

9 章 健康リスク評価

本章では、静電界あるいは静磁界への曝露が人間の健康に及ぼす可能性のある影響を、疫学および生物学的データのレビュー、ならびに上述の章で示した曝露に関する情報から評価する。

9.1 静電界の影響

静電界は大気中に自然に発生する。雷雲下では 3 kV m^{-1} までの静電界が発生することがあるが、晴天下では通常 100 V m^{-1} 程度である。人間の曝露の最も一般的な原因は、摩擦による電荷の分離である。例えば、非導電性のカーペットの上を歩いた場合、数キロボルトの帯電電位が蓄積して、局所的に 500 kV m^{-1} までの電界が発生する可能性がある。直流 (DC) 送電は 20 kV m^{-1} までの静電界強度を発生させる可能性があり、直流を使用している鉄道システムは列車内で 300 V m^{-1} までの電界を、また VDU は 30 cm の距離で $10 \sim 20 \text{ kV m}^{-1}$ 程度の電界を発生させる。

静電界は人体のような導電体に浸透しない。静電界は表面電荷を誘導し、常に人体面に垂直である。十分に大きい表面電荷密度は、体毛との相互作用および火花放電（マイクロショック）のような他の作用によって感知できることもある。人間の感知閾値は様々な要素に依存し、その範囲は $10 \sim 45 \text{ kV m}^{-1}$ の間である。このような感覚からの不快感の閾値についても同じく差異があると思われるが、これに関する系統的な研究はこれまでなされていない。地面から十分に絶縁されている人がアースされた物体に触れた時、あるいはアースされた人が地面から十分に絶縁された導電体に触れた時には、痛みを伴うマイクロショックを受けることがある。但し、その静電界の閾値は絶縁の程度ならびに他の要素によって大きく異なる。

これまでに数種類の動物について静電界の影響調査が実施されている。それらの結果は総体的に、曝露が健康への悪影響と関連していることを示唆していない。

静電界曝露の慢性的あるいは遅延的影響について何らかの結論を出すために行われた研究はない。IARC（国際がん研究機関）(2002)は、静電界の発がん性について結論を出すには証拠が不十分であると述べている。

9.2 静磁界の影響

地球の表面の地磁気はおよそ $35 \sim 70 \text{ } \mu\text{T}$ までの幅があり、それはある種の動物の方向決定および渡りと関係している。直流が使用される所、例えば電力使用の輸送システム、アルミニウム生産などの産業プロセス、アーク溶接の現場では、必ず人工的な静磁界が発生する。電車内部や近代的な磁気浮上 (MagLev) システムでは 2 mT までの磁束密度が報告されている。溶接ケーブルの近くに 5 mT 程度の磁界があるアーク溶接の現場作業員や、約 60 mT までの磁界に遭遇する酸化アルミニウム電解還元現場では、作業員はより大きな磁界に曝露される。

1970年代および1980年代における超電導体の出現は、MRI (磁気共鳴画像法) と MRS (磁気共鳴分光法) の開発を通じて、医学診断でのより大きな磁界利用を促進した。世界中で約2億のMRIスキャンが実施されたと推定されている。スキャナーの大半は1~3 Tで操作されており、MRI曝露にはパルス磁界および無線周波の界が含まれている。一般的に、オペレータの制御盤での磁束密度はわずか0.5 mTであるが、これより高いかもしれない。但し、これらの装置の組立て、検査、保守、ならびにMRI内で行われるある種の医療処置の際に、1 Tを上回る職業曝露が発生する可能性がある。7~8 Tの機器が少数の現場に設置されており、2003年には初めて9.4 TのMRIシステムが設置された。これらはどちらも一層高い曝露と関連している。各種の研究調査や高エネルギー技術も超電導体を採用しており、そこでの作業者は2 T程度の界に最大で1日数時間まで繰り返し曝露される可能性がある。

静磁界への曝露の影響を評価する上での大きな困難は、関連のデータが少ないことである。特に、1 Tを上回る磁界に曝露される人々の長期的な健康影響の可能性についての研究はほとんどない。そのような影響があるかどうかは、まず最初に、物理的な相互作用メカニズムの考察から評価することができる。大きく次の3つの影響が認められる。それはa) イオン伝導電流との電気力学的相互作用、b) 磁気機械学的影響（これには均一な界における磁氣的に異方性を持つ構造の方位決定、および磁界勾配における常磁性と強磁性の材料の移動 (translation) が含まれる）、c) ある種の代謝反応におけるラジカルペア中間生成物の電子スピン状態への影響である。大部分の生体物質の磁気感受性は非常に小さく、2番目の影響は一般的に弱い相互作用を示すので、有意となるのはたいいてい磁束密度が1 Tを上回る場合である。

イオン電流は、運動する電荷担体にローレンツ力が働き、誘導電界の上昇と、この運動に対抗する力を生じることにより、静磁界と相互作用をする。このような過程の例には、血流に関連するイオン電流や、細胞膜のチャネルを通じたイオンの移動がある。イオンチャネルにおけるイオンの移動との有意な相互作用の閾値は24 T程度と考えられている。但し、計測可能な流動電位 (flow potentials) は0.1 T以上の界で心臓周囲の主要血管で発生する。この生理学的意義は以下で検討する。より高い磁束密度では、血流に対抗する磁気流体力学的力は生理学的に有意となる可能性がある。

静磁界勾配における全身あるいは目や頭など身体の一部の移動も、移動中に電界および電流を誘導する。曝露量の計算では、こうした誘導電界は2~3 T以上の電界の周囲またはその内部における通常の移動中に発生し、こうした電界の中を移動する患者、ボランティア、作業者が経験する、めまいや眼内閃光についての数多くの逸話的な報告の原因かも知れないと示唆されている。これらの影響については以下でより詳細に検討する。

磁界における磁気機械力学的相互作用が、磁気異方性を示す巨大分子および構造的に秩序だった分子集合体にトルクを加えると、これらを回転させる傾向を生じる。この作用はインビトロでは1 Tを上回る磁界で見ることができ、また磁気走性バクテリアや他の地磁気に敏感な生物の方位決定に重要な役割を果たしているかもしれない。これが人間の健康及ぼす影響は、仮にあるとしても、その重大性は明らかでない。磁気機械力学的相互作用の第2の主要なタイプは、静磁界の空間勾配における常磁性および強磁性物質の移動 (translation) である。但し、ほとんどの生体物質はほんの少し反磁性的であるにすぎない。例えば酸素を分離した赤血球など、弱い常磁性のものも少数あるが、そこに加えられる力は4 Tでも重力に比べると非常に小さい。強い磁界勾配では、金属工具のような強磁性体に加わる力は、それを加速することにより危険を生じる。特にMRIに関しては、ペースメーカーおよびその他の植込み型医療機器の正常な作動に対する電磁障害 (EMI)、ならびにこれらの機器およびその他の体内に植え込まれた金属物 (動脈瘤クリップなど) にかかる物理的力が問題となる。

いくつかの有機化学的反応では、反応中間体の電子スピン状態への影響の結果として、10～100 mT の範囲の静磁界の影響を受ける可能性がある。試験管内研究は、この種の代謝反応の一部は影響を受ける可能性があることを示している。フリーラジカルの濃度あるいは流出の変化により生じた磁界に起因する、生理学的結果への大きな影響、あるいは長期的な突然変異促進作用はありそうにないと考えられている。

9.2.1 生理学的反応

テスラ範囲の静磁界および磁界勾配への短期的曝露による急性の影響に関する機械論的考察ならびにボランティア研究から、次のような影響が指摘されている。心臓に近接している、または心臓内部の主要血管の周囲の流動電位 (flow potentials) ならびにこれらの血管内の抵抗の増加；高い静磁界勾配内での物理的移動に起因する人体への電位および渦電流の誘導、これは例えば、頭を動かした時のめまいや吐き気などの原因となる。後者の影響は、内耳前庭器官への磁気流体力学的影響のせいにもされてきた。

9.2.1.1 流動電位 (flow potentials) および血流低下

流動電位 (flow potentials) は移動中の電荷に働くローレンツ力によって生じ、動物およびヒトでは一般に、心室収縮および大動脈への血液の駆出に関連している。ローレンツの相互作用はまた血流に逆らう「磁気流体力学的」力となる。大動脈の血流の低下は、5、10 および 15 T でそれぞれ 1%、5%、10%程度と予想された。

理論上の考察では、冠状動脈の血流によって生じる流動電位は、大動脈に生じるものより生理学的有意性が大きいかもしれないということが示されている。流動電位が健康に及ぼす結果はあまりはっきりしていない。これには次の3つの可能性が考えられる。洞房ペースメーカー組織に作用して心臓の励起速度を変える、通常は内因的に活動しない異常部位での活動開始を誘導する、心室心筋を通して活動電位の伝播パターンを変える（これは不整脈につながることもある）。健康な心臓についての計算結果は、最初の2つの影響は 8 T を上回る閾値を持つことを示唆している。活動電位の伝播パターンを妨害することによって潜在的に致命的な再入性不整脈を起こす閾値を評価することは、さらに難しい。Chakares の論文 (2005 年) にはこれに関するいくつかの情報があるが、上記の計算は実験に基づく調査によって実証されたものでないことに留意することが重要である。

血圧と心拍の変化は、健康なボランティアを対象としたいくつかの研究で観察されているが、それ以外では観察されていない。観察された変化は通常の生理機能の範囲内であった。但し、入手可能な調査については手法上の限界があるので、これらのエンドポイントに対する静磁界の影響について結論を出すことはできない。

哺乳類についての調査は、心臓血管系が 8 T までの静磁界に曝露した時に影響を受けることを示す、またはこれに反する強い証拠を提供していない。

9.2.1.2 移動-誘導電位および関連の影響

MRI スキャナーに入ったりスキャナーの中で頭を動かしたりする際に発生するような、静磁界勾配内部での物理的移動は、一時的にめまいや吐き気、時には眼内閃光や金属のような味覚を引き起こすことが報告されている。これらの影響の発生は、磁界の勾配と被験者の動きに依存すると見られる。これらの影響は、約 2～4 T を上回る静磁界に曝露

されたボランティア、作業員、患者で報告されている。また、これらの結果は、4 T以上の静磁界への曝露後の実験用齧歯類に回避行動と条件付忌避の誘発が観察されたという、動物実験の結果とも一致する。

これらの影響は、それが一時的なものであるとしても、こうした磁界および磁界勾配の内部で人に悪影響を及ぼす可能性があると考えられる。入手可能な研究には、静止状態のボランティアの神経生理学的反応および認知機能に対して静磁界曝露の影響があるとは示されていないが、こうした影響を否定することもできない。ある研究は、1.5 TのMRI装置の近くの磁界内では、目と手の協調および近くを見る際のコントラスト感受性が低下すると示唆している。こうした影響の潜在的可能性は、難しい処置をする作業員(例えば外科医)の最善の遂行能力(optimal performance)に影響するので、明確にされなければならない。これらの影響を緩和するために、磁石の内部および周辺ではゆっくり移動するという措置が採られている。但し、こうした磁界内で働く人々に誘導される電界および電流については、明確には定義されていない。

9.2.1.3 その他の生理学的反応

循環系への影響については、何人かの研究者が、数テスラまでの(但し35~70 μ Tの地磁気と同程度に弱い場合もある)磁界への実験用動物の曝露は、皮膚の血流、動脈の血圧およびその他の心臓血管系パラメータにさまざまな影響を及ぼすと報告している。但し、こうしたエンドポイントは非常に変わりやすく、状況によっては薬理学的操作(一部のケースでは麻酔も含まれる)および固定化によって悪化していたかもしれない。

ラットでの数少ない研究では、短時間の臨床的MRI処置後に、血液脳関門の一時的なまたは弱い機能障害が生じる可能性があるとは指摘されている。現在のところ人間の健康へのリスクを評価するにはデータが不適切である。

静磁界がホルモン、特に松果体のメラトニンの生産と分泌に与える影響を研究している実験室がいくつかある。ある実験室からの複数の報告は、地磁気の水平成分の反転が松果体のメラトニンの合成と含有量に影響を及ぼす可能性があるとは示唆している。

これらの研究を独自に追試実験しない限り、確たる結論に達することは難しい。

9.2.2 生殖および発育

MRIを含む職場環境における静磁界への曝露が、生殖および発育に及ぼす潜在的影響について何らかの結論を出すには、疫学的研究からの利用可能な証拠が十分ではない。利用可能な数少ない研究には重大な手法上の限界がある。

哺乳類の生殖および発育への影響の可能性に関する研究は、ほとんどがヒトに関するものである。これらの研究では悪影響は明らかにされていないが、研究はわずかしかわれておらず、1 Tを超える環境で実施されたものが特に少ない。MRIについての研究は、全体的に見ると、決定的なものではない。動物の数は少なく、データは一定せず、影響はあったとしても、パルス化された勾配磁界、無線周波電磁界あるいはその他の潜在的ストレス因子の影響とのもつれを解くことは不可能である。

9.2.3 がんおよび遺伝毒性

静磁界への曝露によりがんのリスクが高まる可能性について、これまでに発表された少数の疫学的調査は、数多くの未解決の問題を残している。曝露評価は貧弱で、これらの調査の参加者数は非常に少ない。調査のほとんどはアルミニウムおよびその他の製錬プラントについて行われたものである。これらの調査が有益な情報を提供できないことは、一部の労働環境に存在する、より確立されているその他の発がん性要因について明確な証拠がないことによって支持されている。発がん性に関する動物研究からの証拠は、実施された調査の数が余りにも少ないので、決定的ではない。

公表済みの限られた数の動物実験からは、1 T未満の静磁界に遺伝毒性があるとの証拠はない。但し、ある研究は3あるいは4.7 Tの静磁界の曝露後に小核の発生頻度が上昇したことを報告しているが、この追試実験は行われていない。

インビトロ研究では、7 Tまでの静磁界曝露後の遺伝毒性の影響は検出されていない。静磁界曝露と既知の突然変異原との複合作用に関する調査では、多様な結果が示されている。遺伝毒性への相乗影響については、哺乳類の研究での確認なしには結論を出すことはできない。

9.3 結論

9.3.1 慢性および遅延性の影響

電界

静電界への曝露の慢性あるいは遅延性の影響について、何らかの結論を出すために行われた研究はない。IARC(2002)は、静電界の発がん性を決定するには証拠が不十分であるとしている。

磁界

静磁界に関しては、疫学的および実験研究から得られる証拠は、その長期的および遅延性の影響について何らかの結論を出すには十分でない。IARC(2002)は、静磁界の発がん性についてはヒトに関する不適切な証拠しかなく、実験動物から得られる関連のデータもないと結論付けている。したがって、現在のところヒトに対する発がん性は分類不可能である。

9.3.2 急性の影響

電界

静電界の影響については少数の調査が実施されている。調査結果は全体的に、急性の健康への悪影響は、電界の直接的知覚と、マイクロショックからの不快感に関するものだけであるとしている。

磁界

テスラ領域および関連する磁界勾配における静磁界への短期曝露では、いくつかの急性の影響が明らかにされている。

血圧や心拍数の変化などの心臓血管系の反応は、ボランティアや動物を対象とした調査でしばしば観察されている。但し、これらは 8 T までの静磁界への曝露では通常の生理的変動の範囲内であった。

実験的に立証されていないものの、計算では次の 3 つの誘導流動電位 (flow potentials) の影響があり得ると示唆されている点には留意しておくことが重要である。それは心拍速度の小さな変化 (健康に対する影響はまったくないと考えられる)、異所性収縮の誘導 (こちらのほうが生理学的に重要と考えられる)、再帰性不整脈の可能性の増大 (心室細動につながる可能性がある) である。始めの 2 つの影響は 8 T を上回る閾値を持つと考えられているが、3 番目についてはモデル化の複雑さのために、現在のところ閾値を出すのは難しい。1 万人につき 5~10 人程度の人々が特に再帰性不整脈の影響を受けやすく、こうした人々は静磁界および勾配界への曝露によってリスクが上昇するかもしれない。

但し、入手できるデータは限られているので、上述のエンドポイントへの静磁界の影響について明確な結論を出すことはできない。

静磁界勾配内における物理的移動は、約 2~4 T を上回る静磁界では、めまいや吐き気、時には眼内閃光や金属質の味覚を生じることが報告されている。一過性であっても、こうした影響は人々に悪影響を及ぼすかもしれない。目と手の協調に影響がある可能性の他に、難しい処置をする作業員 (例えば外科医) の最善の遂行能力(optimal performance)が低下し、同時に安全性を低下させる可能性がある。

他の生理学的反応への影響も報告されているが、独立した追試実験なしに明確な結論を出すことは難しい。

この静電磁界のリスク評価は、入手できる科学情報のすべてを使って行われている。これは、確認し定量化できるすべての健康リスクを同定するというものであった。しかしながら、情報が非常に少ないため、静電磁界曝露のリスクを適切に特徴付けることはできなかった。モデリング調査および／または人に関するいくつかの観察から、急性の影響を誘発する可能性のある静電磁界レベルについて得られた指標がある。但し、長期的および遅延性の影響に関する情報はリスクを特徴付けるには不十分で、一般的な記述にとどまっている。それらは適切に実施された非常に数少ない調査に基づいたものである。知識に大きなギャップがあることが確認されたので、第 1 章の研究勧告が