

電磁界と健康 ～細胞・動物研究～

宮越 順二

弘前大学・大学院・保健学研究科

I. はじめに

近年、電磁界曝露（“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、非電離のこ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）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。我々の生活環境には、家電製品の発生する電磁界はもちろんのこと、医療現場における MRI や加温装置、また変電所や送電線下の交流磁界、さらに将来に実現性があるリニアモーターカーや超電導電磁推進船など、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、近年磁束密度が 1.5T よりさらに高まる傾向にある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 10 kHz）である。

電磁界の生体影響を解明する上での生物学的には、必ずしも一致した結果が得られてきているわけではない。細胞レベルで考えた場合、多くの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、細胞・動物レベルで、これまで研究が行われてきている電磁界の生体影響の主な評価指標をまとめた。本講演会では、主として ELF に関する細胞・動物レベルの影響研究を紹介し、高周波研究は、その多くが現在進行中のものであり、比較的多い細胞レベルの研究について簡単に現状を紹介する。

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
細胞実験研究	細胞	細胞増殖、DNA 合成、染色体異常、姉妹染色分体異常、小核形成、DNA 鎖切断、遺伝子発現、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、アポトーシスなど
動物実験研究	実験動物 (ラット、マウスなど)	発がん(リンパ腫、白血病、脳腫瘍、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

II. 細胞や遺伝子レベルにおける ELF 電磁界の影響

①細胞増殖

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。

②遺伝毒性

これまで変動電磁界曝露の影響として、多くの研究者により、染色体異常ならびに姉妹染色分体交換 (SCE) の頻度が調べられている。総合すると、マイクロテスラレベルの比較的低密度の電磁界では、染色体異常や姉妹染色分体交換頻度の上昇は観察されていない。数ミリテスラ程度の磁束密度の 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、最近のヨーロッパでの一部の研究で、数十マイクロテスラの 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り、WHO も再現実験の必要性を強調している。

ELF 電磁界曝露による突然変異の誘発に関してはあまり報告がなく、起きないであろうとされてきた。ところが、400mT（生活環境における磁束密度に比べて少なくとも 10 万倍以上という非常に高いものである）という極めて高磁束密度の ELF 電磁界曝露により、突然変異が増加することを著者らは見いだした。ただ、マイクロテスラレベルでは、突然変異は観察されていない。

③遺伝子発現

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、影響があるという報告と影響がないという報告が共にある。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。

III. 高周波電磁界の細胞に対する影響

近年、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、始まってまだ浅いが、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。ただ、前述したとおり高周波に対する生体影響研究は国際的に現在進行中であり、遺伝毒性や遺伝子発現を中心として、これまでの細胞に対する影響研究について紹介する。また、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 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) を採用して議論が行われている。紙面の関係上、詳細は講演にて紹介する。

IV. 動物実験からの ELF 電磁界影響評価

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（特に胎仔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 μT 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」だった。従って、これまで行われてきた動物実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。

VII. まとめと将来展望

これまでの細胞や遺伝子レベルの研究結果から、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ない、または、非常に小さいものであらうと考えている。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が細胞に作用するその過程において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、マイクロテスラー 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、さらに医学分野（MRI、MRA、脳磁図や心磁図などの診断ならびに低周波から高周波を利用した治療など）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の電磁界利用研究に向かっている。21 世紀は電磁界の時代でもあり、電磁場生命科学のさらなる発展が望まれる。

（参考文献）

1. WHO-IARC, IARC Monograph on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. **Vol. 80**, Non-Ionizing Radiation, Part 1, Static and Extremely Low-frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields. IARC *Press*, Lyon, France (2002)
2. WHO: Extremely Low Frequency Fields Environmental Health Criteria Monograph **No. 238**, (2007)
3. 電磁場生命科学（宮越順二編集）、京都大学学術出版会, (2005)