研究も現在進行中である。世界保健機関(WHO)の下部組織、国際がん研究機関(IARC)がとりまとめる形で、日本、イギリス、スウェーデンなど13ヶ国（ただし米国は不参加）が参加して「The INTERPHONE Study」として行われた。疾患対象として、聴神経腫瘍ならびに脳腫瘍が選ばれ、症例-対照研究(case-control study)で実施された。一部の研究は個別に発表され、「影響あり」とする報告では、例えば、10年以内の携帯電話使用では影響は認められないが、10年以上の長期使用で、わずかにリスクの増加が認められている^{10), 11)}。現在、IARCでは参加国全ての研究をとりまとめている段階にあり、本国際共同研究の最終結論と報

告はこの秋から2009年にかけて行われる見込みである。

V. 電氣的（電磁）過敏症

ここ数年、電磁界に敏感で体調の不良を訴えている人々が世界的に増している。マスコミなどでは、いわゆる「電磁波過敏症」と称しているが、正確には、WHOは「電氣的（電磁）過敏症（EHS: electrical hypersensitivity）」と呼んでいる。微弱な電磁界に曝されると、皮膚症状（発赤、灼熱感など）や自律神経系症状（頭痛、疲労感、めまい、吐き気など）が現れる。原因と考えられる電磁界に、特別な周波数帯はなく、低周波でも高周波でも起こりうるらしい。

1990年代後半あたりから、欧米の一部の病院でこの過敏症患者のケアが行われている。特に北欧で患者数が多いとされている。WHOは、2004年に、チェコのプラハ市でEHSのワークショップを開催し、筆者も出席した¹²⁾。EHSは化学物質過敏症（いわゆるシックハウス症候群など）とは異なると考えられている。現時点でEHSに関する科学的データは極めて少なく、情報も不十分である。ヨーロッパのいくつかの病院で、自覚を持つ「患者」に盲検法（患者はいつ電磁界に曝されたかわからない）でその因果関係を調査してきたが、これまでのところ電磁界との関連性は認められていない。

未解明ながらもWHOは電氣的（電磁）過敏症の存在を認知しており、今後、国際的な共同研究を推奨している。一方、我が国では、電氣的（電磁）過敏症の認知もなく、自覚を持つ「患者」の方々は受け入れてくれる病院を探すのに苦慮している。また、科学的証明がないことで、電磁界に対する極度の不安から発症している可能性も一部には考えられている。現時点では、国際的な統一見解も無く、生活環境の電磁界利用がますます高まる中、生命科学や臨床医学の分野で取り組むべき将来的な重要課題の1つであると考えられる。

VI. 国際機関の発信と科学的検証

国際機関におけるELF電磁界生体影響評価につ

いては、2001年6月にIARCで、2005年10月にWHOで、各国からの委員が参加して行われた。筆者も両方の会議に評価委員として参加した。発がんやその他の健康影響についてのこれら機関の評価はすでに出版公表されている。^{13), 14)} 結論としては、生体影響評価について白黒を明確につけるものではない。これは前述したように影響はないだろうとする実験科学の評価とヒト疫学研究で有意性のある1つの疾患についての評価がぶつかって、灰色にしているものである。この結果を受けて我が国でも、経済産業省・原子力安全・保安院は、超低周波電磁界の規制に向けた議論をスタートさせた。結論はまだ見えていないが、まず正確な科学的情報を国民に伝えるための中立的「情報センター」が設立準備され、この11月から正式に発足する予定である。灰色の世界をどのように説明するか？ その受け止め方によっては、白に近くなったり、黒に近くなったり、難しい仕事である。ただ、このような国際的評価を基に、一般の人々に正しい理解を持ってもらう、いわゆるリスクコミュニケーションの重要性は極めて大きいものである。これまで長く電磁界問題に携わってきた筆者としては、情報センターの順調なスタートとその役割に期待してやまない。

一方、高周波電磁界については、多くの研究が進行中でもあり、IARCやWHOもその評価には、まだ時間がかかりそうである。

VII. まとめと将来展望

これまでのELF電磁界の生体影響研究（リスク評価）については、居住環境レベルの磁束密度における電磁界影響は非常に小さいものであろうと考えている。高周波電磁界に関しては、現在進行中ではあるが、規制されているレベル以下のSARにおいて、細胞・動物レベルでは、これまでに複数の研究室で確認された陽性効果はない。ただ、ELF電磁界で、非常に高い磁束密度の電磁界曝露は、放射線や化学物質などの複合曝露により、修飾的に働いている可能性が示唆されていることは追記しておきたい。一方、これまでの数多くの研究

結果は、居住環境レベルのELF電磁界を曝露しても、細胞や遺伝子レベルにおいて有意な変化としてその影響を捕らえることは、非常に困難であることを示している。つまり、 μ Tオーダーの極めて低い磁束密度のELF電磁界が、細胞に対して何か大きな変化をもたらしているとは考えにくい。

現在、我々の生活環境には人工的電磁界の発生源が数多く存在する。このような背景を考えた場合、医学・生物分野と工学分野それぞれが協調体制をもって、電磁界の生体影響研究をさらに推進して行かなければならないと感じる。生体電磁界研究の動きは、高周波やより強い定常磁界の影響研究が進められている。さらに医学分野（MRIやMRAなどの診断ならびに低周波・高周波を利用した治療）や工学分野（運輸、通信、発電など）をはじめとして、さまざまな分野で電磁界利用研究も行われている。21世紀は電磁界の時代でもあり、電磁界に関する生命科学のさらなる推進が望まれる。

末筆ながら、一科学者として、筆者自身は、機会あるごとに、これまでに明らかにされた科学的検証の結果をよりわかり易く紹介し、さらに未解明なものは未解明であることを正確に伝えるように努めている。その一方、電磁界と生体の応答解明を長年研究してきた経験から、環境レベルの低い強度の電磁界応答には生命科学の限界さえも感ずる。このように科学者としての努力もさることながら、正確で、かつ、お互いの理解が深まるリスクコミュニケーションの重要性をさらに痛感する。

(参考文献)

- 宮越順二：電磁波に対する健康影響評価の現状および国際動向。保健物理 40：242-256, 2005
- 宮越順二（編者）：電磁場生命科学。京都大学学術出版会、2005
- Kato M (Ed.): Electromagnetics in Biology. Springer, Japan, 2006
- Repacholi MH, et al: Lymphomas in E-*Piml* transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields. Radiat Res 147: 631-640, 1997
- Moulder JE, et al: Mobile phones, mobile phone base stations and cancer: a review. Int. J. Radiat. Biol. 81: 189-203, 2005
- Wertheimer N, et al: Electrical wiring configurations and childhood cancer. Am J Epidemiol 109: 273-284, 1979
- Kheifets L, et al: Review; Childhood Leukemia and EMF: Review of the Epidemiologic Evidence. Bioelectromagnetics Supplement 7: S51-S59, 2005
- Kabuto M, et al: Childhood leukemia and magnetic fields in Japan: a case-control study of childhood leukemia and residential power-frequency magnetic fields in Japan. Int J Cancer 119: 643-650, 2006
- Ahlbom A, et al: A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia. Br. J. Cancer, 83: 692-698, 2000
- Lönn S, et al: Mobile phone use and the risk of acoustic neuroma. Epidemiology 15: 653-659, 2004
- Schoemaker MJ, et al: Mobile phone use and risk of acoustic neuroma: results of the Interphone case-control study in five North European countries. Br J Cancer 93: 842-848, 2005
- <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs296/en/index.html>
- WHO: WHO-IARC Monograph on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Vol. 80, Part1, Static and Extremely Low-frequency Electromagnetic Fields. 2002
- WHO: Extremely Low Frequency Fields- Environmental Health Criteria N° 238-, 2008