

- 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

# 磁界の生体安全性を細胞レベルで確かめる

電気鉄道を含め、電気や電波を使う社会では、新たな技術の導入時など、時として磁界（ここでは、磁界のほかに、電磁界、電波などの一部に磁界を含むことから、総じて「磁界」とよびます）の健康リスクへの関心が高まることがあります。鉄道の環境中に発生している磁界は大変小さいため、直接の健康リスクになることはまず考えられませんが、その影響の有無や程度を把握しておくことは、磁界の健康リスクを科学的根拠に基づいて正しく説明し、社会のリテラシーを向上するために必要です。ここでは、そのために実施してきた細胞レベルでの検証と評価の取り組みを紹介합니다。



池畑 政輝  
Masateru Ikehata  
人間科学研究部  
生物工学研究室長



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



鈴木 敬久  
Yukihisa Suzuki  
東京都立大学  
システムデザイン研究科  
電子情報システム工学域  
教授



斎藤 淳史  
Atsushi Saito  
電力中央研究所  
環境科学研究所  
生物環境領域  
主任研究員

## 磁界とは

「磁界」は、空間の特性として磁気が発生している状態を示します。身近な例では、私たちは地球がもつ磁性により発生している磁界（地磁気）の中で暮らしています。また、これとは別に、社会の中にはさまざまな磁界発生源があり、それらは周波数によってさまざまな性質をもっています。ここでは、鉄道に関連した周波数20kHz以下の磁界を主対象としますが、スマートフォンで使う電波などにも、その一部として磁界が含まれます。

りません。そのため、生活の中で存在を感じるのには、マグネットクリップを使うときなどがあるでしょう。ほかにも、スマートフォンで使う電波の一部として磁界が含まれることから、電波状態を示すアンテナを確認することなども一例といえます。

しかし、送電線からの微弱な磁界と送電線近傍の住民の小児白血病発症リスクに関する1970年代後半の疫学の報告<sup>1)</sup>をきっかけとして、磁界の健康リスクについての社会的な関心がひろがりました。このような影響を「長期影響」といいますが、30年以上国際的な議論が続けられているものの未だに確たる結論は出ていません。

## 磁界の安全性(健康リスク)としての短期影響および長期影響

磁界は、形が見えず感触も匂いもあ

一方で、送電線(50/60Hz)と同じ

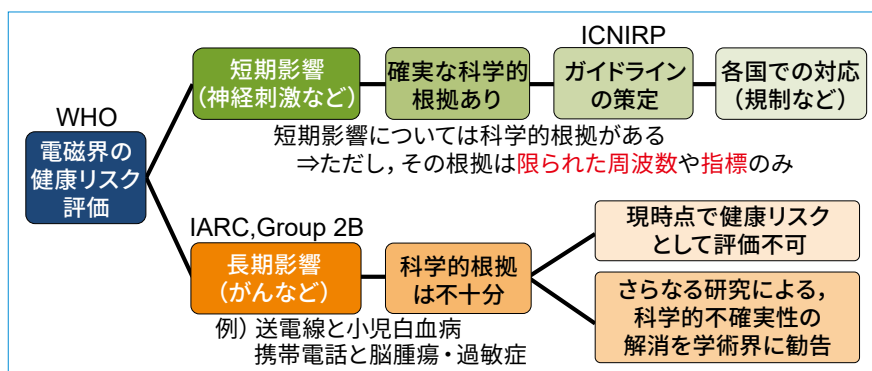


図1 電磁界のリスク管理に向けた対応

ような周波数帯において、日常生活で遭遇することのない大変強い磁界へのばく露が、神経の刺激を引き起こすことが知られています。この影響は、程度の差こそあれ誰にでも起こりうる影響で、ボランティア実験により「刺激を感じる」閾値が報告されています。この影響は、磁界にばく露している間のみ起こるため「短期影響」といいます。

### 磁界の健康リスク管理

このように、磁界の安全性、健康リスクは、まったく性質の異なる生体影響を考慮する必要があります。国際的には図1のような形でリスクの評価が進められています。国際的な健康リスク評価を行う世界保健機関（WHO）は、磁界の短期影響は確実に存在するので、それを防止するための施策の実施を推奨し、傘下の国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）が、この短期影響を対象とした人体防護のためのガイドラインを2010年に改訂しました。これに基づき、我が国の鉄道については、2012年に地上電気設備の規制が導入され、50/60Hzの磁界に対して公衆が立ち入れる箇所での磁界をガイドラインの参考レベル（ $200\mu\text{T}$ ：Tは参照）以下となるように設置することが定められました。一方で長期影響については、国際がん研究機関（IARC）において、変動する磁界は発がん性Group2B（参照）と評価されていますが、影響の有無を確かめるためのさらなる研究が求められています。

### 実験による磁界の健康リスク評価方法

ある対象について、その健康リスクを評価する場合、人そのもので確認することがもっとも確かな方法です。ただし、倫理的な観点から、実施するのは大変困難です。そこで、人に代わり、

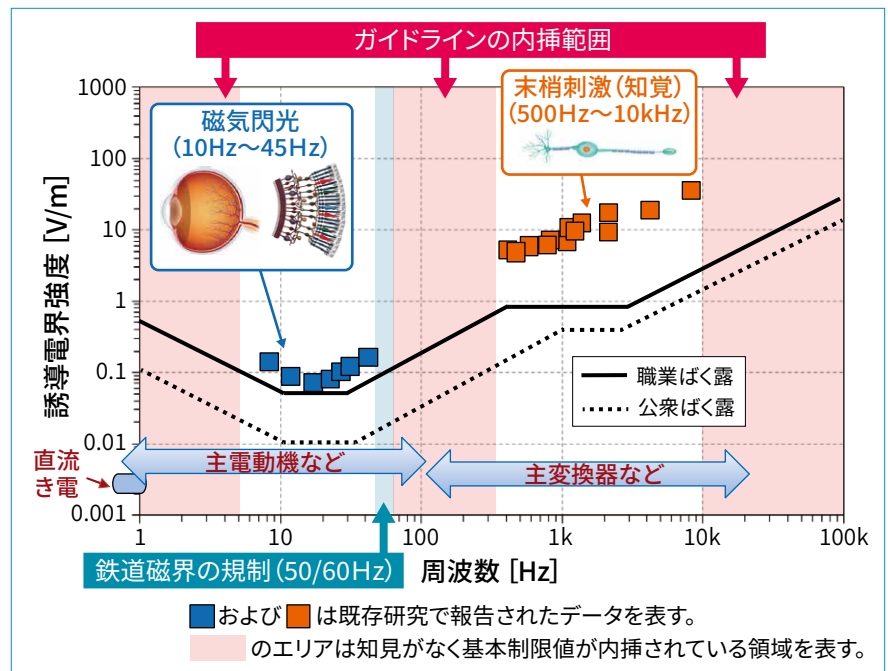


図2 ICNIRPガイドライン基本制限と内挿範囲

実験動物や培養細胞などを用いた評価が行われています。とくに化学物質や医薬品では、国際的な協調の下で作られた手順により評価する仕組みができています<sup>2)</sup>。

その中でも、細胞での実験は、動物と比べると低コストで、ほぼ性質のそろった細胞を使えるうえ、近年の科学技術の発展により、hiPS細胞（人の人工多能性幹細胞）から多様な機能をもった細胞や組織を作ることができるため、より人に近い評価が可能となってきています。鉄道総研では、この細胞試験のメリットの大きさから、磁界の健康リスク評価を細胞実験を中心に進めています。以下、この取り組みについて紹介します。

### 磁界の短期影響を細胞レベルで調べる

時間的に変化する磁界（変動磁界）へのばく露は、人間の体内に誘導電界（参照）を生じさせます。前述のガイドラインでは、人の神経が刺激される誘導電界量の閾値を基に、労働環境での「職業ばく露」、さらにマージンをもたせた一般環境での「公衆ばく露」

の2つのカテゴリーを設定し、それぞれに、基本的に守るべき物理量を「基本制限」として定めています（図2）。

この基本制限は、ボランティア実験で調べた誘導電界と神経が受ける刺激の強さの関係に基づいており、10～45Hzでは、磁界ばく露により視神経が刺激され目を閉じていてもチカチ

#### ④ T（テスラ）

テスラと読み、磁界の単位。1T = 10,000G（ガウス）。例として日本の2019年の地磁気はおよそ44 $\mu\text{T}$ （沖縄）から50 $\mu\text{T}$ （北海道）で分布しています。

#### ④ Group2B

発がん性の分類の一つで、「人に対して発がん性があるかもしれない（possibly carcinogenic）」というカテゴリー。この分類は、科学的な根拠の強さのみを分類し、発がん性そのものの強さとは関連しません。同じグループには、クロロフォルム、ガソリン、二酸化チタン、印刷作業労働などがあります。

#### ④ 誘導電界

人体の組織の磁気的性質は空気のものと同様であるため、外部磁界と同じ磁界が人体を透過します。その磁界が時間的に変化した場合、人体には外部からの磁界の変化を打ち消す方向の磁界を発生させる電界が生じます。この大きさは誘導電界量とよばれ（V/m）で表します。

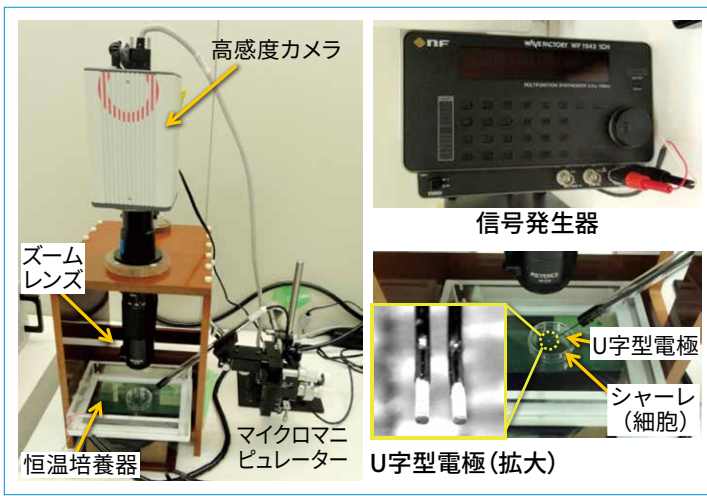


図3 電界刺激実験装置の概要

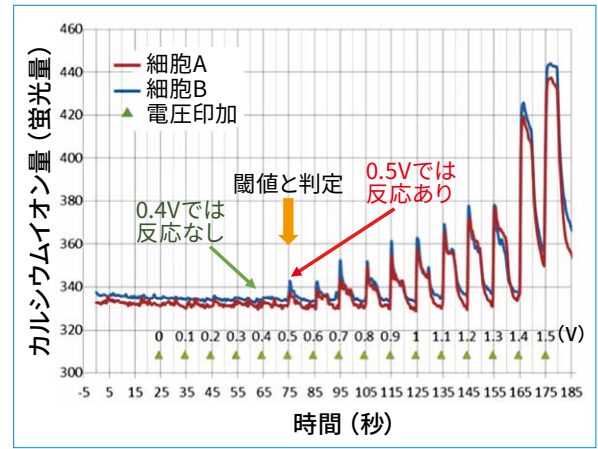


図5 ラット初代培養細胞における電圧印加による細胞応答の観察例

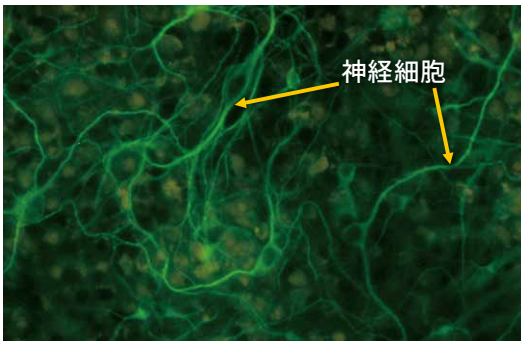


図4 ラット胎児由来の培養神経細胞の観察例 (神経細胞とのみ結合するmap2抗体による染色)



図6 細胞用IF磁界ばく露装置

カとした光を知覚する磁気閃光<sup>せんこう</sup>、500～10kHzでは腕などへの磁界ばく露により末梢神経が刺激されビリビリとした感覚がする現象に基づいています。ただし、調べられた領域は限定されているため、データが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(内挿補間した)値となっています。実は、この内挿部分の周波数帯には、鉄道車両の主電動機(～100Hz程度)、主変換器(～20kHz程度)由来の磁界など、鉄道において発生している周波数も含まれます。そのため、この内挿部分についての具体的な根拠づくりは、将来的な鉄道磁界の規制とも関連し、調べる必要があります。

このため、鉄道総研ではラット胎児の脳から培養した神経細胞を用いて神経が刺激される特性を評価しました<sup>3)</sup>。

変動磁界による神経刺激作用は、磁界ばく露により体内に生じる誘導電界

が一定値以上になった場合に起こると考えられています。また、神経細胞は周波数に応じて刺激を受ける敏感さが変わり、周波数が高くなるほど必要な誘導電界は大きくなります。そのため、神経細胞を培養する容器(直径10cm程度)の中に、刺激に必要な電界を発生させるためには、周波数に応じて非常に強い磁界発生装置が必要となり、幅広い周波数を評価することは現実的ではありませんでした。

そこで、誘導電界の代わりに、条件の制御が容易な電極からの電界により細胞を刺激することを考え、電界を細胞にばく露するために独自に考案したU字型電極を用いる実験系を考案しました(図3)。この装置を用いて、培養した神経細胞(図4)に電界をばく露した際の反応の一例を図5に示します。神経細胞では、刺激が起こる際に細胞内のカルシウムイオン濃度が瞬間的に

上昇します。これを観察するため、このイオンと結合する蛍光色素を細胞内に取り込ませて、蛍光量を観察します。図5で典型的な2つの細胞の反応例を示します。信号発生器の電圧0.4Vで電極に発生する電界を細胞にばく露すると反応が見られないものの、0.5Vでは細胞が反応する様子がわかります。この場合、神経刺激の閾値は信号発生器で0.5Vの電圧であると判断しました。さらに、実験状況の数値モデルシミュレーションにより、電極の間に発生している電界を推定し細胞の刺激閾値を求めて、ICNIRPのガイドラインと比較したところ、得られた閾値は、内挿部分を含めて基本制限で示された特性とよい相関をもつことが示されました。現在、閾値推定の精度を上げるためのさまざまな要因の検討や、hiPS由来の神経細胞での閾値の評価を進めています。

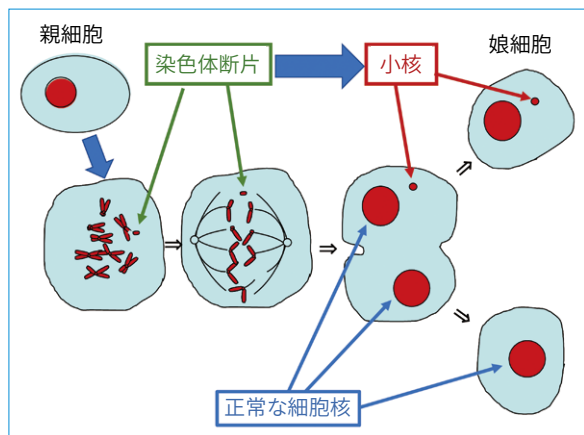


図7 細胞分裂と小核の発生模式図

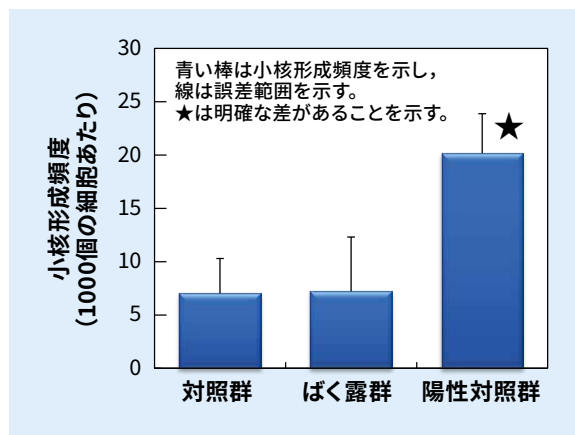


図8 中間周波磁界 (3.9mT) に関するハムスター由来の培養細胞を用いた小核試験結果

## 磁界の長期影響を細胞レベルで調べる

鉄道総研では、超電導リニアモーターカーの開発を進めてきたことも含め、鉄道で見られる磁界の長期影響評価にも取り組んできました。新しい技術の導入に際しては、あらかじめ慎重にその健康リスクを検討し、科学的な根拠を発信することで社会受容が円滑に進むと考えるからです。これまでに、さまざまな周波数帯の磁界を評価してきましたが、ここでは、中間周波磁界の評価について紹介します。

中間周波磁界 (300Hz～10MHz) は、鉄道の主変換器由来のほか、家庭でも良く使われるIH調理器や、携帯電話の非接触給電などで用いられています。しかしながら、この周波数帯での安全性評価の根拠となる研究は少なかったため、培養細胞を用いたさまざまな実験系で検討しました<sup>4)</sup>。

まず、図6のばく露装置を開発しました。実験評価をするうえで、評価に使う細胞に、均一に磁界をばく露する必要があります。そのため、4つの磁界発生コイルを組み合わせたメリットコイルという構成を用い、21kHz

で最大3.9mTという強さの磁界を細胞に均一にばく露できるようにしました。この強さは、日常生活で遭遇する強さの数千倍以上と考えられます。

安全性の評価例として、発がん性の一部を評価する小核試験の結果を紹介します。細胞ががん化する際には、遺伝子や染色体に変化が生じることが知られています。この試験では、遺伝子(染色体)の収納場所である細胞核が、細胞分裂の際に何らかの影響で正常に分裂できず、ちぎれたり、壊れた結果生じる小核(細胞核の断片)の出現頻度を調べます(図7)。陽性対照群(☞参照)としてDNAを傷つける作用をもつ抗がん剤の一種MMCを処理した細胞群では、通常の培養を行った対照群と比べて小核が観察される頻度が明らかに増える一方、中間周波磁界のばく露群では小核の出現頻度は対照群と変わらず、小核を生じさせるような作用はないことがわかりました(図8)。

これ以外にも、胎児の発生への影響を評価する細胞試験での影響も見られず、日常的なレベルでの21kHzの中間周波磁界へのばく露が、重篤な生物影響をもたないことが明らかになりました。

を紹介しました。これに加えて、磁界の分布や磁界にばく露された体内での電磁誘導の様子も、シミュレーションを通して詳細にかつ精度よく推定し、可視化することが可能となってきました<sup>5)</sup>。

近い将来には、第5世代移动通信システム(5G)の普及が進むとともに、さらに高い周波数帯を用いる技術も開発され、鉄道でもそれらを活用していくでしょう。安全性が高く、さらに安心して利用できる鉄道のために、磁界の健康リスクに関する適切な知見を今後も蓄積し、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]

## 文献

- 1) N. Wertheimer and E. Leeper : Electrical wiring configurations and childhood cancer, American Journal of Epidemiology, Vol.109, Issue 3, pp.273-284, 1979
- 2) OECD : Chemical safety and biosafety, <https://www.oecd.org/chemicalsafety/> (入手日: 2020/9/7)
- 3) 池畑政輝, 吉江幸子, 鈴木敬久, 斎藤淳史 : 変動磁界による神経刺激作用の細胞レベルでの評価, 鉄道総研報告, Vol.34, No.1, pp.25-30, 2020
- 4) 吉江幸子, 池畑政輝, 小笠原裕樹, 石井一行, 大久保干次代 : 培養細胞を用いた中間周波磁界の遺伝子および細胞分化への影響評価, 鉄道総研報告, Vol.28, No.5, pp.17-22, 2014
- 5) 池畑政輝, 吉江幸子, 加藤佳仁, 中村一城 : 磁界の生物作用を探る, RRR, Vol.73, No.8, pp.20-23, 2016

### ☞ 陽性対照

安全性を評価する生物試験において、試験そのものの有効性を確認するために使う毒性をもつ物質や作用。

## 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に対して、その安全性を細胞レベルで評価する取り組