

鉄道の電磁界と生体との関わりを探る

池畑 政輝
人間科学研究部
(生物工学研究室 主任研究員)

吉江 幸子
同
(同 副主任研究員)



いけはた まさてる よしえ さちこ

はじめに

電力設備や電気鉄道から発生する電磁界の人間に対する影響について、社会的な関心が高まりつつあります。近代科学が成立する遙か以前から、磁界の生体作用には興味を持たれてきましたが、特に健康影響という意味では、送電線近傍の住人と小児白血病の発症の間に相関があるとする1979年の米国における報告が発端となり、以降30年以上そのリスクを探る試みが続けられ、相関の有無について肯定否定の両論がある中で、現在もWHOを中心とした評価が進められています。これまでに、電気鉄道などから発生する周波数帯域に関しては、健康リスク評価や曝露制限のためのガイドラインがWHOなどの国際機関により定められています。しかしながら、一般的には依然として「漠然」とした懸念がもたれていることも事実です。

この電磁界の生体影響に関しては、様々な手法を用い、条件も様々な検討されてきました。極めて強い磁界では、短期影響としてはっきりとした作用を見出す例もありますが、環境中に存在するレベルの電磁界の長期影響などについては、WHOの健康リスク評価でも述べられているように、科学的に一致した見解を得るに至っていません。これは、手法上の制約による部分も大きく、例えば居住環境と疾病発生率を研究する「疫学」という研究手法では、ごくわずかな磁界の健康リスクが示されていますが、これを同様の指標で検証しようとした場合、実験室レベルの手法では、前代未聞の大規模な動物実験などが必要となり、現実的には不可能であるなどの事情があります。ただし、様々な科学的手法で一致した見解

を得ない限り、はっきりとした影響評価はできません。そこで、実験材料、方法などを工夫し、科学的に意義のある実験を行い、その結果を根拠として様々な角度から検証し、総合的に生体影響の評価を行う必要があります。

鉄道の電磁界の特徴と評価の必要性

2011年3月に経済産業省の省令「電気事業法中の電気設備に関する技術基準」の改正があり、経済産業省が管轄する電力設備に関して、公衆に対する商用周波数磁界の健康影響防止を目的とした磁界規制が、日本として初めて制定されました。鉄道のシステムはこの省令からは除外されていますが、電気をエネルギー源としているシステムの必然として磁界が発生するため、国土交通省において同様の規制に関する具体的な検討が進められています。ここで、鉄

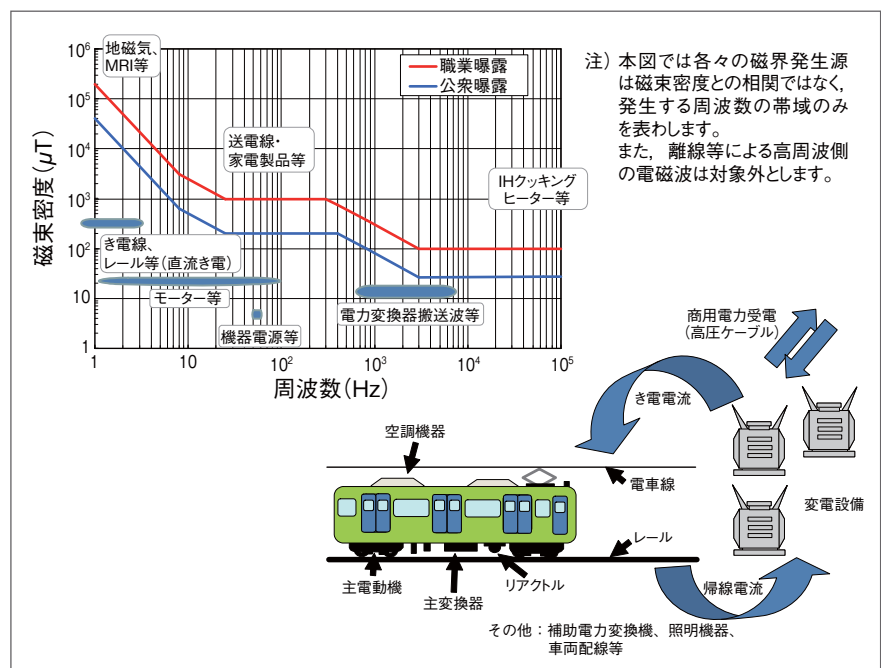


図1 国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) のガイドライン磁界参考レベル (2010年改訂版) および鉄道における磁界発生源とその周波数分布等

道の電磁界について考えてみると、鉄道は様々な技術・機器の集合体であるため、そこから発生する磁界は、様々なものとなります。車両を例に挙げると、き電電流、車載機器、主電動機、リアクトル、主変換器などの電磁界発生源から、走行状態に依存して時間的にも空間的にも、また周波数的にも大変不均一であり複雑な磁界が発生する環境となっています。図1に磁界曝露の制限に関する国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) のガイドラインに示されている1-100kHzの磁界参考レベル、ならびに鉄道における主要な磁界発生源とその周波数を記します。鉄道には様々な磁界の発生源があるものの、個々の発生源からの磁界の強さは、既存のガイドラインの基本的な制限値(磁界によって誘導される体内の電界量)を換算した値である磁界参考レベルを超えることは無いようです。しかしながら、このような複数の周波数の磁界が同時に発生している環境については、生体に対する短期影響、長期影響とも検討された例は少ないため、生物試料を用いた試験により安全性の裏付けを得ることは、健康リスク評価上の手続きとしても有意義かつ必要なことであると考えられます。ここでは、生物試料を用いた実験による評価の実際を紹介します。

電磁界の生体影響を探る

試験用生物試料

一概に生物影響といっても、その現れ方は多岐にわたります。たとえば、我々の体を形作る情報源である遺伝子の変化(突然変異)は発がんの直接的な原因ですが、この突然変異一つをとっても、遺伝子を構成するDNAの配列の重要な一部が変化してしまうこと、数個が抜け落ちてしまうこと、数千個の単位で欠失してしまうこと、染色体のレベルで入れ替わってしまうことなど、そのパターンは多岐にわたります。これらの変異を起こす能力を「変異原性」と呼びます。また、DNA配列の変化以外にも、DNA分子の修飾や遺伝子の発現の変化、タンパク質、脂質など細胞を構成する要素への影響、これらに起因する細胞機能の変化(図2)など、一つの細胞として影響を受ける可能性がある指標は多数考えられます。これらの指標を検出する際、一つの細胞で起こり得る現象であれば、試料は一つで良いという考え方もあるのかもしれませんが、しかし、一つの細胞をばらばらにし、隅々まで検証することは、今の科学技術をもってしても大変困難です。そのため、これまでにマウス(ハツカネズミ)・ラット(クマネズミ)などの個体動物から大腸菌やサルモネラ菌などの細菌まで、試料の大き

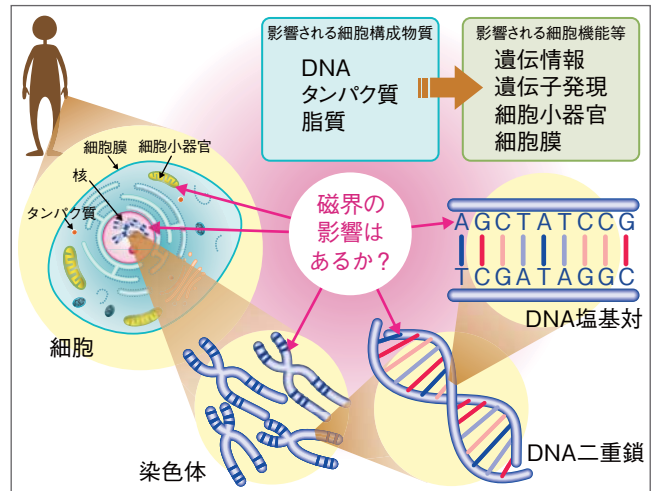


図2 生物試料の評価指標

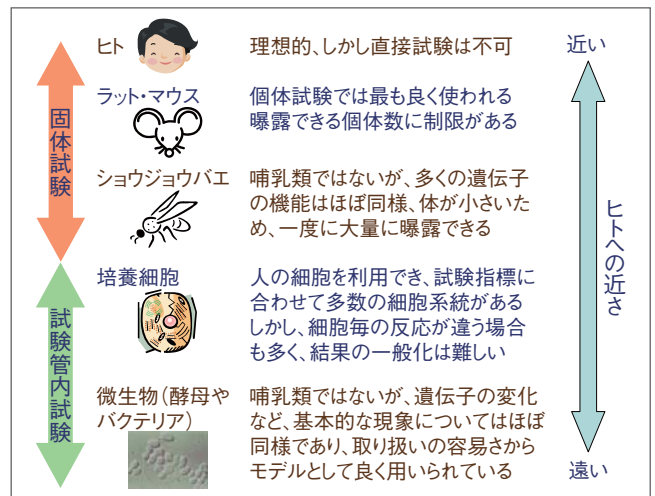


図3 試験用生物試料の長所と短所

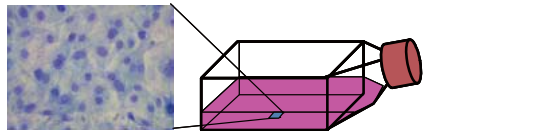
さや一度に評価する数・指標を変えて、いくつもの試験系が研究・開発され、その一部は安全性試験として用いられてきました。試験試料の種類ごとに長所短所があり、評価対象の性質や評価すべき事柄に合わせて適切に選ぶ必要があります。図3に大まかな生物試料の種類とその長所および短所を記します。さらに、評価の感度を向上させるために、例えば遺伝子に傷が入った時に速やかに修復する遺伝子修復機能や、熱を始めとした様々なストレスに应答し熱で壊れたタンパク質を修復する熱ショック応答遺伝子など、生体が持つ様々な防御機能を壊した試料も良く使われます。このような試料を使うことで、実際の人間よりも感度良く危険な物質や作用を検出し、リスクの評価を行うことができます。身の回りの様々な物質や作用は、その発がん性の有無によって管理の方法が異なります。また、社会的な関心が磁界と発がんとの関連に向けられている現状もあります。したがって、磁界の評価に関しては、安全性試験の標準的な試験系を主として用いますが、中でも発がん性の簡易的な指標である「変異原性」に着目して評価を進めています。

実験装置・実験環境

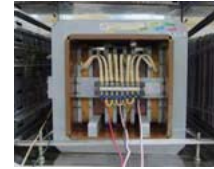
生物影響評価の考え方は、まず致死量を求め、半数致死量を求め、半数作用量を求め、作用閾値を求めるといった方法が一般的です。これに従い、磁界評価の際にも、できるだけ強い磁界について評価を行ってきました。ただし、磁界の強さと試料を磁界に曝露するスペースは相反する関係にあるため、極めて強い磁界は、極めて小さい空間にしか発生させることができません。したがって、我々の研究においても、定常磁界（時間的に変動しない磁界）では地磁気の約10万倍の5T（T = テスラ）、商用周波数磁界では50Hzにおいて環境の数倍以上と考えられる40mT、また20kHzでは既存ガイドラインの百倍を超える3.9mTを曝露可能な装置を開発し、評価に用いてきました。一方、生物試料は最も大きいものでマウスを始めとしてショウジョウバエ、微生物などを用いましたが、現在ではヒト由来の試料を含めた培養細胞での試験が主体となっています。

試験による評価を行う上で最も考慮すべきことは、対象とする磁界の影響が、あるとしてもごく弱いと予測されることです。そのため、その弱い影響を正しく評価する

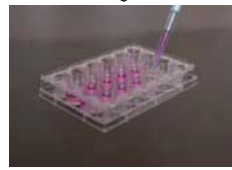
試験系とすることが重要となります。弱い影響を検出するためには感度の良い試験系を用いますが、このような生物試料は他の環境の変化にも大きな影響を受けるため、試験時の環境維持に細心の注意を払わないと、誤った評価となる危険性があります。このため、実際の試験にあたっては、磁界曝露の際に、磁界の有無以外の条件を精度よく同一にする工夫が必要となります。例えば、曝露用磁石を恒温室の中に設置し、さらに温水循環・空気循環などを行ったり、曝露用コイルの中に設置できるウォータージャケット式の培養器を新たに開発するなど、磁界以外の要因（温



培養細胞



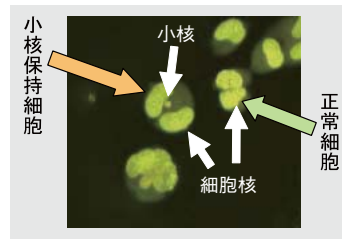
磁界曝露(24~72時間)



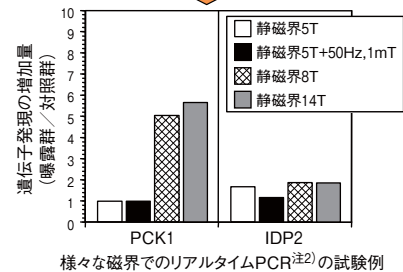
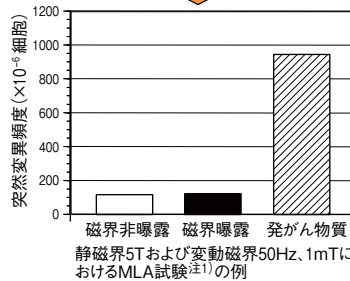
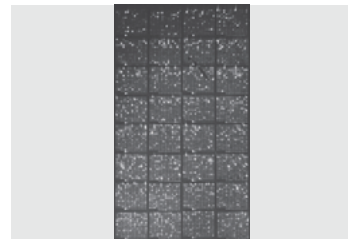
実験処理

遺伝子への直接作用の評価
(小核試験他の変異原性試験)

遺伝子の働きへの影響評価
(DNAマイクロアレイ、リアルタイムPCR等)



データの解析・分析



注1) MLA 試験については表1の注3)を参照。

注2) リアルタイムPCR 試験とは、対象とした遺伝子の細胞内での転写量(メッセンジャー量)を定量する試験法であり、細胞内での遺伝子の働きを調べる方法です。なお、図には共同研究の内容(8T, 14Tの定常磁界試料)を含みます。

図4 生物を用いた磁界曝露影響評価実験の流れとデータ例

度、湿度など)について、磁界非曝露の試験群と精度よく一致させることはいうまでもありません。また、他の物質などで汚染されないよう、無菌的な環境で試験を行うことなども必要不可欠な技術です。生物影響評価試験の流れの一例を図4に示します。

このような生物試験の技術に加え、時間的に変動する磁界の場合には、磁界の強さ以外に、電磁誘導により試料に生じる誘導電流/電界を評価することも重要です。比較的単純な形状であれば、電流の周りに生じる磁界を求めるビオ・サバルの法則を応用した解析解で求められますが、

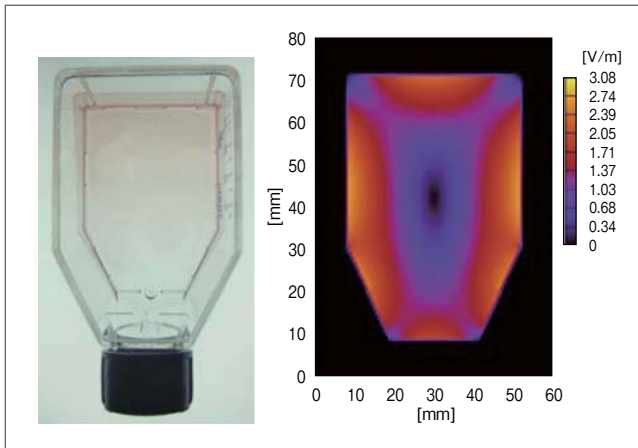


図5 生物試料曝露容器の例と内部にある液体状の試料に生じる誘導電界の解析結果

試験の都合上、少し複雑な形状の場合には、対象をmm単位の細かい立方体に分割し、その各辺に特有のインピーダンスを与え、さらに各面に対する磁界を与えた時の各立方体の誘導量が全体として整合するように計算を行うインピーダンス法などを適用して詳細に推定することが必要です。このような数値計算は、現在検討を進めている環境磁界での人体の曝露評価にも用いており、生物試料を用いた試験結果をもとに実環境の評価を行う際には、推定された誘導量をパラメーターとすることも有効です(図5)。

これまでの結果

これまでに、鉄道車内の電磁環境を評価することを目的に、静磁界、商用周波数磁界(50Hz)、2kHzなど代表的な周波数の単一の磁界と、それらの磁界を組み合わせ、静磁界と50Hzまたは静磁界、50Hz、2kHzの磁界を同時に発生した環境で変異原性試験などによる評価を行ってきました。表1にそれらの評価結果を記します。この評価の中では、遺伝子同士の組み換え・変換という指標に感度の高い酵母の試験系において、静磁界5Tと変動磁界50Hz、1mTという極めて強い通常的环境中では考えられない強さの複合磁界を曝露した場合に、ごくわずかな変異原性が認められた以外には、生物影響は認められませんでした。

また、変異原性が認められた条件でも、これまでの研究による結果と合わせると、その影響は静磁界のみによるものと考えられ、複合することによる影響は認められませんでした。また、その変異原性の程度は、例えば皮膚がんの原因となる日光中の紫外線の影響などと比較しても極めて弱いことが、これまでの研究から明らかになってきています。

このような具体的な生物試料での評価結果に基づくと、鉄道の実環境での磁界の強さが、科学的に磁界の影響を検出できる強度より極めて弱いこと、また標準的な生物試験

表1 複合磁界の変異原性評価結果

	定常 5T, 50Hz 1mT	定常 20mT, 50Hz 1mT	定常 1mT, 50Hz 0.5mT	定常 0.5mT, 50Hz 0.5mT, 2kHz 0.5mT
エイムス試験 ^{注1)}	陰性	陰性	陰性	陰性
酵母変異原性試験 ^{注2)}	統計的有意差あり	陰性	陰性	未実施
MLA試験 ^{注3)}	陰性	未実施	陰性	陰性

注1) エイムス試験は、微生物(サルモネラ菌の特殊な試験株)を用いた変異原性試験であり、主として遺伝子のDNA配列の1~数個の置き換えりや欠落による突然変異(点突然変異)を検出します。

注2) 酵母変異原性試験は、微生物(パン酵母の特殊な試験株)を用いた変異原性試験であり、主として遺伝子のDNA配列数百以上数千程度までの組み換えりによる突然変異(組み換えまたは変換)を検出します。

注3) MLA試験は、マウスリンパ腫由来の培養細胞の特殊な試験株を用いた変異原性試験であり、遺伝子の変異に対して点突然変異、組み換えおよび染色体レベルでの組み換えりや欠失による突然変異を検出します。

では変異原性を示さないことから、生物影響は、無いか、またはあるとしても標準的な試験では検出できない極めて弱いものであると考えることができます。

おわりに

電気を使うところには磁界が発生します。このような環境中の微弱な磁界・電磁界・電磁波の健康影響に関しては、長らく議論が続いています。2011年5月には、携帯電話からの電磁波による脳腫瘍の可能性について、国際的な機関(国際がん研究機関:IARC)が評価した結果が公表されました。報道のされ方は様々でしたが、重要なことは、評価の本質についての正しい認識を持つことです。実際、係る件についてはIARCは発がん分類グループ2B(ヒトに対して発がん性を持つかもしれない)という評価をしましたが、これは鉄道も関連する50Hzなどの商用周波数磁界と同じカテゴリーであり、「発がん性を持つ可能性が高いとは言えないが、その可能性を示す科学的根拠(疫学の報告)があるため、評価を確定させるための更なる研究が必要である。」というニュアンスで分類されたようです。

現在、鉄道磁界に関しては、その測定手順が国際電気標準会議(IEC)のTC9より技術仕様書(IEC/TS62597)として発行される予定となっています。また、国内でも車両内磁界測定の見直し規格の改訂審議が始まりました。鉄道における磁界規制の議論も進んでいます。このような状況で、鉄道磁界の評価法を確立することは大変重要な課題です。しかし、これらの課題を進めながら、そのリスク評価の足を固めることも必要です。そのためには、ここで紹介したような方法を用いた生物影響評価の具体的なデータに基づき、さらに理論的な考察を踏まえて適切な評価をする努力を続けていく必要があります。RRR