

## 静磁界と極低周波変動磁界の複合曝露による生体作用評価

環境工学研究部 生物学  
副主任研究員 吉江幸子

### 1. はじめに

通信, 輸送, 医療など様々な分野における技術革新の進む近年, 日常環境において種々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, 種々の磁界が複合的に発生することが挙げられる。例えば車両内外では, リアクトル装置, 電動機, 主変換装置などの車載機器や, 架線およびレールなどが発生源となり, それぞれの発生源ごとに異なる特徴を持った磁界が発生し, その周波数帯域は静磁界から中間周波変動磁界 (300Hz 以上 10MHz: WHO の定義による) であることが知られている<sup>1)</sup>。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。実際には, 個々の磁界成分の磁束密度は人体防護ガイドライン<sup>2), 3)</sup>と比較して充分小さいものの, これらを組み合わせた複合磁界での健康影響評価はほとんど行われていない。一方で, 磁界の健康影響評価については, 極低周波変動磁界 (<300Hz) の短期曝露による急性影響 (神経刺激作用) に関しては科学的に確立しているが, 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。このような背景から, 本発表では, 電気鉄道において発生する静磁界と商用周波変動磁界との複合磁界に着目し, 発がんに関する評価を行った結果を報告する。また, 磁界の生体作用は大変弱いと考えられるため, 極めて強い磁界を曝露することにより, その生体作用をより明確に評価することができると考えられる。そこで, 強力な静磁界曝露による生体作用についても検討を行ったので, 併せて報告する。

### 2. 磁界の安全性評価に関する動向と既往の知見

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, 世界保健機関 (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 EMF プロジェクトを実施している。これまでに, 静磁界に関する環境保健クライテリア (EHC) が 2006年に, 100kHz 以下の変動磁界 (および電界) に関する EHC 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。一方, 人体防護に関して電磁界の国際的なガイドラインを制定する国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) は, 静磁界<sup>2)</sup>ならびに変動磁界 (および電界, 電磁界: 300GHz まで)<sup>3)</sup>の曝露の制限に関するガイドラインを発行している。このガイドラインの極低周波変動磁界の曝露制限は, 科学的に確立した影響を根拠とするため, 前述の通り磁界曝露により体内に生じる誘導電流が神経系に与える短期曝露による影響が主である。このため, 磁界曝露に対する基本制限値 (遵守すべき指標) は誘導電流密度 (公衆で  $2\text{mA}/\text{m}^2$ ) として定められ, その誘導電流を誘導する磁界が参考レベルとして提示されている。また, 静磁界に関しても, 極低周波と同様に磁界内で動く際に生じる誘導電流の影響を防止する目的で曝露許容値が定められている。一方で, 社会的には磁界の長期曝露による発がん作用などの健康影響の可能性に対する関心が高いにも関わらず, 科学的に結論付けられるほどの証拠が得られていないため, 現在は曝露制限の理由には含まれていな

い。さらに、これらの EHC やガイドラインは、主として単一の磁界曝露による研究結果をもとにしているため、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、具体的な研究結果に基づいた評価はほとんど行われていない。このため、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、中間周波変動磁界に関しては、WHO の EHC においても科学的な知見を得るための更なる研究を推奨している。

### 3. 方法

#### 3.1 磁界曝露装置

複合磁界曝露装置として、2 種類の曝露装置を用いた（図 1）。複合磁界曝露装置 1 として、静磁界で最大 5T を印加することが可能な超伝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を構築した。一方、複合磁界曝露装置 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。両曝露装置ともに、37 °C での温度制御が可能である。

静磁界曝露装置には、磁束密度が最大 13T の静磁界を発生することが可能な超伝導磁石を用いた（図 1）。本装置でも、ボア内を 37 °C に制御した。



(a)複合磁界曝露装置 1

(b)複合磁界曝露装置 2

(c)静磁界曝露装置

図 1 磁界曝露装置

#### 3.2 複合磁界曝露による生体作用の検討

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。本研究では、複合磁界の変異原性を調べるため、微生物を用いた変異原性試験（エイムス試験）と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）を行った。エイムス試験は、化学物質やエネルギーを投与した際に微生物の遺伝子の変異を起こす頻度（突然変異頻度）を調べる試験であり、発がん試験の一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。マウスリンフォーマ試験は、より高等な生物であるマウスのリンパ腫由来の培養細胞を用いて、突然変異を調べる方法であるが、エイムス試験では検出できない染色体レベルでの変異も検出できることを特徴としている。2 つの異なる試験を行うことにより、発がん性の評価の精度を高めることができると考える。エイムス試験は、複合磁界曝露装置 1 を用いて、[静磁界：5T, 50Hz 磁界：1mT]、[静磁界：20mT, 50Hz 磁界：1mT]、複合磁界曝露装置 2 を用いて、[静磁界：1mT, 50Hz 磁界：0.5mT]、[静磁界：1mT, 50Hz 磁界：0.1mT]、[静磁界：0.5mT, 50Hz 磁界：0.5mT]の条件で 48 時間の曝露実験を行った。マウスリンフォーマ試験は、曝露条件 と で 48 時間の曝露実験を行った。

### 3.3 強静磁界曝露による生体作用の検討

既往の研究により、磁界曝露による生体作用と活性酸素種との関連が示唆されている。活性酸素種は DNA などの生体物質の損傷を引き起こすことから、活性酸素種に対する影響が磁界の生体作用の原因である可能性が考えられる。そこで、本研究では、活性酸素種の1つであるスーパーオキシドの除去に必要な Superoxide dismutase (SOD) 遺伝子を欠損する大腸菌を用いて変異原性試験を行った。SOD 欠損大腸菌では、スーパーオキシドによる突然変異が誘発されやすいため、スーパーオキシドが磁界の影響を受ければ、突然変異頻度の変化として検出できると考えたからである。本研究では、磁束密度 5, 10, 13T の静磁界に 24 時間曝露することにより、その作用を調べた。

## 4. 結果および考察

### 4.1 複合磁界の評価

エイムス試験では、実験に使用した 2 つの微生物 (TA98, TA100) のどちらにおいても、曝露条件 ~ で、対照群と曝露群との間に突然変異頻度の差は見られなかった (表 1)。一方、発がん性物質 (AF-2) を用いた陽性対照群では、対照群と比較して有意な差が見られたことから、本試験条件にて発がん性の評価は正常にできていることが確認された。本研究で用いた 2 つの微生物では塩基対置換型、フレームシフト型と呼ばれる 2 種類の点突然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 5 つの条件の複合磁界は、これら 2 種類の点突然変異を誘発しないことがわかった。

一方、マウスリンフォーマ試験でも、2 つの曝露条件 および のどちらにおいても対照群と曝露群の間には突然変異頻度に有意な差は見られなかった (図 2)。このことは、曝露した複合磁界条件では、点突然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

表 1 複合磁界曝露によるエイムス試験の結果

曝露条件	<i>S. typhimurium</i> TA100		<i>S. typhimurium</i> TA98			
	対照群	複合磁界曝露群	陽性対照群	対照群	複合磁界曝露群	陽性対照群
DC 5T, 50Hz 1mT	133±10	136±9	443±28	43±2	44±2	324±69
DC 20mT, 50Hz 1mT	102±13	96±15	271±22	22±6	21±5	504±30
DC 1mT, 50Hz 0.5mT	87±14	86±12	287±58	22±7	20±7	524±37
DC 1mT, 50Hz 0.1mT	98±17	97±14	307±32	19±6	18±6	481±56
DC 0.5mT, 50Hz 0.5mT	100±15	94±14	327±33	21±6	19±5	512±37

\*数値は、突然変異出現頻度 (1 プレートあたり) およびその標準偏差を示す。

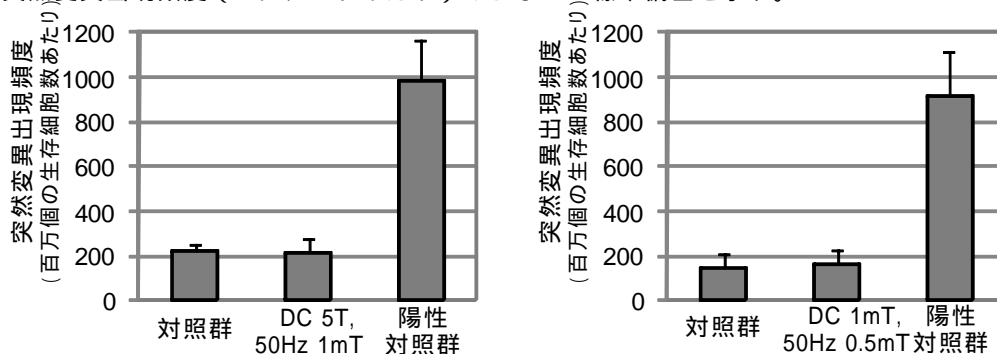


図 2 複合磁界曝露によるマウスリンフォーマ試験の結果

(発がん性物質：MMS)では対照群と比較して、有意な突然変異頻度の上昇が観察されたことから、本試験条件にて正常に評価ができていることが確認された。これらの結果から、本研究で検討した2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突然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複合磁界曝露による影響は認められなかった。

#### 4.2 強静磁界の評価

5, 10, 13Tの静磁界への曝露の結果、SOD欠損株、野生株ともに対照群と曝露群との突然変異頻度の間には、いずれの条件の間にも統計的に有意な差は見られなかった(図3)。また、スーパーオキシドを発生する試薬プルンバギンと共に静磁界曝露を行ったところ、SOD欠損株では突然変異頻度が上昇したが、静磁界の影響は確認されなかった。さらに、生存率も静磁界の影響を受けなかったことから、静磁界はスーパーオキシドの生物作用に対して影響しないことが示された。

すなわち、磁界がスーパーオキシドを介して生体に影響しているとは言えないと考えられる。しかしながら、DNA修復能力の低い生物を用いた我々のこれまでの研究では、静磁界曝露によるわずかな突然変異頻度の上昇と活性酸素種との間に関連性があることが示唆されている<sup>4)</sup>。このため、スーパーオキシド以外の活性酸素種に対する影響の解析やDNA修復能力の異なる生物を用いた検討を行う必要があると考えている。

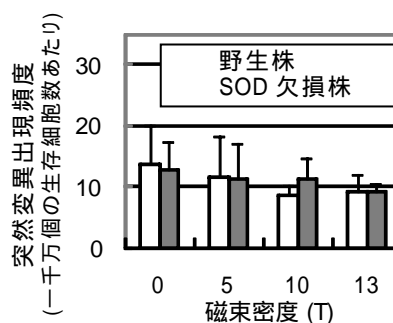


図3 強静磁界曝露によるSOD欠損大腸菌の突然変異頻度への影響

#### 5. おわりに

本研究の結果は、鉄道に関連する複合磁界のうち、静磁界と商用周波変動磁界との複合磁界条件では、突然変異が誘発される可能性は極めて低いことを示している。しかし、鉄道においては、これらの他にインバータ装置などの車載機器から中間周波変動磁界も発生する。中間周波変動磁界については、単独曝露での健康影響を評価するための知見すら極めて少ないため、現在評価を進めているところである。今後、静磁界、商用周波変動磁界、中間周波変動磁界などを組み合わせることで、さらに鉄道の実環境に近い複雑な複合磁界の生体作用評価を行い、電気鉄道における磁界の安全性評価を進める予定である。

なお、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。また、(独)物質・材料研究機構との共同研究で実施した。

#### 参考文献

- 1) 水間毅, EMC, No. 218, p.13-23, 2006
- 2) 国際非電離防護委員会, Health Physics, 96, 504-514, 2009
- 3) 国際非電離防護委員会, Health Physics, 74, 494-522, 1998
- 4) 高島良生他, マグネティックス研究会, MAG-00-85, 2000
- 5) 池畑政輝他, マグネティックス研究会, MAG-09-160, 2009
- 6) 吉江幸子他, マグネティックス研究会, MAG-07-77, 2007