

静磁界と変動磁界の 複合曝露による変異原性の評価

吉江 幸子* 池畑 政輝*
鈴木 敬久** 多氣 昌生**

Evaluation of Mutagenic Effect of Complex Magnetic Fields with Static and Time-varying Magnetic Fields

Sachiko YOSHIE Masateru IKEHATA
Yukihisa SUZUKI Masao TAKI

The magnetic fields (MFs) of inside and/or outside electric cars are ranged from static to intermediate frequency (IF) and intricately overlapped in consequence of driving mode, train location, vehicle installed-devices, etc. Although there are a lot of studies concerning biological effects of extremely low frequency (ELF)-MF and radiofrequency electromagnetic field because of public concern of its health risks, those regarding the complex MFs have been insufficient. In this study, the mutagenic effect of complex MF with static-, ELF- and IF-MFs was evaluated using the mutation assay in bacteria (Ames' test) and mammalian cells (the mouse lymphoma assay). Consequently, no mutagenicity was observed under all of exposure conditions in this study. This suggests that the complex MF does not have mutagenicity that induces point mutation or chromosomal mutation.

キーワード：複合磁界，安全性，変異原性，生体影響，細胞

1. はじめに

輸送，通信，医療など様々な分野における技術革新が進む近年，日常環境において公衆が種々の周波数の磁界に曝露する機会が増えており，電気鉄道もその1つである。鉄道における磁界の特徴として，それぞれの発生源ごとに異なる特徴を持った磁界が，複合して発生することが挙げられる。その周波数帯域は静磁界から中間周波変動磁界（300Hzから10MHz：世界保健機関（WHO）の定義による）であることが知られている¹⁾。具体的には，車両内外で発生する主な磁界の周波数は，架線，レールおよび主電動機からの0～数十Hz，車載機器からの50/60Hz，主変換装置からのkHz帯である。これらの磁界は，車載機器の位置，列車の位置，走行モードなどの運転状況により空間的・時間的に複雑に変化する。実際の鉄道環境では，個々の磁界成分の磁束密度は，国際非電離放射線防護委員会（ICNIRP）の人体防護ガイドライン²⁾，³⁾と比較して小さいと考えられる。しかし，ICNIRPのガイドラインやWHOの環境保健クライテリア（EHC

⁴⁾，⁵⁾では，主として単一の磁界の均一曝露による研究結果をもとにしており，鉄道の特徴でもある異なる周波数帯の磁界を同時に曝露する複合磁界に関しては，具体的な実験研究に基づいた評価はほとんど行われていない。

一方で，磁界の健康影響については，静磁界や極低周波変動磁界（300Hz未満）の短期曝露による急性影響（神経刺激作用）および高周波変動電磁界のエネルギー吸収による熱作用があることが科学的に確立されている。ICNIRPの人体防護ガイドラインでは，これらの短期曝露による急性影響からの防護のために，基本制限値および磁界の参考レベルが決められている。しかし，発がんなどの長期影響に関しては，評価をするための十分な知見が得られていない。実際，長期曝露による生体作用や未だ研究が十分でない複合磁界の影響に関しては，EHCにおいても科学的な知見を得るための更なる研究の推進が勧告されている。

このような背景から，本研究では，複合磁界の影響を評価するため，電気鉄道において発生する静磁界，極低周波変動磁界，中間周波変動磁界を組み合わせた複合磁界を生物試料に曝露可能な装置を構築し，哺乳類細胞や細菌を用いて，発がんにかかわり，遺伝子の変異を起す作用（変異原性）に関する評価を行った。

* 人間科学研究部 生物工学研究室

** 首都大学東京 都市教養学部理工学系電気電子工学コース

特集：環境技術

2. 複合磁界曝露装置および曝露条件

2.1 2周波数同時曝露装置

静磁界と極低周波変動磁界の2周波数の複合磁界を曝露することが可能な磁界曝露装置として、2種類の曝露装置を用いた(図1)。静磁界で最大5Tを印加することが可能な超電導磁石のボア内部に、50Hz変動磁界を印加するコイルを挿入した装置(静磁界と50Hz変動磁界は同方向)を曝露装置1とした⁶⁾。本曝露装置は、温度を制御することが可能な恒温室に設置した。一方、曝露装置2は、2組のメリット型コイルを直交するように配置し、静磁界と50Hz変動磁界を発生させた。本曝露装置は、炭酸ガス培養器中に設置した。両曝露装置ともに、細菌や細胞の培養に適した37°Cでの温度制御が可能である。

2.2 3周波数同時曝露装置

静磁界、極低周波変動磁界、中間周波変動磁界の3周波数の磁界を同時に曝露するため、曝露装置2の内部に2kHz変動磁界を発生するヘルムホルツ型コイルを他の

コイルと直交するように組み込むことで、3周波数を同時に曝露することが可能となるコイルを開発した(図2(a))。以下、本コイルを組み込んだ3周波数同時曝露装置を曝露装置3とする。中間周波変動磁界を発生するコイルにて、0.51mTの磁界を発生させたときの磁界分布を図2(b)に示す。図2(b)に示す通り、曝露装置3の曝露空間では、磁束密度分布が±5%以内のほぼ均一な2kHz変動磁界の発生が可能である。

2.3 磁界曝露条件

鉄道環境においては、静磁界が1mT程度、極低周波変動磁界が0.1mT以下、中間周波変動磁界が10nT以下と想定されることが報告されている¹⁾。本研究では、これらを考慮した上で、磁束密度は実際の環境より大きい条件となるよう、静磁界、極低周波変動磁界、中間周波変動磁界の比を変化させ、最大6種類の磁界条件で曝露を行った。磁界曝露条件を表1に示す。なお、静磁界は直流による磁界なので、0Hzとして示している。

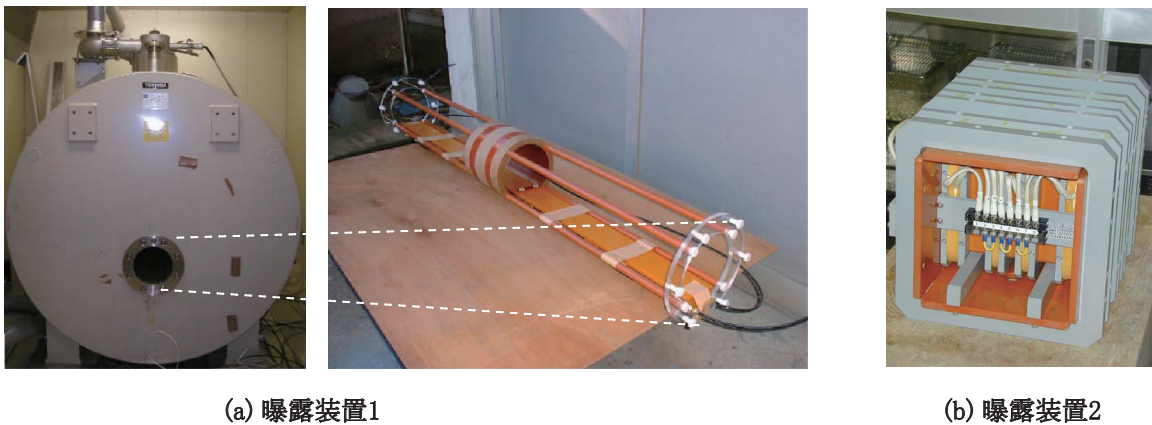


図1 磁界曝露装置

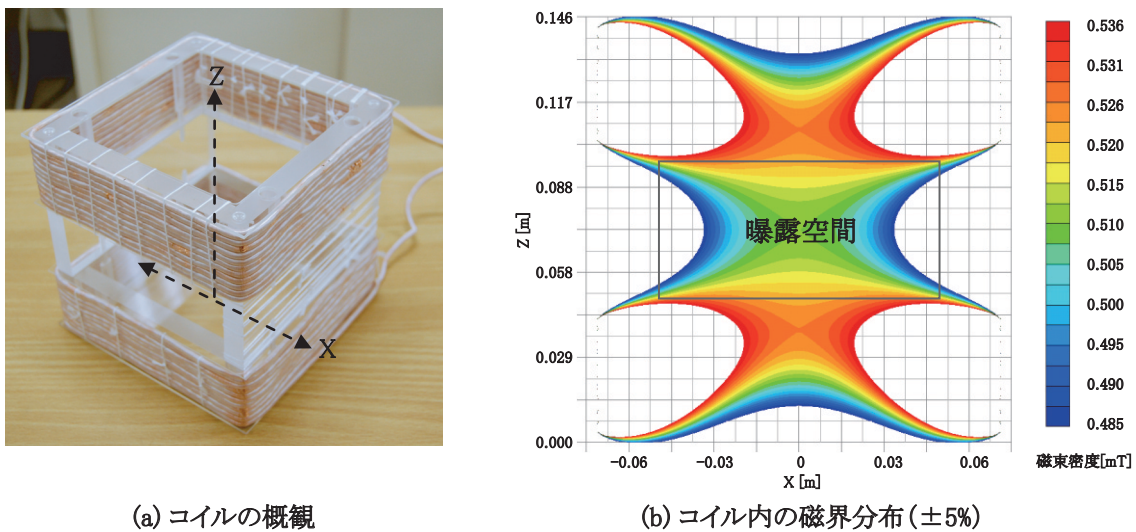


図2 2kHz変動磁界曝露コイル(3周波数同時曝露装置用)

コイル最下部の中心を原点とし、辺方向にX軸、高さ方向にZ軸として示した。

表1 複合磁界曝露条件

| 曝露条件 No. | 曝露装置 | 磁束密度 (mT) | | |
|----------|--------|--------------|--------------------|--------------------|
| | | 静磁界 (0Hz) | 極低周波変動磁界 (50Hz) | 中間周波変動磁界 (2kHz) |
| ① | 曝露装置 1 | 5000 | 1 | - |
| ② | | 20 | 1 | - |
| ③ | 曝露装置 2 | 1 | 0.5 | - |
| ④ | | 1 | 0.1 | - |
| ⑤ | | 0.5 | 0.5 | - |
| ⑥ | 曝露装置 3 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |

3. 変異原性の評価方法

発がん過程の初期段階には、遺伝子の変異が密接に関与している。このため、変異を引き起こす作用（変異原性）を調べることは、発がん作用の有無を調べる上で重要である。遺伝子の変異は、1～数塩基の変異から遺伝子の広い範囲で起こる変異、さらに染色体レベルで変化する変異など多岐にわたるため、それぞれを検出可能な変異原性試験法が構築されている。本研究では、検出できる変異の種類が異なる2種類の変異原性試験法を用いることにより、複合磁界による影響の評価を行った。これにより、発がん性の評価の精度を高めることができると考える。

3.1 微生物を用いた変異原性試験

微生物を用いた変異原性試験（エイムス試験）は、化学物質などを投与した際に遺伝子の変異を起こす頻度（変異頻度）を調べる試験であり、発がん試験の1次スクリーニング試験として常用されている方法である。本研究では、標準株として用いられているサルモネラ菌 TA100株およびTA98株を用いて、複合磁界の変異原性を調べた（図3）。TA100株によりDNA上の塩基が置換する変異を、TA98株により塩基の挿入によるフレーム

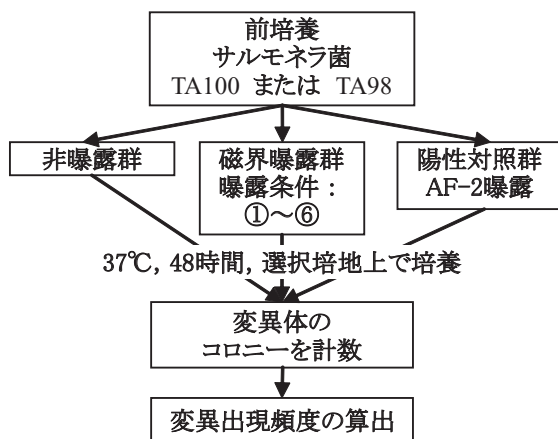


図3 エイムス試験の流れ

シフト変異を、それぞれDNAから翻訳されるアミノ酸配列が変化することで検出可能である。どちらの変異も最低1塩基の変化で起こることから点変異と呼ばれる。本研究では、前培養した菌株を3群に分け、非曝露群、磁界曝露群、陽性対照群とした。陽性対照群として、発がん性物質である2-(2-Furyl)-3-(5-nitro-2-furyl)acrylamide(AF-2)に曝露することにより、試験系の発がん性物質への感受性を確認した。前培養した2種類の菌株は、特定の変異を起こした菌体のみが生育できる選択培地上で、48時間、それぞれの曝露条件下で培養した。特定の変異を起こした菌体は、選択培地上で増殖し、数mmのかたまり（コロニー）を作るので、それを計数し、選択培地1枚あたりのコロニー数を変異出現頻度とした。なお、エイムス試験は、表1の複合磁界曝露条件①、②、③、④、⑤、⑥で曝露実験を行った。

3.2 哺乳類細胞を用いた変異原性試験

マウスリンフォーマ試験は、高等な生物であるマウスのリンパ腫由来の培養細胞（L5178Y *tk*^{+/−}3.7.2c）における変異を指標として、変異原性を調べる方法である。この方法では、エイムス試験で検出できる点変異に加え、染色体レベルでの比較的大きな変異も検出できるこ

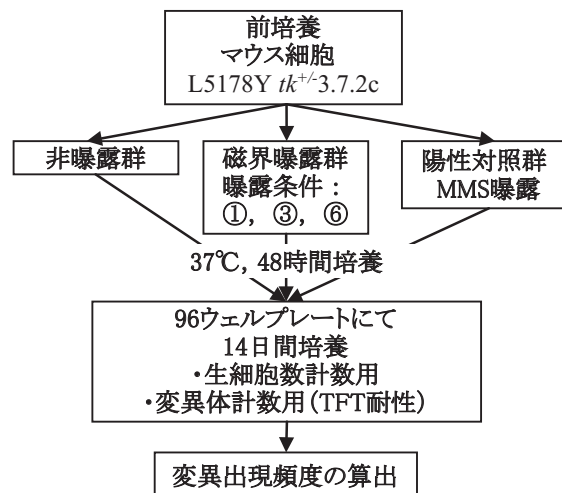


図4 マウスリンフォーマ試験の流れ

特集：環境技術

とが特徴である。本研究では、前培養した細胞をエイムス試験と同様に、非曝露群、磁界曝露群、陽性対照群の3群に分けた(図4)。マウスリンフォーマ試験では、陽性対照群として、発がん性物質であり、本試験系で陽性対照群に用いる物質として推奨される methyl methanesulfonate (MMS) を用いた。48時間の曝露後、選択培地にて培養を行い、特定の変異を誘発した細胞のみが増殖することを利用して計数し、生存細胞数あたりの変異出現頻度として算出した。なお、マウスリンフォーマ試験は、表1の複合磁界曝露条件①、③および⑥で曝露実験を行った。

4. 複合磁界の生体影響評価結果

4.1 微生物を用いた変異原性試験

TA98株、TA100株のどちらにおいても、曝露条件①～⑥で、非曝露群と磁界曝露群との間に変異頻度の差は見られなかった(表2)。一方、発がん性物質(AF-2)を用いた陽性対照群では、非曝露群と比較して有意な差が見られたことから、本試験では、発がん性の評価は正常にできていることが確認された。TA98株は塩基対置換型を、TA100株はフレームシフト型の点変異をそれぞれ検出することができる。従って、少なくとも本研究で対象とした6つの条件の複合磁界は、これら2種類の点変異を誘発しないことがわかった。また、条件⑥の3周波数複合型の磁界であっても、塩基対置換型とフレームシフト型の変異を誘発しないことがわかった。

4.2 哺乳類細胞を用いた変異原性試験

マウスリンフォーマ試験でも、3つの複合磁界曝露条件①、③および⑥のどの条件においても非曝露群と磁界曝露群の間には変異頻度に有意な差は見られなかった(図5)。また、マウスリンフォーマ試験では、変異の種

類により、検出される細胞のコロニーの大きさが変化する。本研究では、非曝露群と磁界曝露群との間で、コロニーの大小の数にも差がないことが確認された。このことは、曝露した複合磁界条件では、点変異も染色体レベルでの変異も誘発されないことを示す。一方、陽性対照群(発がん性物質:MMS)では非曝露群と比較して、有意な変異頻度の上昇が観察されたことから、本試験では、正常に変異原性を検出できていることが確認された。以上の結果から、本研究で検討した3つの条件の複合磁界は、マウスリンフォーマ試験で検出される種々の変異を誘発しないことがわかった。

以上のように、エイムス試験、マウスリンフォーマ試験という2種類の異なる変異原性試験のいずれにおいても、2周波数および3周波数の複合磁界曝露による影響は認められなかった。

5. 考察

本研究では、エイムス試験およびマウスリンフォーマ試験を用いて、鉄道車両で同時に発生すると考えられる2周波数および3周波数の複合磁界の変異原性を調べた。また、これまでに鉄道総研では、これらの変異原性試験の他に、染色体組み換え時に起こる変異を検出できる酵母変異原性試験も実施してきた⁶⁾。表3に本研究で得られた結果も含め、3種の変異原性試験の結果をまとめたものを示す。

複合磁界については、複合磁界曝露条件①における酵母変異原性試験を除いて、いずれの変異原性試験を用いても、全ての複合磁界曝露条件において、影響は観察されなかった。また、酵母変異原性試験において、複合磁界曝露条件①の場合に統計的に有意な増加が観察されたが、5Tという強い静磁界を単独で曝露した場合(単一磁界曝露条件:単-①)にも同様な結果が得られているこ

表2 複合磁界曝露によるエイムス試験の結果

| 曝露条件 | サルモネラ菌 TA100 | | | サルモネラ菌 TA98 | | |
|-------------------------------------|--------------|----------|----------------------|-------------|--------|----------------------|
| | 非曝露群 | 磁界曝露群 | 陽性対照群 ⁱⁱ⁾ | 非曝露群 | 磁界曝露群 | 陽性対照群 ⁱⁱ⁾ |
| ①0Hz(5000mT)+50Hz(1mT) | 133 ± 10 | 136 ± 9 | 443 ± 28 | 43 ± 2 | 44 ± 2 | 324 ± 69 |
| ②0Hz(20mT)+50Hz(1mT) | 102 ± 13 | 96 ± 15 | 271 ± 22 | 22 ± 6 | 21 ± 5 | 504 ± 30 |
| ③0Hz(1mT)+50Hz(0.5mT) | 87 ± 14 | 86 ± 12 | 287 ± 58 | 22 ± 7 | 20 ± 7 | 524 ± 37 |
| ④0Hz(1mT)+50Hz(0.1mT) | 98 ± 17 | 97 ± 14 | 307 ± 32 | 19 ± 6 | 18 ± 6 | 481 ± 56 |
| ⑤0Hz(0.5mT)+50Hz(0.5mT) | 100 ± 15 | 94 ± 14 | 327 ± 33 | 21 ± 6 | 19 ± 5 | 512 ± 37 |
| ⑥0Hz(0.5mT)+50Hz(0.5mT)+2kHz(0.5mT) | 129 ± 12 | 120 ± 14 | 433 ± 42 | 26 ± 4 | 24 ± 6 | 573 ± 38 |

i) 数値は、変異出現頻度(1プレートあたり)およびその標準偏差

ii) 陽性対照群:発がん性物質AF-2を曝露

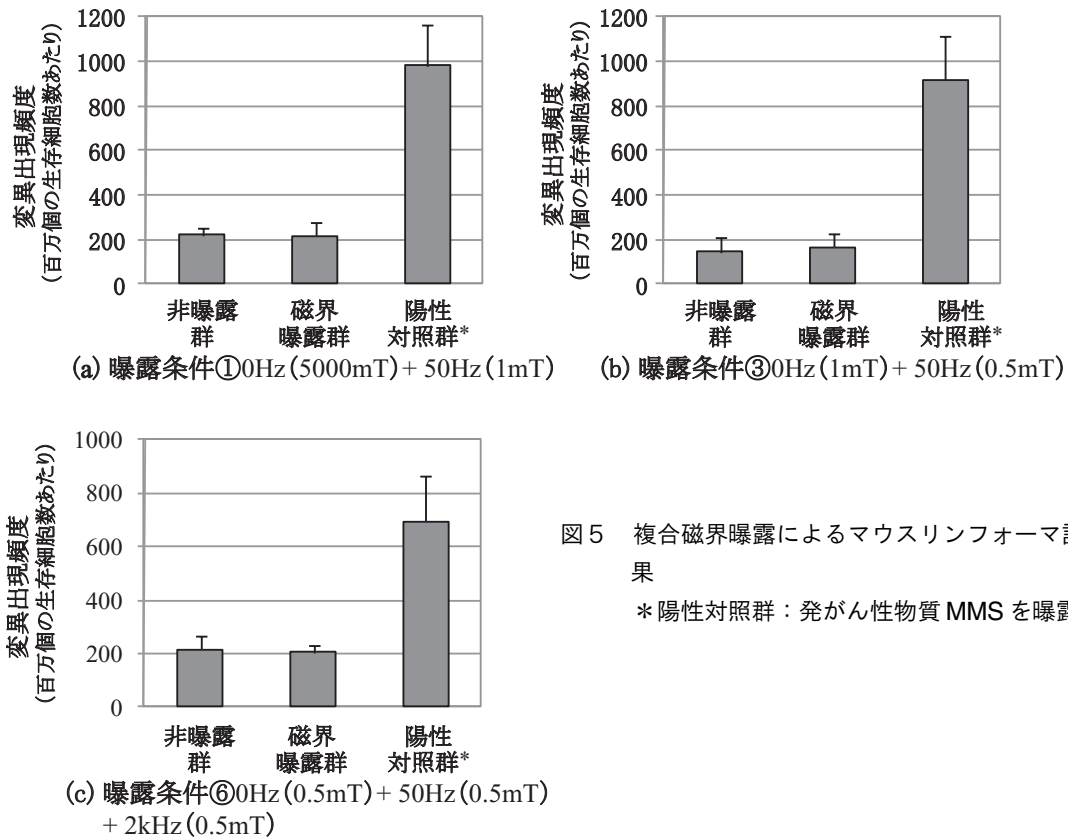


図5 複合磁界曝露によるマウスリンフォーマ試験の結果

* 陽性対照群：発がん性物質 MMS を曝露。

とから⁷⁾、この有意差は強い静磁界成分の影響によるものと考えられる。従って、複合磁界が3種類の変異原性試験により検出可能な変異を誘発しないことが示されたと考える。

一方、極低周波変動磁界 (50Hz) は、40mT という本研究で曝露した磁界より大きな磁束密度条件下 (単-②) でも、エイムス試験、酵母変異原性試験などにおける変異出現頻度の上昇は確認されていない⁸⁾。また、中間周波変動磁界も、本研究で検討した磁束密度より高い条件下 (単-③) であっても、エイムス試験、マウスリンフォーマ試験、酵母変異原性試験において、変異出現頻度の上昇は確認されていない^{9), 10)}。このように、個々の磁界成分では、非常に強い磁束密度条件下の静磁界を除いて変異原性はない、または検出できないほど弱いと考えられる。

本研究では、これらの静磁界、極低周波変動磁界、中間周波変動磁界の磁界成分を組み合わせても変異原性が確認されないことを示した。このことは、電気鉄道で発生する複数の周波数の磁界が重なり合っても相乗的な影響はなく、生体への作用が増幅されないことを示す。

以上のように、静磁界成分の磁界強度が実環境の数万倍の非常に強い静磁界条件を除いて、単一磁界でも複合磁界でも憂慮すべき影響は見られないことがわかった。さらに、本研究で曝露した磁界の強度は、鉄道環境で想

定される磁界強度に対して、最大値と同程度～数万倍であることを考えると、実際の電気鉄道環境において曝露するレベルの磁界が、変異原性を持ち、長期的に発がんなどの顕著な生体影響を引き起こす可能性は極めて低いと言える。

6. 結論

本研究では、鉄道で発生している磁界として、静磁界、極低周波変動磁界、中間周波変動磁界からなる複合磁界の変異原性を、エイムス試験とマウスリンフォーマ試験という2つの試験系を用いて評価を行った。この結果、いずれの複合磁界条件においても変異原性は確認されなかった。本研究の結果から、車両内外で発生する複合磁界への曝露により、生体に変異を誘発する可能性は極めて低いと考えられる。

7. おわりに

日常環境中の磁界曝露、磁界の健康影響に対する公衆の関心は依然として高い。これに対して、WHOでは、最新の科学的知見を踏まえて電磁界の健康リスク評価を行うため、1996年より国際電磁界プロジェクトを実施している。これまでに、静磁界に関するEHC⁴⁾が2006年に、

特集：環境技術

表3 各種変異原性試験による磁界曝露試験結果

| 試験方法 | 複合磁界曝露条件 ⁱⁱ⁾ | | | | 単一磁界曝露条件 | | |
|-------------|---------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--|-------------------------|------------------------|--------------------------|
| | ①： 0Hz(5000mT)+ 50Hz(1mT) | ②： 0Hz(20mT)+ 50Hz(1mT) | ③： 0Hz(1mT)+ 50Hz(0.5mT) | ⑥： 0Hz(0.5mT)+ 50Hz(0.5mT)+ 2kHz(0.5mT) | 単-①： 0Hz (5000mT) | 単-②： 50Hz (40mT) | 単-③： 2kHz (0.91mT) |
| エイムス試験 | 陰性 | 陰性 | 陰性 | 陰性 | 陰性 | 陰性 | 陰性 |
| 酵母変異原性試験 | 統計的有意 | 陰性 | 陰性 | - ⁱ⁾ | 統計的有意 | 陰性 | 陰性 |
| マウスリンフォーマ試験 | 陰性 | - ⁱ⁾ | 陰性 | 陰性 | - ⁱ⁾ | - ⁱ⁾ | 陰性 (0.8mT) |

i) 未実施

ii) 複合磁界曝露条件①②③⑥は表1の曝露条件①②③⑥に対応する。

100kHz以下の変動磁界（および電界）に関するEHC⁵⁾が2007年にそれぞれ刊行された。さらに、100kHz-300GHzの電磁界に関するEHCの発刊が予定されている。これに関連して、2011年5月に、国際がん研究機関(IARC)が無線周波電磁界(30kHz~300GHz)の発がん性に関して、2B(発がん性があるかもしれない)に分類するとの評価結果を公表している¹¹⁾。このような中で、複合磁界とともに、特に中間周波数帯の生体影響に関する知見は未だに少ない。電気鉄道や近年普及しつつあるIH調理器などから中間周波変動磁界が発生することを考えると、具体的な生物実験に基づき生体影響を評価することは、重要であると考えられる。そのため、筆者らは、中間周波変動磁界についても、生体影響の評価を進めているところである。

一方、国内においては初となる磁界規制が2011年3月に経産省省令改正として公示され、2011年10月より、公衆の防護を目的とした電力設備に対する商用周波数を対象とした磁界規制が施行され、さらに、鉄道に関する磁界規制についても、経産省の規制で対象となる電力設備と同等の設備については、規制が導入される予定である。一方、鉄道に特有な設備由来の磁界については、今後検討が進むものと考えられる。鉄道総研においては、生物を用いた曝露試験による生体影響評価の他、数値人体モデルを用いた鉄道環境における電磁界の人体曝露量評価の検討も進めている。今後、両方の研究から得られる知見を組み合わせることにより、鉄道環境における電磁界の安全性評価をより適切に行うことが可能となると考える。

謝辞

本研究の一部は、(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構「運輸分野における基礎的研究推進制度」により実施した。

文献

- 1) 水間毅：鉄道車両からの磁界放射の実態，EMC，No. 218，p.13-23，2006
- 2) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, “Guideline of limits of exposure to static magnetic fields. Health Physics, Vol. 96, No. 4, pp. 504-514, 2009.
- 3) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz),” Health Physics, Vol. 99, No. 6, pp. 818-836, 2010.
- 4) World Health Organization, Static fields, Environmental Health Criteria 232, 2006.
- 5) World Health Organization, Extremely low frequency fields, Environmental Health Criteria 238, 2007.
- 6) 池畑政輝，鈴木敬久，岩坂正和，多氣昌生：静磁場と変動磁場の同時曝露による生体影響評価手法，鉄道総研報告，Vol.20，No.1，pp.35-40，2006
- 7) 池畑政輝，川崎たまみ：磁場の生体作用評価，鉄道総研報告，Vol.19，No.6，pp.35-40，2005
- 8) 池畑政輝，小穴孝夫：変動磁場の生体作用の研究，鉄道総研報告，Vol.15，No.10，pp.27-32，2001
- 9) 池畑政輝，中園聡，和氣加奈子，鈴木敬久，吉江幸子，早川敏雄：微生物を用いた中間周波磁界の変異原性評価，鉄道総研報告，Vol.22，No.5，pp.41-44，2008
- 10) Nakasono, S, Ikehata, M, Dateki, M., Yoshie, S., Shigemitsu, T. Negishi, T. “Intermediate frequency magnetic fields do not have mutagenic, co-mutagenic or gene conversion potentials in microbial genotoxicity tests”, Mut. Res. Vol. 649, pp. 187-200, 2008.
- 11) Baan, R., Grosse, Y., Lauby-Secretan, B., El Ghissassi, F., Bouvard, V., Benbrahim-Tallaa, L., Guha, N., Islami, F., Galichet, L., Straif, K., “Carcinogenicity of radiofrequency electromagnetic fields”, The Lancet Oncology, Vol. 12, No. 7, pp. 624-626, 2011.