

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 磁界の生物作用を探る

電気鉄道は、さまざまな周波数の電界・磁界・電磁界を発生しています。この磁界の生物作用は強さや周波数によりさまざまですが、時として、その作用の健康リスクについての関心が高まることがあります。鉄道で発生している磁界は大変弱いレベルの磁界であり、顕著な生物作用を生じる可能性は極めて低いものの、磁界の生物作用の程度を把握しておくことは、健康リスクとして極めて小さいことを説明するために必要です。

ここでは、磁界の生体内での電磁誘導を推定・可視化する工学的な技術や、一細胞レベルでの細胞活動の観察などの生物学的な技術の連携により、健康リスクに関わる磁界の生物作用について、より正確な評価が可能となってきた現状を紹介します。



**池畑 政輝**  
Masateru Ikehata  
人間科学研究部  
生物工学研究室  
室長  
【専門分野】 遺伝毒性学、  
細胞生物学、微生物学



**吉江 幸子**  
Sachiko Yoshie  
人間科学研究部  
生物工学研究室  
副主任研究員  
【専門分野】 分子生物学、  
微生物学



**加藤 佳仁**  
Yoshihito Kato  
浮上式鉄道技術研究部  
電磁システム研究室  
主任研究員  
【専門分野】 電気工学、  
環境電磁工学



**中村 一城**  
Kazuki Nakamura  
信号情報技術研究部  
ネットワーク・通信研究室  
主任研究員  
【専門分野】 EMC、無線  
通信システム

## 鉄道と磁界の生物作用

ここで扱う「鉄道」と健康リスクとしての磁界の「生物作用」とを結び付けて、そこに関係があるか、無いのか、と考える方はそう多くはないでしょう。なぜなら、磁界は人の目には見えず、また感じることもないためです。

一方で、磁界の健康リスクとしての「生物作用」は、1970年代後半から、30年以上にわたり世界各国で議論され続けている事柄でもあります。「見る」ことも「感じる」こともできないため、漠然とした不安から懸念が生じる場合があるからです。

この生物作用は、「短期的ばく露による作用（短期作用）」と「長期的ばく露による影響（長期影響）」の可能性に分けて考えられています。「短期作用」は環境中にはない大変強い磁界による神経刺激作用であり、科学的にも確立した根拠があります。これは、強い磁界のばく露により、程度の差こそあれ誰にでも起こる作用です。一方、「長期影響」は、微弱な磁界への長期間のばく露により、疾病の発生病リスクが上昇する可能性を指します。例えば、病気になった方の性質、習慣、環境など

から病気の要因を探る「疫学」の手法を用いると、磁界と疾病の発生病リスクの間に相関があるとの結果を得ることがあります。ところが、調査にはさまざまな要因が複雑に絡んでいるため、他の要因と比べ磁界が原因かどうか断定はできません。そのため動物や細胞を使った研究で検証されますが、磁界の影響は認められないとの報告も多く、いまだはっきりとした結論にはたどり着いていません。あくまで「可能性」の域を出ていませんが、社会におけるインパクトは大きいので、現在も結論を得るための研究が続けられています。

電気をエネルギー源とする鉄道システムでは、地上設備、車両を問わず、さまざまな機器から多様な磁界がおのずと発生します。2012年8月に「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」の改正により、鉄道の地上電気設備の設置にあたっては、一般公衆に対して、商用周波数の磁界で健康影響が生じないようにすることとなっています。この規制で対象とする健康影響は、前述した「短期作用」、すなわち強い磁界の神経への刺激を指し、国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)の定めた「時

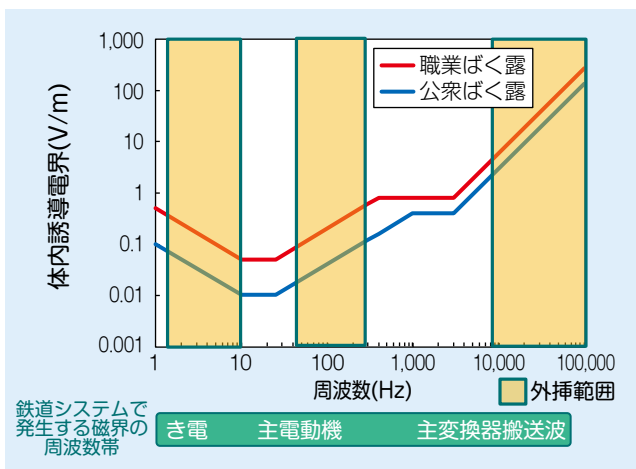


図1 ICNIRPガイドラインの基本制限

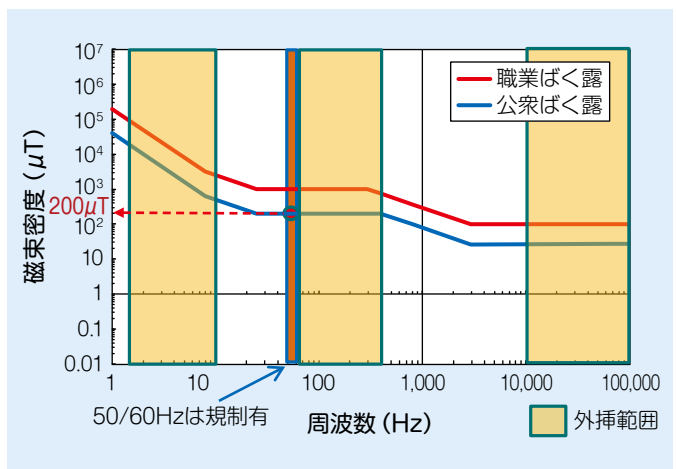


図2 ICNIRPガイドラインの参考レベル

間変化する電界および磁界へのばく露制限に関するガイドライン (1Hzから100kHzまで)<sup>1)</sup>に準拠しています。

### ICNIRPガイドライン

ICNIRPは世界保健機関 (WHO) 傘下の非政府組織 (NGO) の一つであり、名前の通り非電離放射線 (☞参照) を対象とした人体防護のガイドラインを作成しています。

省令の根拠となったガイドラインは、2010年に改訂・刊行されており、鉄道と関係する100kHz以下の磁界については、前述した神経刺激作用が主たる防護対象となっています。

このガイドラインでは、磁界へのばく露による電磁誘導により人間の体内に生じる誘導電界量 (V/m) を基本的

に守るべき物理量 (「基本制限」として定めています。これは、神経細胞が刺激される強さを考慮したのですが、実際にはボランティア実験から得られた限られた研究をもとに、理論的な検討を加えたしきい値の範囲を検討したうえで、一般環境に対する値 (公衆ばく露) と管理された環境で知識を持った者が作業する職業的環境に対する値 (職業ばく露) に分けて定められています (図1)。研究が行われていない周波数帯については、データのある領域同士を理論に基づいてつなげた (外挿した) 数値となっています。実は、この外挿部分の周波数帯には、例えば、主電動機 (~100Hz程度)、主変換器の搬送波 (~20kHz程度) 由来の磁界など、鉄道から発生している周波数も多く含まれます。もし、今後、商用周波数のみならずほかの周波数帯にもガイドラインを当てはめるのであれば、外挿部分については具体的なデータに基づく検証を行う必要があると考えます。そのため、鉄道総研では生物試験による基礎的な研究に着手しています<sup>2)</sup>。

ガイドラインの「基本制限」ですが、適合性評価のためには体内の誘導電界量を測定することが必要となるものの、そのためには、実際に体内に何らかのセンサーを挿入して測定を行う必要があります。現実的には困難です。そのため、これに代わる指標として、基本制限の

誘導電界量を体内に生じさせるであろう磁界の強さを推定し、「参考レベル」として与えています (図2)。鉄道の規制では、省令の解釈基準において200 μT (マイクロテスラ) が基準値と定められています。なお、この「参考レベル」は、測定した磁界の強さが「参考レベル」以下であればガイドラインを満たしていると言えますが、一部の測定が「参考レベル」を超えたからといって、必ずしも「基本制限」を超えているわけではありません。そのため、「参考レベル」を超えた場合には、人体内の誘導量を評価し、「基本制限」への適合性を評価することがガイドラインにおいて推奨されています。

### 磁界の可視化

一般的に見ることができないと考えられている磁界ですが、そのままでは「見る」ことができないものの、工学的な手法により、さまざまに可視化することが可能です。例えば、車両周辺の磁界発生源などのモデル化とその磁界解析や、実際の数点の測定値をもとにした補間などにより、空間分布を可視化して表現することが可能です (図3)。

### 磁界による電磁誘導量の可視化

このような鉄道での磁界による人体への誘導量とガイドラインの「基本制限」との比較を行うには、先に述べた

#### ☞ 非電離放射線

磁界、電界、電磁界の一部を指す呼称です。特に、電磁界は電界と磁界が相互に作用する物理量で、周波数によっては電波、赤外線、可視光、紫外線、放射線など、多様な性質を有し、呼称もさまざまです。

「非電離放射線」は放射線側から考えた際の呼称で、X線・γ線など、物質の化学結合を破壊しイオン化 (電離) するエネルギーを持った放射線を「電離放射線」と呼ぶ一方で、可視光以下の周波数で物質の化学結合を破壊するほどのエネルギーを持たない放射線の総称です。

とおり現実的に実測が不可能であることから、数値計算による推定が行われます。近年では技術が進歩し、複雑な体や臓器の形も、0.5~2mm程度の立方体などに分割してモデル化されており、計算法の一つであるインピーダンス法<sup>3)</sup>では、モデル化した立方体ごとに、特有の導電率(電気の流れやすさで、例えば人間の臓器ごとに異なる)を与えて計算することで、人間の内部の構造を踏まえた詳細な誘導量推定が可能です(図4)。

鉄道総研では、(国研)情報通信研究開発機構(NICT)が開発した日本人数値計算人体モデル(Taroモデルほか)を使用し、鉄道車両内などを想定した評価法を開発しています。その中では、鉄道車両内で乗客のとする姿勢や、異常時なども想定し、検討を進めています(図5)。

また、後述する実験的な生物作用の検討に際しても、磁界へのばく露による誘導量を評価することは、人への影響を考える場合に大変重要な指標の一つとなります。

### 生物作用の観察

磁界の神経刺激作用は、ガイドラインの根拠となった研究のようにボランティアに頼る研究では、実施できる条件や、安全性、費用の面も含め、研究に大きな制約が加わります。そこで、人に代えて試験管レベル(☞参照)で神経刺激を検出できる試験系を構築しています。外部研究機関とも協力しながら、現在ではマウス・ラットなどの個体の脳や胎児由来の幹細胞(mES細胞、☞参照)を用いて神経系の細胞を培養し、磁界をばく露しながらリアルタイムに神経細胞の活動を観察(可視化)することが可能となりました(図6)。同時に、細胞がばく露している磁界による誘導電界の数値計算による推定から、

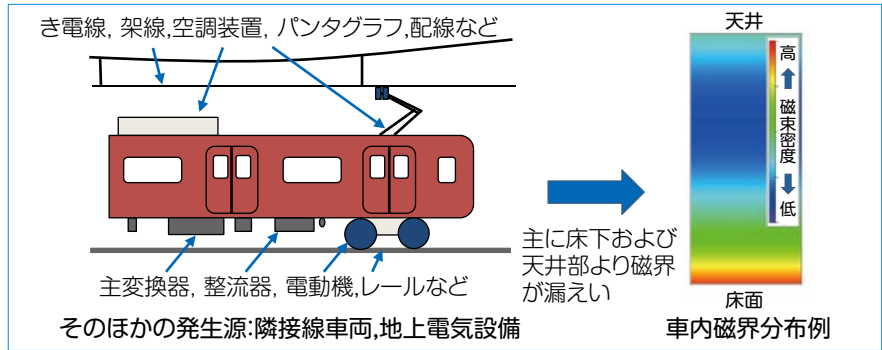


図3 磁界の空間分布の可視化例

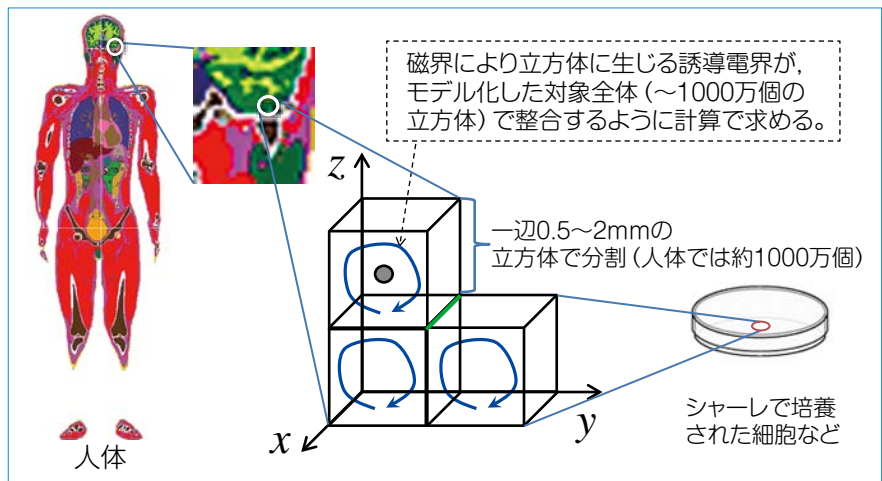


図4 インピーダンス法<sup>3)</sup>の概念

誘導電界量と神経活動との関係を明らかにすることができます。これにより、今後の規制のあり方を考えるうえで、課題の一つとなっている刺激のしきい値確認とガイドラインの検証が可能となってきています。今後、誘導量推定法の高精度化やヒト細胞での評価も視野に入れながら、鉄道で発生している周波数の磁界の短期作用に関する基礎的な知見を取得していく予定です。

一方、長期影響については、社会に与えるインパクトが大きいことから、これまでさまざまな手法を用いて試験をしてきました。そのほとんどは「がんの発生」につながる指標を対象とし、特に遺伝子の変化に着目した試験系を用いました。その結果、安全性試験に用いられる高感度な試験系の一部では、長時間、強力な磁界をばく露することにより、わずかな影響が見られました。しかしながら、この結果を鉄道の環境で発生している、大変弱いレベルの磁界への短時間ばく露として考えた場合には、長期

影響はほぼないと考えています<sup>2)</sup>。

これらの研究に加え、近年では、生物学の手法自体が日進月歩で新しくなっています。例えば、ヒトiPS細胞(☞参照)の研究はさまざまな方向に展開しており、上記の刺激評価では、我々もこの細胞から作った神経細胞での試験を考えていますが、ほかにもハイブリッド個体(体の一部分が人間の組織

#### ☞ 試験管レベル

栄養状態や温度など、動物の体内と似た環境を試験管内や培養器内で再現し、細胞や臓器を培養します。動物を使わずに化学物質や磁界などの影響を評価することができます。in vitro (インビトロ)とも呼ばれます。

#### ☞ mES 細胞

mouse embryonic stem cell の略称です。マウスの胎児の中にある細胞で、マウスの全ての細胞に分化できる能力を持ったまま、増殖させることができます。実験では、必要量を増殖させた後、化学物質などを用い、神経細胞など特定の細胞に分化させて試験に用います。

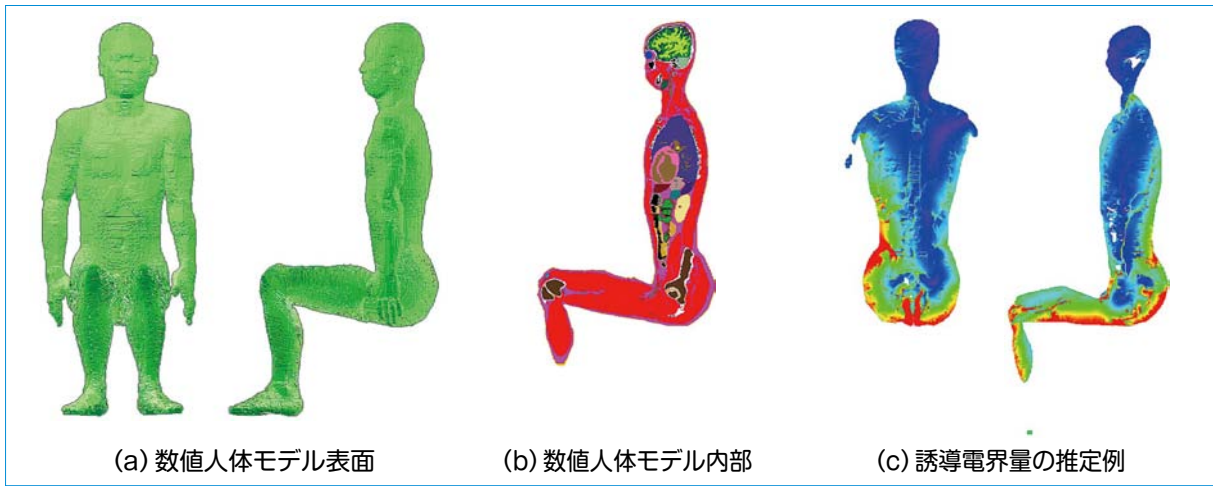


図5 誘導量評価に用いる人体モデルとその解析例 (Taroモデル, 座位)

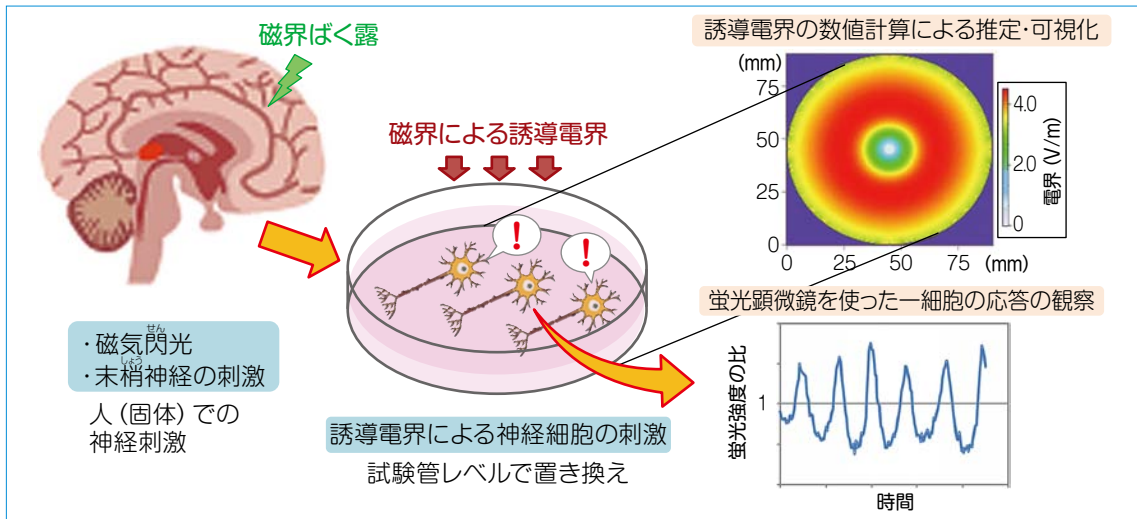


図6 磁界による神経刺激しきい値の細胞実験のイメージ

で置き換わったマウスなど)の研究なども進められています。この手法では、対象とした人間の指標(例えば白血病の病巣である造血組織)を動物の体の中で実験できます。そのため、これまで不可能であった、大規模な繰り返し実験などによる評価が可能となります。これらが磁界の評価に適用されることで、短期作用のみならず、長期影響の有無についても、科学的な

結論が得られることが期待できる状況となってきています。

科学的根拠に基づく正しい情報を発信していきたいと考えています。RRR

### おわりに

漠然とした不安から健康リスクへの懸念が生じやすい磁界ですが、磁界そのもの、また磁界による体内への電磁誘導の量は、詳細にかつ精度よく推定し可視化することができます。また、新しい生物学の実験手法により、1細胞レベルでの作用を観察したり、人そのものの細胞を用い、人の特定の機能を持つ組織に近い状態で、その作用の有無や程度を評価できるようになりました。

鉄道を安心して利用していただくため、今後も、磁界の生物作用に関する適切な知見を蓄積する取り組みを続け、

### ヒト iPS 細胞

人工多能性幹細胞とも呼ばれ、人間の身体の細胞を採取し、特定の4つの遺伝子を導入することで作成することができます。人間の全ての細胞に分化できる能力があり、再生医療などでの応用が期待されています。iPS細胞は、induced pluripotent stem cellsの略称です。

### 文献

- 1) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection : GUIDELINES FOR LIMITING EXPOSURE TO TIME-VARYING ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS (1 Hz TO 100 kHz), Healy Physics, Vol.99, No.6, pp.818-836, 2010
- 2) 吉江幸子, 池畑政輝, 鈴木敬久, 多氣昌生 : 静磁界と変動磁界の複合曝露による変異原性の評価, 鉄道総研報告, Vol.25, No.11, pp.41-46, 2011
- 3) N.Orcutt and O.P.Gandhi : A 3-D impedance method to calculate power deposition in biological bodies subjected to time varying magnetic fields, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.35, No.8, pp.577-583, 1988