

# 磁界による健康影響とその防護方針の現状

池畑 政輝\*

## Health Risk of Magnetic Fields, and Trends of Its Protection

Masateru IKEHATA

The World Health Organization (WHO) have been conducting the international EMF project and has issued several health risk evaluations related to electric and magnetic fields (EMF). In Relation to the WHO, the International Commission of Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) established guidelines for protecting people from short term effects of EMF. In response to this trend, a decree has been introduced to regulate power frequency magnetic field emission from static electrical installations of railway operators by Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism in Japan. In this article, not only the background and contents of the ICNIRP low frequency magnetic field guideline, but also its weakness when it is applied to entire railway systems is discussed. In addition, our efforts in research to deal with this issue are introduced.

キーワード：磁界，ICNIRP ガイドライン，磁界の健康リスク，磁界の神経刺激，基本制限，参考レベル

### 1. はじめに

鉄道における磁界の取り扱いについては、2012年の「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」改正により、一般公衆が立ち入れる場所において、商用周波数磁界(50/60Hz)が健康影響を及ぼさないように鉄道の地上電気設備を施設することとなった。このような規制の一方で、鉄道システムは様々な電気・電子機器の集合体であり、特徴としておよそ20kHz以下の種々の磁界が発生する状況にもある。本稿では、規制の背景、ならびに根拠となっている国際ガイドラインの内容について、今後この課題に対応していく上でのポイントを解説する。

変動する電磁界へのばく露による健康影響の議論の発端は、30年以上前の1970年代末まで溯り、送電線からの磁界へのばく露とある種の小児白血病(急性リンパ性白血病: Acute Lymphocytic Leukemia (ALL))の発症に相関があるとした疫学報告である<sup>1)</sup>。

その後、数々の国家的プロジェクトによる安全性評価研究や、国際的なリスク評価の枠組みの結果を踏まえて、2007年に世界保健機関(WHO)が、その時点におけるリスク評価(環境保健クライテリア)を纏めた<sup>2)</sup>。これを受ける形で国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)がそれまでのガイドライン(0Hz～300GHzまでを対象; 1998年発行)の周波数領域のうち、WHOのリスク評価に対応した1Hz以上100kHzまでの周波数帯についての改訂ガイドラインを2010年に発表した<sup>3)</sup>。

わが国においては、商用周波数磁界の健康影響に関して経済産業省が調査を進めていたが、WHOのリスク評価

に基づく勧告およびICNIRPのガイドライン改訂を契機として、「電気設備に関する技術基準を定める省令」を2011年に改定し、電力事業者に向けた規制を導入した。

並行して、鉄道事業を所掌する国土交通省においても規制導入に関する検討が進められ、経済産業省の動きに続く形で冒頭に記した規制が導入された。

本稿では、WHOのリスク評価(2007年)およびそれ以降の健康影響評価の概況と、日本における磁界規制の根拠となった国際ガイドライン(ICNIRPガイドライン)の要点を概説する。また、将来の規制のありかたを考える上で必要と考えられる基礎的な根拠を得るため鉄道総研において取り組んでいる基礎的な研究の概要を紹介する。

### 2. 磁界の健康影響評価(健康リスク評価)

#### 2.1 WHOによる健康影響評価

これまでの研究結果によれば、居住環境での弱いばく露強度の電磁界が、健康に顕著な悪影響を及ぼすという明確な科学的証拠は得られていない。一方、疫学調査では、日本を含むいくつかの国における調査において、商用周波数電磁界へのばく露と小児白血病の発症の間に相関が認められること、すなわち、わずかに健康リスクが上昇することを示唆する結果が報告されている<sup>4) 5)</sup>。これらの報告は電磁界へのばく露による健康リスクの因果関係を証明するものではないが、この疫学の調査も含めた種々の発がん性を評価した研究結果を基に、国際がん研究機関(IARC)は、環境中の様々な物質の発がん性の分類の一つとして、商用周波数を含む超低周波磁界(ELF磁界)の発がん性をGroup2B(possibly carcino-

\* 人間科学研究部 生物工学研究室

## 特集：人間科学

genic to human：人間に対して発がん性が疑われる）と分類した<sup>6)</sup>。

IARC の電磁界の Group2B という分類の科学的な根拠は下記のとおりである。

- ・疫学研究のプール解析において、小児白血病リスクと 0.4 $\mu$ T 以上の極低周波磁界へのばく露との間に、ほぼ一貫した統計的関連性が示されている。このような関連は偶然によるものとは考えられないが、選択バイアス（研究対象者の選び方の偏り）の可能性がある。
- ・小児白血病に関して、極低周波磁界の発がん性の疫学的証拠は限定的である。
- ・小児白血病以外の全てのがんに関して、極低周波磁界の発がん性のヒトでの証拠は不適切である。
- ・極低周波磁界の発がん性の実験動物での証拠は不適切である。

すなわち、人での研究において発がんリスクを示す限定的な研究がある一方で、実験動物等での研究結果では磁界の影響が明確でないという評価が、IARC の分類では Group2B に該当したという事である。

なお、IARC の発がん分類は 2016 年 6 月時点で 990 の化学物質や作業環境等について行われており、このうち Group2B には 289 種類が分類されている。Group2B には、抗がん剤等の化学物質や一部のウイルスに加え、超低周波磁界に、無線周波電磁界、ガソリン、漬物、アロエの葉抽出物などが含まれる。

また、それ以外の磁界（静電界）・電界（静電界、超低周波電界）は Group3（Not Classifiable as to its Carcinogenicity：人間に対して発がん性があるか分類できない）と分類された。この理由は、静電界および超低周波電界については健康影響がないと考える根拠があるのに対し、静電界については、分類するだけの科学的知見がないため、分類ができない、という意味合いであることに注意が必要である。

電磁界の人間への健康影響という意味においては、現在「発がん性」が最も大きな社会的影響を及ぼしていると考えられる。世界保健機関（WHO）はこの発がん性評価結果や、他の様々な研究報告を検討材料として、様々な健康影響に関する知見を取りまとめ、健康リスク評価書である「環境保健クライテリア」の編纂を行った。WHO はこれまでに IARC の評価結果を包含しながら、健康リスク評価として 2 つの環境保健クライテリア（WHO が指名した専門家のワーキンググループによる健康リスク評価書、定常電界・定常磁界；2006 年<sup>7)</sup>、100kHz 以下の変動電磁界；2007 年<sup>8)</sup>）およびそれらに関するファクトシート（WHO の公式見解を簡潔にまとめた文書）を発表した。これらの中で WHO は、100kHz 未満の周波数帯は、低周波磁界と同様に刺激作

用、100kHz 以上の周波数帯は、高周波と同様に熱作用により生体に影響を及ぼすことを科学的根拠として認めている。これらの作用を引き起こす短期的な強い電磁界へのばく露については、適切な防護プログラムの制定を勧告したが、長期的な低レベルの電磁界へのばく露による発がんのリスク上昇に関しては、その科学的根拠が弱いとして、積極的な対策を採ることによるリスク低減効果は不明であると評価した。

## 2.2 WHO の健康影響評価以降の動向

WHO の健康保健クライテリアは 2007 年に公表されたが、それ以降の国際的な健康影響評価としては、欧州の取組みなどが代表的である。欧州委員会では、新興および新規に同定される健康リスクに関する科学委員会（Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks; SCENIHR）の活動の一つとして電磁界が取り上げられており、2009 年および 2015 年に「電磁界ばく露の健康影響の可能性に関する意見書（Potential health effects of exposure to electromagnetic fields）」<sup>9)</sup><sup>10)</sup>としてレポートがまとめられた。その概要として、2009 年時点では、2007 年時点での SCENIHR の意見である「ELF 電磁界は発がん性を持つ可能性がある。また、ELF 電磁界と不定愁訴の間には一貫した関係はない。これに加え、乳がんと心疾患への関連は考えにくい。神経疾患と脳腫瘍については、ELF 電磁界の寄与はわからないままである。」という結論を変えるに足る新しい情報は無いとのことであった。2009 年の報告で WHO の健康保健クライテリア以降に新たに報告された研究に関する調査概要としては「疫学と動物のいくつかの研究は、ELF 電磁界が発がん性を持つかもしれない、小児白血病の増加に寄与するかもしれないとの結論を変えるものではない。細胞研究は、疫学の知見を説明するような機序を与えていない。一方で、新しいアルツハイマー病のリスクについて相関の可能性を示唆する報告があり、更なる疫学その他の研究が必要である」という内容であった。

また、2015 年の SCENIHR レポートでは、2009 年のレポート以降の知見に関し、特にこの時期に健康リスク評価のための研究が進められた高周波に重点を置いて編纂された。このレポートの中で、ELF 電磁界の概要として「新しい疫学研究によれば、これまで報告されている小児白血病の増加リスクが改めて報告されている。一方で、これまでと同様に、この疫学の知見を説明する生物学的な機序や支持する知見は実験的研究からは得られていない。これは、行動や脳の興奮などに関しても同様である。また、疫学では神経変性疾患のリスクの増加を示すような結果は得られていない。さらに、ELF 電磁界へのばく露による妊娠時の有害な影響も示されていない。子供の健康と妊娠時の ELF 電磁界ばく露の関係を示す

研究では、幾つかの方法的問題がある上に、妥当性を欠くと考えられる結果を示しており、リスク評価に含める前に再現性の検討が必須である。ELF 電磁界のヒトの生殖機能に関する影響も示されていない」という内容であった。

更にそれ以降の動向調査として、日本においては電気学会の調査専門委員会の活動の一つとして、同様の文献調査が行われている。その報告では、SCENIHR2015 以降の研究について言及しており、低周波磁界に関しては、これまでの WHO の電磁界に関するリスク評価を変えるような研究結果は得られていないと報告されている<sup>11)</sup>。

### 3. 磁界に対する健康リスク管理の現状

#### 3.1 磁界に関する国際ガイドライン

国際ガイドラインという観点からは、現在 ICNIRP と米国 IEEE 学会の中にある国際組織である ICES がガイドラインを発表している。ここでは、我が国も含め、現在もっとも多くが参照している ICNIRP ガイドラインに着目して、解説を行う。

#### 3.2 ICNIRP ガイドライン

ICNIRP は、1992 年に国際放射線防護学会 (IRPA) より独立した国際 NGO であり、WHO や国際労働機関 (ILO) などの国際機関と連携しながら、0Hz ~ 300GHz の電磁界、赤外線-可視光-紫外線などの光および超音波へのばく露による健康影響から人体を防護するための知見の集約と情報提供、ガイドラインの策定を行っている組織である。世界各国の 14 名の常任委員 (うち日本人 3 名) からなる本委員会と、工学、生物学、疫学および光の健康影響の各専門分野の専門家からなる分科会より構成されている。

ICNIRP による人体ばく露のための電磁界ばく露制限に関するガイドラインは、下記の 4 種類が発行されている (策定年順に記す)。

- (1) 変動電磁界 (0Hz から 300GHz)、1998 年刊行<sup>12)</sup>  
(1Hz ~ 100kHz の周波数範囲は 2010 年に 3 のガイドラインにより改訂)
- (2) 定常磁界、2009 年改訂<sup>13)</sup>
- (3) 1Hz ~ 100kHz の変動する電界および磁界、2010 年改訂<sup>3)</sup>
- (4) 1Hz 以下の変動磁界および定常磁界中での人体の動きにより誘導される電界のばく露制限、2014 年刊行<sup>14)</sup>

これらのガイドラインは、WHO の環境保健クライテリアに基づく方針、すなわち、強い磁界にばく露している間のみ生じる短期・急性影響 (神経刺激等) からの人体防護を目的としており、リスク評価の対象とするに

は科学的根拠が弱いとされる、長期間の微弱な磁界ばく露と小児白血病発症リスクの相関などの、長期・慢性影響は対象としていない。上記の 4 種類のガイドラインにより、電磁界と呼ばれる周波数領域全体である 0Hz ~ 300GHz までが網羅されている (ただし 100kHz 以上の変動電磁界については、WHO により健康リスク評価が進められているところであり、ガイドライン自体は数年以内に改訂される予定)。

(4) に挙げた 1Hz 以下の変動磁界等についてのガイドラインは、労働環境での職業ばく露における健康影響を防護する対象としていることには注意が必要である。また、このガイドラインにおいては、防護の対象とする影響は、めまいや吐き気など、これまでに磁気共鳴画像診断装置 (MRI) などの強い静磁界中で動くことにより現れる知覚影響に関する影響である。したがって、労働環境の中でも、主として MRI の作業環境についてのガイドラインとして制定されたものであり、一部の特別な場合を除き、鉄道に直接的に関連するガイドラインではない。

これらの ICNIRP のガイドラインの中で、鉄道から発生する磁界に関するガイドラインは、(2) および (3) のガイドラインである。(2) の定常磁界のガイドラインに関しては、その許容レベルは通常鉄道で発生する磁界の 100 倍以上であり、問題とならないこと (ペースメーカなどの埋め込み型医療機器への干渉は除く) から、本稿では (3) に着目する。ガイドライン (3) では、電磁界へのばく露の許容値について、磁界ばく露により体内に誘導される電界 (誘導電界) の強度を指標としている。そして、科学的な研究が示した閾値 (生理学的な何らかの影響が現れる値) に安全係数を考慮した値が、ばく露が許容される値 (基本制限: 図 1) として定められている。しかし、指標となっている誘導電界の強度を測定するためには、体内にプローブを侵襲的に入れなければ実測できない。また、この方法に代わり得る簡便かつ精度のよい内部誘導電界の測定技術は確立していない。そのため、ガイドラインにおいては、基本制限に相当する体内誘導

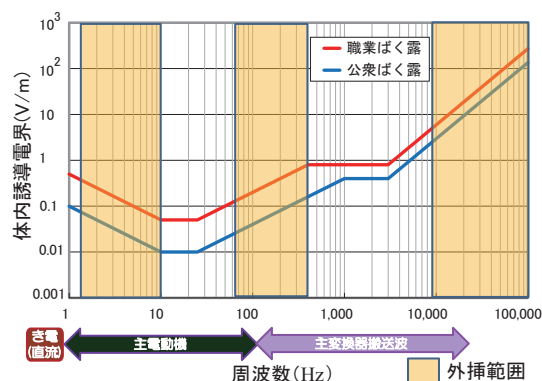


図 1 ICNIRP ガイドラインの基本制限

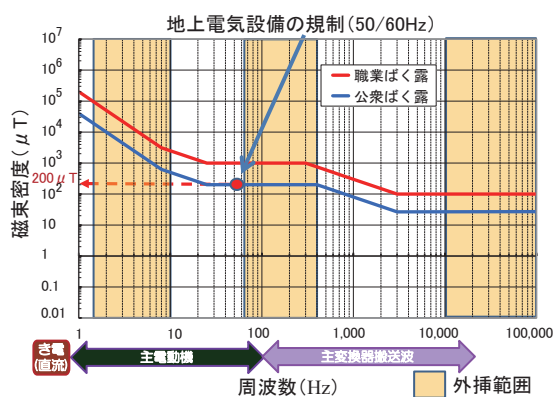


図2 ICNIRP ガイドラインの参考レベル

電界が体内に生じる一様な磁界の値を、解像度 2mm の精緻な数値計算人体モデルにより算出し、「参考レベル」として定めている。一般的にガイドラインとして参照されるのはこの参考レベルの値である (図 2)。

2010 年に改訂されたガイドラインでは、50/60Hz (ガイドライン上は 25Hz ~ 300Hz まで一定値) で 200 $\mu$ T の磁束密度が一般環境での参考レベルとなった。このガイドラインの一つの特徴として、磁気閃光現象 (磁界へのばく露により、目を閉じていても閃光を感じる現象であり、人間では磁界への感受性が最も高い) を新たに防護すべき対象とし、中枢神経系のモデルとして採用したことが挙げられる。また参考レベルを導出するための計算として、以前のシンプルな球体モデルから詳細な 2mm の分解能を持つ人体数値計算モデルに変更したことも特徴である。その結果、改訂前の版で用いていた単純な球体モデルよりも、最悪条件での誘導量が低く推定された。さらに、以前は磁界が体内に誘導する電流密度を基本制限の対象としていたが、改訂版では体内に誘起される誘導電界での評価が基本制限の対象となった。この基本制限を制定するにあたっては、体幹部を「頭部の中枢神経系」と「頭部および胴体の全組織 (の末梢神経系)」の 2 つに分け、「頭部の中枢神経系」では網膜-視神経系への刺激による磁気閃光を対象とし、「頭部および胴体の全組織 (の末梢神経系)」では、末梢神経系への刺激による知覚反応を対象として、それぞれの基本制限を策定している (図 1)。

このガイドライン自体は、特定の磁界発生源などを対象としているわけではなく、人体が占める空間における磁束密度についての許容値を策定している。しかし、現実的には、磁界発生源を対象として、磁界ばく露の許容値への適合性を考える場合が多い。その際、まず第一に対象空間での磁束密度を測定し、その測定値を「参考レベル」と比較することが一般的である。磁界の測定値が参考レベル以下である場合、その対象空間はガイドラインに適合しているといえる。鉄道分野における磁界の測

定手順やその規格は、国際電気標準会議 (IEC) の技術仕様様の IEC/TS62597 「鉄道環境における電子及び電気機器による磁場レベルの人体暴露に関する測定手続き」<sup>15)</sup> や鉄道の地上設備の評価と関係の深い IEC62110 「交流電力システムから発生する電界及び磁界の強さ - 公衆の人体ばく露を考慮した測定手順」<sup>16)</sup> が定められている。一方の国内規格としては車両の磁界測定について JIS E 4018:2012 「鉄道車両-磁界測定方法」<sup>17)</sup> があり、一部前出の IEC/TS62597 の車両測定部分を参考に策定されているほか、IEC62110 の日本語訳規格として JIS C 1911:2013<sup>18)</sup> がある。これらについては、加藤らの別著に詳しい<sup>19)</sup>。

また、これらの測定法による測定値が参考レベルを超過した場合、ガイドラインでは、第一義的には人体内に電磁誘導により誘導される誘導電界量 (ばく露量) の推定評価を行い、基本制限と比較する手順となっている。すなわち、参考レベルを超過したからといって、すぐにガイドラインに不適合と判断するわけではない。

しかし、ばく露量を評価するためには、ガイドラインでは解像度 2mm の数値人体計算モデルを用いた評価を推奨しているため、同様の計算モデルを用いた数値計算による評価が必要となる。この基本制限との比較の上でばく露評価値が基本制限以下であれば、ガイドラインに適合していると判断できるが、基本制限を超過している場合は不適合と判断し、磁界低減策をとることとなる。ガイドラインの考え方に基づく適合性の判断に関するフローを図 3 に示す。鉄道車両内の磁界を考えた場合、車載機器など人体に比較的近接する磁界発生源があるため、送電線等の地上電力設備と比較すると磁束密度が高く、また磁界分布が空間的に (また時間的に) 不均一な値となり、場合により磁界測定値が参考レベルを超えることが懸念される。この場合にはガイドラインに則った評価として、基本制限による適合性を確認する必要がある。参考レベルは、均一磁界を想定して安全側のレベルが設定されているため、より適切に評価を行う方法を整

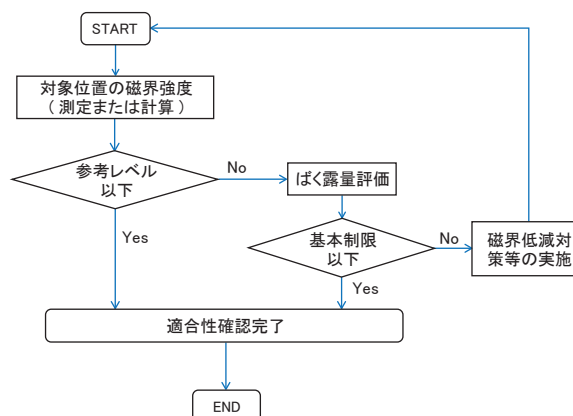


図3 ICNIRP ガイドラインへの適合性評価手順

備する必要性は高いと考える。

### 3.3 ガイドラインの根拠

ICNIRPのガイドラインの基本制限の根拠は、ボランティアによる研究である。磁気閃光については、Saundersらの研究により、20Hzにおいて網膜における誘導電界強度での閾値は50～100mV/mと見積もられた。改訂前のガイドラインでは、この磁気閃光は健康影響として防護する対象ではなかったが、その後の知見により、磁気閃光に関わる視神経－網膜の構造が脳（中枢神経）の良いモデルであるとする知見が一般的となったため、防護の対象となった。また、末梢神経の磁界刺激については、Reillyら、Nyenhuisら、Soらによりいくつかの研究が行われたが、その結果として刺激閾値は1-3kHzで4V/m程度の実験値が得られ、理論的にこれ以下の周波数ではほぼ一定であると考察されている。ガイドラインでは、これらの結果を基に、図1に示す基本制限を策定しているが、結果として限られた実験結果をもとに、実験的根拠がない帯域は理論に基づいた外挿により基本制限が策定されている。ICNIRPの情報をもとに考え得る外挿部分を図1および図2に示す。

一方、鉄道システムにおいては、き電（直流／交流）、車載機器（バスライン、モータ、主インバータ、リアクトル）などから発生する磁界は、強度は弱いものの、その周波数は、一様ではなく走行状態における機器の特性、機装のしかたなどにより周波数の変動、空間的な不均一が生じている。特に周波数については直流～20kHz程度と、ガイドラインの外挿部分を含む幅広い帯域で発生している。したがって、これらの周波数帯については、生物実験に基づいて、ガイドラインの基本制限の妥当性を確認することが、今後の課題であると考えられる。

## 4. ガイドラインの検証のための取組み

前節で述べたように、鉄道システムではガイドラインの基本制限を策定する際に生物学的な検討による知見がない周波数帯においても磁界が発生している。そのため、商用周波数帯の磁界による短期影響（神経刺激作用）から一般公衆を防護するための規制の今後を考える上でも、生物学的な知見が蓄積されることが望ましい。しかし、鉄道に関連する幅広い周波数帯の磁界の短期影響を生物学的に検討するには、ボランティア実験は非現実的であり、また動物個体を用いる試験も、膨大な費用と期間が必要となるため、探索的に行う事は難しい。一方、近年ヒトiPS細胞の作製法の発見などを契機として、細胞を用いる研究も様々な目的に向けて発展している。この細胞を用いる場合、ボランティアや動物個体を用いる試験と比較して、ほぼ均質な性質を持つ神経細胞を必要

量、必要な時に作成することが可能であり、刺激による感覚の代わりに神経細胞そのものの活動を指標として検討することで、個体を用いる試験の量的な制約や曝露条件の限界を補い、磁界ばく露による神経刺激の閾値に関する周波数の具体的な依存特性などを明らかにすることが可能である。

そこで、鉄道総研では、細胞を用いた磁界による神経刺激作用を解析するため、神経系細胞の培養法の確立や磁界曝露時の細胞の動態をリアルタイムに観察する磁界刺激観察装置の開発に取り組んでいる。

神経細胞そのものを対象とした試験管レベルでの実験系により、人間で起きる神経刺激を評価しガイドラインを検証するためには、まず第一に、神経細胞を磁界にばく露した際の誘導電界量を詳細に評価し、ガイドラインで採用されている人ボランティアでの実験による閾値よりも大きな誘導電界量が得られるような磁界ばく露装置を設計することが必要である。そして、実験の精度を上げるためには、安定した細胞培養系を確立し、磁界ばく露装置との干渉なしに1細胞レベルで細胞活動を観察できる仕組みが必要である。

現在、磁界ばく露装置については、末梢神経の刺激閾値である4V/mを目標とし、外部研究機関とも連携しながら検討を行っている。これは、細胞を用いる一般的な試験管試験では、細胞が平面ディッシュ上に撒かれた後に自発的に形成する2次元的なネットワークを対象とするため、網膜のような3次元の構造を持つ組織の特徴により大変低い閾値を持つと考えられている磁気閃光を対象として扱うことが難しいためである。装置製作上の種々の制約を考え合わせて検討した結果、試験に使用する培養シャーレの大きさを考慮した上で、シャーレ内に4V/mの誘導電界を発生させるための現実的な最低限の条件は、周波数200Hz、中心の磁束密度500mTである

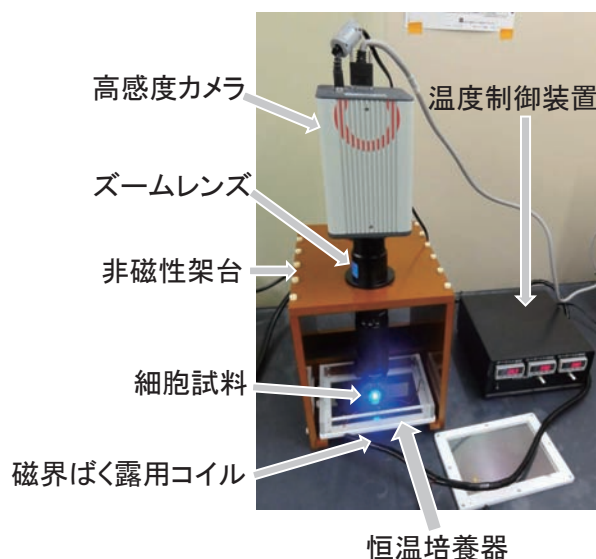


図4 磁界ばく露に対応した細胞観察装置

## 特集：人間科学

ことが分かった。この結果に基づき、ばく露装置を設計・製作するとともに、他の周波数に変更する場合の条件検討も進めている。

また、神経細胞の観察については、焦点距離の長いズームレンズ型の顕微用レンズを用い、樹脂製の非磁性の架台によりレンズ、照明、細胞培養容器を保持することで、磁界ばく露に干渉せずに1細胞レベルで神経活動の指標であるカルシウムイオンの動態の観察を可能とする観察装置を開発している(図4)。今後、ラット胎児の大脳皮質初代細胞、マウスES細胞由来の神経細胞を用い、磁界ばく露による神経活動の惹起閾値の検討を行うとともに、将来的にはヒトiPS細胞由来の神経細胞を用い、ヒトにより近い材料での閾値に関する知見を蓄積することで、ガイドラインの検証を行う予定である。

## 5. おわりに

電磁界の健康影響評価を受け、その防護のための規制化や、対応した規格化が進んでいる。一方で、その基となるICNIRPガイドラインの策定過程を考えると、鉄道システムから発生する広範な周波数については、ガイドラインの妥当性を検討する必要性もある。これに対し、鉄道総研では、具体的なガイドラインの検証を念頭に磁界の刺激作用の評価を進め、鉄道システムの磁界の安全性を確認するための研究を進めている。

このような基礎的な研究以外にも、鉄道総研では低周波磁界の測定手法や予測手法の研究開発を進めている。さらには、鉄道磁界の測定規格開発、鉄道における磁界規制のあり方などにも関わりながら、鉄道における磁界の問題について、科学的知見から、その具体的な扱いまで、この問題に適切に対処するためのさまざまな取組みを進めている。

鉄道システムで発生している磁界そのものは極めて低いレベルである。しかし、そのような要因に対しても適切に確認することは、安心な鉄道としての信頼性を向上させるために必要であり、今後も取組みを続けていく所存である。

## 文 献

- 1) Wertheimer, N. and E. Leeper: Electrical wiring configurations and childhood cancer, *Am. J. Epidemiol.*, 109, pp. 273-284, 1979.
- 2) WHO: Environmental Health Criteria 238: Extremely Low Frequency Fields (2007).
- 3) International Commission on Non-Ionizing Radiation Pro-

tection, Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz - 100 kHz), *Health Physics*, Vol. 99, 818-836 (2010).

- 4) Michinori Kabuto, et al., Childhood leukemia and magnetic fields in Japan: A case-control study of childhood leukemia and residential power-frequency magnetic fields in Japan. *Int J Cancer*, 2006;119(3):643-650.
- 5) A Ahlbom, N Day et al. 2000. A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukaemia, *Brit J Cancer*; 83: 692-698.
- 6) IARC monograph Vol. 80 (2002): Non-Ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields.
- 7) WHO: Environmental Health Criteria 232: Static Fields (2006).
- 8) WHO: Environmental Health Criteria 238: Extremely Low Frequency Fields (2007).
- 9) SCENIHR, Opinion on: Health Effects of Exposure to EMF. 2009.
- 10) SCENIHR, Final opinion on potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF). 2015.
- 11) 池畑, 中園, 重光, 宮城, 超低周波電磁界の健康リスク評価動向, 平成28年電気学会全国大会, S4-3
- 12) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Guidelines on Limits of Exposure to Static Magnetic Fields, *Health Physics*, Vol. 96, 504-514 (2009).
- 13) ICNIRP: "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)", *Health Physics*, Vol. 74, 494-522 (1998).
- 14) ICNIRP Guidelines: "For limiting exposure to electric fields induced by movement of the human body in a static magnetic field and by time-varying magnetic fields below 1 Hz", *Health Physics*, Vol. 106, 418-425 (2014).
- 15) IEC/TS 62597 ed1.0: "Measurement procedures of magnetic field levels generated by electronic and electrical apparatus in the railway environment with respect to human exposure" (2011).
- 16) IEC Standard 62110: "Magnetic field levels generated by a.c. power systems - Measurement procedures with regard to public exposure" (2009).
- 17) JIS E 4018: 2012, 鉄道車両一磁界測定方法 (2012)
- 18) JIS C 1911:2013, 交流電力システムから発生する電界及び磁界の強さ－公衆の人体ばく露を考慮した測定手順
- 19) 加藤, 長谷川: 在来鉄道車両内の低周波磁界に関する測定手法および予測手法 鉄道総研報告, Vol.28, No.9, pp. 29-34, 2014