

## 静磁界と健康

池畑政輝

財団法人 鉄道総合技術研究所  
環境工学研究部 生物工学研究室

## Static Magnetic Fields and Health

Masateru IKEHATA

Biotechnology Laboratory, Environmental Engineering Division, Railway Technical Research Institute

## 抄録

静磁界は我々の生活環境の様々な箇所で見られる。便利な反面、社会の必需品となった磁気カード、またペースメーカーなどは静磁界によってある条件下では影響を受ける場合があることも事実である。一方では、医療用のMRIの普及が進み、数T（テスラ、1T=10,000Gauss）の強静磁界に曝露する機会も増えている。このような技術の進捗に合わせ、その生体作用、健康影響を評価する研究が行われている。国際保健機関（WHO）はこれらの科学的知見をもとに、2006年に静磁界（および静電界）についての環境保健クライテリアを発刊した。本稿では、この内容や我々の研究で得られた知見を通して、静磁界の健康影響を考える。静磁界の発生源としては、地球自身の地磁気から始まり、身の回りにある磁石を利用した製品、電気機器・装置、医療用MRIなどが日常の環境中にある。また、これまでに明らかな生体作用としては、短期・急性の影響として強静磁界中での移動時に発生する誘導電界による神経刺激作用が、試験管レベルでは磁界による生体高分子の配向等が挙げられるが、これらの作用がどの程度人の健康に対するリスクとなり得るのかについては、議論が続いている。また発がんなどの長期影響については、研究が不足していることは否めないが、変異原性に関しての我々の研究結果からは、影響があるとしても、健康リスクとしては極めて小さいと解釈できる結果を得ている。しかしながら、全体として健康リスクを評価するための知見が非常に少ないため、そのリスクを最終的に結論づけることは現状では難しく、国際がん機関（IARC）の発がん分類では『Group3（発がん性を分類できない）』、WHOの環境保健クライテリアでは『リスクを適切に特徴付けることはできない』と記述され、必要な知見を得るための研究勧告がなされている。一方で、静磁界の持つエネルギーやこれまでの知見を踏まえて考えるならば、医療用MRIでしか曝露することの無い数Tレベルの静磁界であっても、今後の研究によって顕著な生物影響はおそらく認められないと予測して良いであろう。しかしながら、今後の研究により、そのことを予測の範疇でなく科学的に明らかにしていくことが、すなわち電磁界と健康を正しく理解するために、科学の果たすべき責任であるといえよう。

キーワード： 静磁界、健康リスク、生物影響

## Abstract

The static magnetic fields are found in various parts of our environment. Low density static magnetic fields are generated by magnets used for the clip, button, etc. and also are generated in public transportation systems such as train, tram, etc. Moreover, in the medical field, Magnetic Resonance Imaging (MRI) system uses high density static magnetic field up to 3T in the commercial. Thus, the chance to expose to strong static magnetic fields has been increasing and it is necessary to evaluate health risk by exposure to static magnetic fields. To response this requirement, the World Health Organization (WHO) is conducting the International EMF project since 1996. Recently, they published the environmental health criteria No. 232 of the static magnetic field (and, static electric field) based on scientific findings to date.

In this paper, it describes that sources, interaction mechanism and biological effects of static magnetic fields to date.

〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38

2-8-38 Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo 185-8540, Japan.

However, as for the conclusion, it is difficult to make a firm conclusion of the health risk under the present situation, because the scientific evidences to evaluate health risk are not sufficient. Thus, the International Association of Research on Cancer (IARC) classified the static magnetic field as “Group3 (not classifiable as to its carcinogenicity to humans)” in their monograph, and also WHO stated that “the available evidence from epidemiological and laboratory studies is not sufficient to draw any conclusions about chronic and delayed effects.” in the environmental health criteria No. 232.

Since static magnetic field has extremely low coupling energy to biological organisms, even several tens T of static magnetic field may not have strong biological effects. However, it is stressed that science has a responsibility to clarify the biological effects of static magnetic field with actual scientific data, not prediction. It will help public to know the fact of static magnetic field and health and also to make correct perception of health risk of static magnetic field.

**Keywords:** static magnetic field, health risk, biological effects

## 1. はじめに

我々の住む地球は、それ自身が大きな磁石を形成しており、我々は常に地磁気の下で生活している。この地磁気は、地球形成の頃より非常にゆっくりとした回転を伴いながらも常に存在していることが知られている。これは、生物がその誕生から現在に至るまで、常に地磁気という磁界の中において生存・進化してきていることを示しており、従って、磁界は水や空気、重力、熱といった物理因子と同様に、今日の生態系を形成する一因となった可能性が考えられる。実際に、磁界が生態系に作用している例としては、体内に磁性微粒子（マグネタイト）を生成する磁性細菌の走磁性が良く知られているが、他にもある種の鳥類（ハト、渡り鳥）、魚類（ニジマス、マグロ、サケ）あるいは昆虫（蜜蜂）について、磁界の有無による行動の観察や、超電導量子干渉計（SQUID）等を用いた計測や磁性物質の分離実験等により体内にマグネタイトを保持し、行動に磁界が影響することが報告されている<sup>1)</sup>、また、近年、ニジマスの鼻部に磁性微粒子と共に感覚器と思われる組織も確認されたとの報告もある<sup>2)</sup>。このように、地磁気程度の微弱な磁界を磁性粒子（マグネタイト）にかかる力として利用している生物がある一方で、科学技術の発展により人間はこれまで経験したことのないような強磁界（数十T）を作り出し、利用するようになった。最近では10Tを超えるような強磁界を医療診断のために利用する開発が進んでおり、人間が強磁界に曝露する機会は確実に増えている。しかし、このような強磁界の生物作用、また健康への影響については、未だ十分な検討がなされたとはいえない状況にある。また、「磁界」というキーワードで考えるならば、電力で用いられる極低周波、通信で用いられる高周波についても、社会の発展とともに需要が増し、その結果これらの磁界、電磁波に曝露される機会が増加しており、その健康影響の有無に社会の関心が高まっている。これらの健康リスクについては、本特集号の他の論文に譲るが、この社会の要請を背景に、世界保健機関（WHO）が1996年から「国際電磁界プロジェクト」を実施しており、静磁界（および電場）に関しては、環境保健クライテリアを

2006年に刊行した<sup>3)</sup>。この環境保健クライテリアは、WHOの健康リスク評価そのものであるため、本稿では、この環境保健クライテリアの内容を概観するとともに、我々のこれまでの研究結果も合わせて、静磁界と健康について考えたい。

## 2. 磁界発生源と曝露機会

静磁界の発生源は、最初に書いたように地球自体（地磁気として35～70 $\mu$ T）がまず上げられるが、身の周りである、いわゆる「磁石」の類は全て静磁界の発生源といつてよい。そう考えると、身の回りの発生源は意外と多いことに気がつく。マグネットクリップ、磁石を使っている鞆などの留め具、磁気ネックレス等々、これらの表面では、数十mT～百mT程度の磁界が測定される場合があるが、磁界強度は距離の2乗に比例して減衰するため、実際に人体に曝露する量はわずかであり、特に体内深部は強磁界には曝露されない。また、電気を使った交通機関（鉄道、新交通システム等々）においては、機器や電力の供給部から静磁界が発生する場合があるが、多くの場合1mT以下である。現在日本において開発されている超電導浮上式鉄道は、車両に超伝導磁石を搭載しTレベルの強磁界を利用して推進・浮上・案内を行うが、車体は磁気シールドされており、試験車両の車内で測定される静磁界は、最大1.3mT程度であると報告されている<sup>4)</sup>。一方、強磁界に曝露する機会としては、核磁気共鳴画像診断装置（MRI）が挙げられる。MRIは水素原子<sup>1</sup>Hの核磁気共鳴を検出して画像化する方法であり、体内を非侵襲的に画像化するために優れた方法である。この装置は、画像化するための信号を得るために、静磁界、勾配磁界、中間周波磁界を用いるが、現在臨床で利用されている装置では数百mT～3T程度の静磁界を用いている。研究開発としては、最大9.4T程度の静磁界を用いる装置が既に稼動しており、将来的には11T級の装置が開発される見込みである。MRIによる検査を受ける場合、最大1～2時間程度この強磁界に曝露すると考えられる。以上をまとめると、一般公衆が曝露する静磁界は医療用MRIが最大であり、現時点では最高3T、また通常的生活環境中では局所的な曝露（マグネッ

トクリップ、磁気ネックレス等)を除き、1 mT 以下であると考えられる。

表 1 に、一般公衆が日常環境で曝露すると考えられる静磁界発生源とその強度、ならびに産業現場や MRI 装置で測定される静磁界強度の例を示す。

### 3. 静磁界の作用

磁石は古代ギリシャ、古代中国の頃にそれぞれ発見されたとの記述があり、医療に用いられていたとの記述もあ

る。しかし、生物への影響を科学的手法で評価したものは、1937年に Jennison によって報告された、300mT の静磁界への48時間曝露が、バクテリアの生存に影響を与えなかったという研究結果であろう<sup>5)</sup>。それ以来、生物への静磁界の影響は、静磁界発生技術の進展とともに、より強い磁界をより人間に近い材料で評価するという取り組みが続いている。現在では、静磁界の発生技術は45T を超え、国内でも37.86T という静磁界が(独)物質・材料研究機構によって樹立されている。ただし、生体影響を評価する

表 1 静磁界の発生源と強度

発生源	強度 (μT)	測定条件等
磁気クリップ	40,000-100,000 <500	表面 離隔 5 cm
交通機関 <sup>a</sup>		
フェリー	47.6-67.9	高さ0.9m
エスカレーター	30.9-84.9	高さ0.9m
動く歩道	23.6-121.8	高さ0.9m
ガソリン自動車	2.7-87.5	
電気自動車	10.6-104.4	
トラム	24.3-73.4	高さ0.9m
通勤電車	19.4-196.9	
英国鉄道システム		
ロンドン市地下鉄		
運転席	200	
客室床面	100-2,000	
近郊路線		
客室	25	
電気機関車	2,000	
伊国鉄道システム		
高速鉄道システム	1,000	最大
独国浮上式鉄道システム (Transrapid)		
TR07	111	
TR08		
客室	108.4	
プラットフォーム	71.8	
日本国浮上式鉄道システム (MAGLEV)		
ガイドウェイから 4 m	190	
橋脚下 8 m	20	
客室	80-1,060	
客室間 (貫通路)	60-1,330	
産業 <sup>b</sup>		
アルミ精錬工場	100,000 <20,000	最大 通常
電解工程	50,000 10,000	最大 平均
医療 <sup>b</sup>		
MRI		
被験者	600,000-3,000,000	測定部位
作業者	850,000 <30,000	1.9T 磁石の横 離隔 2 m
	500-5,000	制御室
	<1,000,000	4 T 磁石の横

a:WHO, EHC232<sup>6)</sup> Table 5 から抜粋

b:WHO, EHC232<sup>6)</sup> Table 6 から抜粋

ためには曝露空間の雰囲気制御を厳密に行う必要があるが、そのような強磁界発生装置が作る強磁界空間は非常に狭く生物実験には適さない場合が多い。したがって、これまでに報告された生物影響に関する実験の最大強度は25T程度である<sup>6)</sup>。

これまでに、生物に影響を及ぼし得る物理化学的作用また生物への影響が様々な形で報告されているが、その中から幾つかを取り上げ、以下に順を追って見ていきたい。

### 3. 1 物理化学的な作用

これまでに3つの作用が明らかにされている

#### 3. 1. 1 イオン伝導電流との電気力学的相互作用

電気伝導性のある流体が磁力線に対して垂直に流れる時、双方に垂直の方向に電圧(力)を生じる現象である。この効果は外部磁界下での電気化学反応として発見された<sup>7,8)</sup>が、生体においても血液や体液は様々なイオンを含むことから導電性であり、磁界曝露によって力を受けると考えられる。実際、志賀らは、この血液中の赤血球に着目し、単体では反磁性体であるヘモグロビンが酸素と結合すると常磁性として振る舞うことを利用して、磁界勾配による血流の変化を検討している。この研究では、実際に緩衝液中に細い血液の流れを形成させ、流れと垂直な勾配磁界曝露(29T<sup>2</sup>/m)を行った。その結果、血流が磁界の強い方へ引き寄せられることが観察されている<sup>9)</sup>。脱酸素化ヘモグロビン、酸化ヘモグロビンへの作用は、例えばMRI検査時の患者に対する影響や、functional-MRIでの解析画像の正確性に影響を与えたと考えられるため、今後も詳細な検討が必要であると考えられる。

#### 3. 1. 2 磁気機械的相互作用

分子の磁気異方性により、分子が磁氣的に安定する方向へと配向する現象である。この現象を利用して、磁界下でのコラーゲン<sup>10)</sup>、フィブリン<sup>11)</sup>、DNA<sup>12)</sup>等の配向が報告されている。さらに、生体物質の磁界配向を積極的に医療分野に応用する試みとして、人工臓器の形態形成のための基礎的検討が骨芽細胞等を用いて行われており、コラーゲンやフィブリンをマトリックスとした細胞配向や、細胞そのものの磁界配向が検討されている<sup>13)</sup>。これらの研究は、現在重点的に研究が進められている再生医学の分野において、ブレイクスルーの鍵となる重要な技術の一つとして期待されている。また、10T級の静磁界の中では、生体物質のような反磁性体に対してもはっきりとした影響が確認できるようになった。例えば、水の場合、その反磁性により磁束密度の弱い方へと磁気力がかかることは理論上知られていたが、10T程度の磁石を用いると、水平方向の磁力線であれば、磁石の中心部で水面が数cm窪む現象が観測される。これは、磁気力により水分子が水平方向の力を受けたためであり、モーセ効果と呼ばれている。最近では、常磁性である硫酸銅水溶液を用いることで磁石中心に引き寄せられ水面が盛り上がる逆モーセ効果、2液系での界面

の比重差を少なくすることにより、より弱い磁界でも観察される増強モーセ効果等が報告されている。また、より強い磁石を用いた1,400 T<sup>2</sup>/m程度の勾配磁界中では、水の反磁性にかかる磁気力がもはや重力と同程度になることから、垂直磁界中に物体を安定浮上させることが可能であり、水を初めとして、マウス等生物を含む反磁性の様々な物質・物体の浮上が可能となっている<sup>14)</sup>。今後、宇宙開発のための微小重力環境の模擬といった点からも、このような場を利用した研究が盛んになっていくであろう。

#### 3. 1. 3 化学反応(ラジカル反応)への影響

もともと有機化学分野における光化学反応系への影響として発見された<sup>15)</sup>。例えば光化学反応の中間体として生成するラジカルの項間交差への影響として説明され、実際に磁界を曝露することによって化学物質の収量を変化させることが可能である<sup>16)</sup>。一般に、酸素呼吸を行う生体はその体内にフリーラジカルを生成していることは良く知られている。このフリーラジカルは、非常に反応性に富み、突然変異生成の原因となることや、脂質過酸化の原因となることが知られている<sup>17)</sup>。このような生体内に発生するラジカルに対し、磁界が影響を与える可能性については、これまでに、生体物質を用いた *in vitro* の系として、Vitamin B12補酵素を対象とした報告<sup>18)</sup>がなされている。我々は、後述するように生物を使った実験系でこの影響を唆するような結果を得ているが、残念ながらラジカルそのものの影響評価ではないため、メカニズムの証明には至っていない。今後の研究による生体システムにおけるラジカルへの磁場影響の有無の解明に期待したい。

### 3. 2 生物への影響

上記の物性への影響から予想される、もしくは説明し得る生物影響以外に、生物学あるいは医学の見地から様々な研究がなされている。

#### 3. 2. 1 インビトロ研究

静磁界の生物影響の本質を知るためには、出来る限り強い磁界を用いて研究を行うことが望ましいと考えられるが、一方で、強磁界は非常に狭い空間にしか発生できないという技術的な制約がある。これに関して、インビトロ研究では、通常生体膜や酵素などを対象とした無細胞系や細菌や細胞といった通常100 $\mu$ m以下の極微小な細胞モデルを使用するため、狭い空間であっても大量に曝露することが可能であり、精度・信頼度の高い生物実験データを得ることが可能である。このような特長があり、相互作用メカニズムや影響の機構解明の上で有用であるが、一方でこの研究のみでは健康リスクを評価するには不十分である。

これまでに、細胞膜の生理学的性質、細胞増殖、代謝活性、遺伝毒性、遺伝子発現などについての多数の報告があるが、静磁界の影響を有りとする報告、無しとする報告の双方がある。これは、曝露強度、条件、生物材料が様々なことに起因して生じることであり、明らかな生物影響

(例えば、致死などの影響)は見られないことを示す一つの根拠とも考えられる。具体的な報告例として、3 T迄の静磁界および高周波掃引を行うMRI測定の曝露条件で遺伝子修復に欠損を持つ大腸菌への細胞毒性が見出されなかったとする報告<sup>19)</sup>がある一方、7 Tの強磁界中で大腸菌の定常期以降の死滅が抑制されることを報告し、さらに定常期に発現誘導される *rpoS* の発現量の変化等を検討した結果、定常期でわずかに発現が抑制される<sup>20)</sup>などの報告がある。また、酵素や膜など、生体物質の反応を無細胞系で検討した結果としては、酵素反応に関して、リボヌクレアーゼ、ポリフェノール酸化酵素、ペルオキシダーゼ等の反応速度が最大17Tの静磁界においても変化しないとする報告<sup>21,22)</sup>等がある。

一方、磁界の健康影響の中でも、とりわけ関心が高いものの一つには、遺伝毒性がある。これは、遺伝子への作用が発がんに明確に関与する影響であるためである。従って、現状の安全性試験の中でも、急性毒性とともに最重要視される要素である。

我々の研究室では、現在開発が進んでいる超電導浮上式鉄道の研究開始に伴い、静磁界の生体影響を30年前から研究しているが、近年は遺伝毒性、特に変異原性(遺伝子に突然変異を起こす能力)に焦点を合わせた研究が続いている。これまでに、細菌からマウスまで幅広い生物材料を用いて、最大で10Tを超える強磁界を評価対象とした研究を進めている。このような強磁界を研究する理由は、一般の安全性試験の応用、すなわち、明らかな生物影響を示す用量まで曝露し、そこから閾値等を見出して、安全性の根拠とする手法に則るためであると共に、磁界の生物影響の本質を明らかにしたいためである。

例えば、我々の研究の一部では、細菌を用いた変異原性試験(エイムステスト)を用いている。この試験は、遺伝毒性評価のための一般的試験であり、化学物質の評価試験バッテリーの一つとして有用なものである。

この試験を用いた研究では、5種類程度の細菌株を用い、静磁界5 Tまでの変異原性を検討したが、変異原性は認められなかった。ただし、2 T以上の強度において様々な化学発がん物質と同時曝露したところ、一部で変異原性の増強効果が認められた。影響を受けた化学発がん物質はエチルニトロソグアニジン(ENNG)など、DNA反応性の物質であり、一方で、DNAの類似体で誤ってDNA鎖中に取り込まれ、突然変異を起こす物質ではまったく影響は見られなかった。これらのことから、2 T以上の静磁界に曝露することにより、DNAと発がん物質の化学反応が影響を受けることが示唆された<sup>23)</sup>。図1に大腸菌試験株における化学変異原物質の変異原性に与える静磁界の影響を示す<sup>24)</sup>。我々は、この他にも、酵母、ショウジョウバエを用いた実験で、強磁界のわずかな変異原性を見出した。ただし、後述するように、その変異原性は極めて弱く、環境中のリスクとしてはほぼ考慮する必要がない程度であると推測される<sup>24)</sup>。

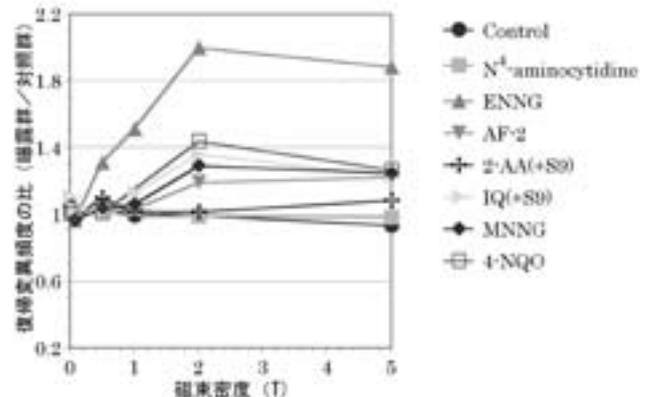


図1 大腸菌変異株 (*E. coli* Wp2 *uvrA*) における化学変異原物質の変異誘発に与える静磁界曝露の影響  
Control; 非曝露群, N<sup>4</sup>-aminocytidine; DNA類似体, ENNG (N-ethyl-N'-nitro-N-nitrosoguanidine), AF-2(2-(2-furyl)-3-(5-nitro-2-furyl) acrylamide), 2-AA (2-Aminoanthracene), IQ(2-amino-3-methyl-3H-imidazo[4,5-f]quinoline), MNNG(N-methyl-N'-nitro-N-nitrosoguanidine), 4NQO(4-nitroquinoline-N-oxide); DNA反応性変異原(電磁場生命科学; 2005<sup>24)</sup>)

このような遺伝毒性に関する研究の他に、比較的低い静磁界(120mT)において血管新生への影響が見られるとの報告があり、腫瘍治療や発生への影響が考えられる。しかしながら、具体的な応用のためには、今後も種々の基礎的知見の積み重ねが必要であると思われる<sup>25)</sup>。

### 3. 2. 2 動物実験

動物実験では、行動、生理などの研究が多数行われているが、強磁界での研究については、曝露装置の制約(強度、曝露空間)から大変限られた報告しかない。また、発がんなどの慢性影響については未だにほとんどないといってよい。したがって、動物で研究されているのは、主に急性影響、特に生理学的反応や移動により中枢神経系に生じる誘導電位による不快感に伴った行動学的研究が主である<sup>26)</sup>。また、一方で局所曝露による微小循環への2相性の影響なども報告されている<sup>27)</sup>。これらの研究からはホルモン調節系を介した早期の血圧上昇を抑制する可能性を示すが、健康影響としてどの程度寄与するかは不明である。

動物を用いた遺伝毒性研究はほとんど報告されていないが、我々は動物を曝露可能な静磁界発生装置を用いて研究を行ってきた。その結果、インビトロ試験と同様、3 Tを超える静磁界に24時間以上曝露すると、マウス大腿骨の赤芽球での小核(染色体異常の一種)が増加する影響が観察された<sup>28)</sup>。我々のインビトロでの実験結果と合わせ、磁界曝露による酸化ストレスの付与もしくはラジカル種への影響ではないかと推測しているが、現在は細胞を指標とした変異原性の検出であり、ラジカルそのものを評価していないため、完全に明らかにするには至っていない。ただし、前述するように、磁界曝露の影響は極めて弱いため、影響の程度を明らかにするには、更なるデータの蓄積が必要であるとともに、ごく大まかにリスクということについて

て考えるとすれば、環境中で曝露する強度・時間との比較において考えた場合に、リスクとしては極めて小さいと考えられるレベルであった。

### 3. 2. 3 人における研究

人で行われる研究は、大きく分けて積極的に磁界に曝露してその際の種々の反応を調べる実験的研究と、ある磁界曝露量の人口における何らかの疾病率の差異を調べる疫学研究に分けられる。実験的研究の場合は、曝露装置の制限、被験者数の制限などによるが、最大8T程度までは研究が行われた例がある。しかし、ほとんどの研究ではその曝露時間は1時間未満であり、急性の影響のみが研究されているといえる。この急性影響の研究として、脳活動、認知機能、血圧、知覚、その他生化学的な指標などが検討されている。ほとんどの指標では、研究報告が充分とはいえないため、確定的な結論を述べることは難しい。ただし、MRIに関しては、通常1.5Tまたは3Tのシステムが臨床検査で使用されているため、1時間程度の曝露は日常的である事、検査の被験者が直接磁界に全身を曝露される場合が多いこと、更には磁界強度を上げることにより共鳴信号が増幅され、画像の解像度が向上するため、磁界強度3T～7T程度の装置の開発も進んでいることなど特殊な状況が生じているため、健康リスク評価は喫緊の課題であるといえる。実際にボランティアに4.0Tの磁界曝露を行なった研究では、その多くが頭痛や嘔吐感等を感じたという報告<sup>31)</sup>もある。この作用は、実際には勾配磁界内の物理的移動に起因する誘導電位による神経への刺激作用だと考えられるが、その他の指標についての研究は、未だ充分とはいえない。また、検査技師・看護師等の作業者が患者の補助をしながら検査する際には、場合によってTレベルの強磁界曝露となることも労働者の作業環境として留意する必要があると思われる。

一方、疫学については、職業的に曝露する環境がかなり限られること、日常的に曝露するレベルは変動が大きいことから、例えば発がんなどの研究に関しては、対象に出来る集団は溶接工やアルミ精錬工場、塩素アルカリ工場などかなり限られたフィールドに限られる。これらの工場では、作業者は最大で数十mTという中程度の強度の静磁界に曝露しながら作業を行っているため、静磁界の健康リスクを調査するための集団として適切な面もあるが、他方留意すべき点は、工場はあくまで化学的な反応を行うという点で、様々な化学物質を含んだ空気環境中でもあり、化学物質による健康リスクが重畳されているフィールドであるということである。したがって、フィールドによって異なる多種多様の交絡因子が存在することとなり、何らかの疾病と単一の要因を相関づけることは容易ではない。WHOのEHC232<sup>6)</sup>の中では、がんに関して9件の疫学が取り上げられているが、母集団が少ないこと、また曝露評価が適切に行われていないことなどから、確定的な結果は得られていないと評価されている。また、その他の疫学では、上

記産業現場やMRI検査従事者を対象にした生殖や染色体異常を指標とした研究が行われているが、いずれも明確なリスクを示す研究結果は得られていない。我々も過去に鉄道分野における疫学研究を試みたが、その際は、Healthy worker effect (任職時の選別などにより、全体的に国民一般よりも疾病罹患・死亡率が低いこと)のため、研究を適切に遂行することが不可能であった。

## 4. 埋め込み形医療機器への影響

ペースメーカーなど、埋め込み形の医療機器への静磁界の影響は、正確には生体影響ではなく、電磁両立性(Electromagnetic Compatibility)の範疇であるが、機器への影響が健康に関わるため、簡単に記すこととする。静磁界の人体防護のための曝露制限に関するガイドラインは、国際非電離防護委員会(ICNIRP)が審議しているが、1994年の静磁界に関するガイドライン<sup>29)</sup>では、ペースメーカーの装着者は0.5mT以上の空間に入らないように勧告されている。これは、Irnich and Batsによる大規模な調査で、2mTの曝露で87%のペースメーカーが影響を受け、1mTで19.6%、0.5mTで1.7%のペースメーカーが影響を受けたという報告<sup>30)</sup>に基づいている。現在ではペースメーカー自体の改良も進んでいるようであるが、医療用MRIその他でも、0.5mTという自主基準が設けられているのが現状である。

## 5. 静磁界の健康リスク

ここまでに取り上げた研究以外にも様々な研究が行われてきた(EHC 232参照)が、結論として、静磁界勾配内での物理的移動による誘導電界による中枢神経への刺激が原因である吐き気やめまいなどの影響以外には明確な影響は報告されておらず、磁界の慢性曝露によるがんその他の疾病リスクを評価するには十分な知見が与えられていない。

そのため、国際がん機関(IARC)の発がん分類では『Group3(発がん性を分類できない)』、WHOのEHC 232では『リスクを適切に特徴付けることはできない』と記述され、必要な知見を得るための研究勧告がなされている。

一方、MRIのような強磁界が一般的に使われるようになったのは近年のことであり、現在では高温超伝導体を使った磁石の開発が進むにつれ、10Tを超える強静磁界を発生する磁石も研究目的として普及しつつある。高価な宇宙実験、落下実験に比肩する擬似微小重力状態を低コストで創出できることから、微小重力環境の研究としても強静磁界の利用機会が更に増大していくことも考えられる。また、2025年を目標に、東京一名古屋をリニアモーターカーで結ぶ計画も進みつつある。このように磁界の発生・利用技術の発展は著しいが、新しい技術に対しては、社会の不安が先行する状況も考えられる。

我々は、これまでに特に変異原性という、発がんに深く関わると考えられる遺伝子への作用を中心に静磁界の生物

影響評価を行ってきたが、我々の結果から示唆されることは、非常に鋭敏な検出系を用いた場合、強磁界の「曝露環境」の変異原性は検出できるという可能性である。ここで「曝露環境」と改めて断っているのは、およそ現在生物が曝露可能な磁界強度（～21T）では、磁界にDNAのリン酸エステル結合を切断するエネルギーはないため、われわれは静磁界への曝露による2次的な作用によって突然変異が上昇すると考えているからである。一方で、細菌、ショウジョウバエなどの研究結果を人の健康リスク評価に直接外挿することが出来ないことは事実であり、今後も総合的なリスク評価を行うための基礎データの蓄積が必要である。

いずれにしても、我々の研究からは、強い静磁界に「曝露」することによって、わずかな突然変異の増加がみられる試験系があるが、これらの試験系で試験時に用いる陽性対照（突然変異を確実に起こす物質や物理作用）との比較を行うことで、ごく大まかではあるが、静磁界の変異原性の強さを推測することが出来る。例えば、我々の出芽酵母の試験系では、5 Tの磁界に48時間以上曝露すると、わずかに染色体組み換え型の突然変異の増加が観察された<sup>31)</sup>。一方で、陽性対照としてUVCランプを用いて紫外線を照射した場合、18J/m<sup>2</sup>すなわち日本における昼間の日光の1/10程度の照射により、非照射群の10倍以上の突然変異が誘導される。これは、一つの可能性として、日中の紫外線の1/10を浴びただけで、5 Tの静磁界を48時間曝露する効果の10倍以上の効果があるということを示唆する。言い換えれば、強磁界の変異原性は、検出できるものの、極めて小さいレベルにあることが示唆される。実際に、静磁界の生体物質との結合エネルギーは極めて低く、10 Tといえどもただか1.3×10<sup>-2</sup> kcal/mol程度であり、生体内の結合では最も弱いと考えられるファンデルワールス結合（約1 kcal/mol程度）や外部からの熱的擾乱に遠く及ばない。したがって、これまでに報告された「静磁界の生体作用」はあくまで磁界が発生している空間に置くことにより得られるものであり、その意味で2次的な効果である場合が多いことは強調しておきたい。今後、生体作用の研究が進展することで、健康リスクの評価とともに、医療分野での積極的な応用の可能性が明らかになることを期待したい。

## 6. おわりに

静磁界に関しては、その健康リスクを評価するための知見が非常に少ないため、現状では最終的にどのようなリスクがあるのか結論づけることは難しい。一方で、静磁界の持つエネルギーやこれまでの知見を踏まえて考えるならば、医療用MRIでしか曝露することの無い数Tレベルの静磁界であっても、今後の研究によって顕著な生物影響はおそらく認められないと予測して良いであろう。しかしながら、今後の研究により、そのことを予測の範疇でなく科学的に明らかにしていくことが、すなわち電磁界と健康を

正しく理解するために、科学の果たすべき責任であるといえよう。

本特集号のタイトルである電磁界と健康を考えることは、いわゆる『電磁界』として世の中で関心の高い、静磁界（0 Hz）から携帯電話の周波数（～3,000,000,000 Hz（3 GHz：30億 Hz））までの幅広い帯域の影響を考えることであり、発生源も様々、そして何よりも電磁界自身が目に見えないため、専門家でない限りは、考える対象が漠然として、正しく情報を取り扱うことは困難であろう。しかし、誤った理解は時として事実と全く異なる誤解を招き、社会に不必要な不安を引き起こすことにもなりかねない。我々が認めるべきことは、科学的知見から静磁界の健康リスクを結論付ける事は未だに難しいこと、一方で、環境中には健康に対する種々のリスクが存在していること、そして、我々は好むと好まざるとに関わらず、このリスクを取捨選択しながら生活しているということではないだろうか。

本稿では、特に『静磁界』と健康について現状で知り得る知見を概観したが、この内容が読者自身の『静磁界』に対しての正しい理解を深めるきっかけとなり、引いては『電磁界』全般の健康リスクを自ら考え判断していく上で、少しでも助けとなれば幸いである。

## 参考文献

- 1) 志賀健, 宮本博司, 上野照剛編著. 磁場の生体への影響. 東京; たらべいあ; 1991.
- 2) Diebel CE, Proksch R, Green CR, Neilson P, Walker MM. Magnetite defines a vertebrate magnetoreceptor. *Nature* 2000 406;6793:299-302.
- 3) World Health Organization. Environmental Health Criteria 232 Static Field. Geneva: WHO Press; 2006.
- 4) (社)電気学会 電磁界生体影響問題調査特別委員会. 電磁界の生体影響に関する現状評価と今後の課題. 東京: 電気学会; 1998.
- 5) Jennison MW. *J. Bact.* 1937 33:15.
- 6) Paul AL, Ferl RJ, Meisel MW. High magnetic field induced changes of gene expression in arabisopsis. *Biomagn Res Technol.* 2006 22;4:7.
- 7) Aogaki R, Fueki K, Mukaibo T. *DENKI KAGAKU* 1975 43:504.
- 8) Aogaki R, Fueki K, Mukaibo T. *DENKI KAGAKU* 1975 43:509.
- 9) Okazaki M, Maeda N, Shiga T. Effects of an inhomogeneous magnetic field on flowing erythrocytes. *Eur Biophys J* 1987 14;3:139-45.
- 10) Torbet J, Ronziere MC. Magnetic alignment of collagen during self-assembly. *Biochem J.* 1984 219:1057-9.
- 11) Torbet J, Freyssinet JM, Hudry-Clergeon G. Oriented fibrin gels formed by polymerization in strong

- magnetic fields. *Nature* 1981 289;5793:91-3.
- 12) Torbet J. Solution behavior of DNA studied with magnetically induced birefringence. *Methods Enzymol.* 1992 211;518-32.
  - 13) Kotani H, Iwasaka M, Ueno S, Curtis A. *Journal of Applied Physics* 2000 87;6191-6193.
  - 14) Berry MV, Geim AK. Of flying frogs and levitrons, *Eur. J. Phys.* 1997 18;307-313.
  - 15) Tanimoto Y, Hayashi H, Nagakura S, Sakuragi H, Tokumaru K. *Chem. Phys. Lett.* 1976 41;267.
  - 16) Tanimoto Y, Jinda C, Fujiwara Y, Itoh M, Hirai K, Tomioka HY, Nakagaki R, Nagakura S. Laser flash photolysis studies of the magnetic field effects on the hydrogen abstraction reaction of 2-naphthylphenylcarbene in micellar solution. *J. Photochem. Photobiol.* 1989 A 47;269-276.
  - 17) 中野稔, 浅田浩二, 大柳善彦 編. 活性酸素. 東京: 共立出版; 1990.
  - 18) Grissom TB, Harkins TT. Magnetic field effects on B12 Ethanolamine ammonia lyase: Evidence for a effect of radical mechanism. *Science* 1994 263;958-960.
  - 19) Mahdi A, Gowland PA, Mansfield P, Coupland RE, Lloyd RG. The effects of static 3.0T and 0.5 T magnetic fields and the echo-planar imaging experiment at 0.5 T on *E. coli*. *Br. J. Radiol.* 1994 67;983-987.
  - 20) Tsuchiya K, Okuno K, Ano T, Tanaka K, Takahashi H, Shoda M. High magnetic field enhances stationary phase-specific transcription activity of *Escherichia coli*. *Bioelectrochem. Bioenerg.* 1999 48;383-387.
  - 21) Rabinovitch B, Maling JE, Weissbuth M. Enzyme-substrate reactions in very high magnetic fields I. *Biophys. J.* 1967 7;187-204.
  - 22) Rabinovitch B, Maling JE, Weissbuth M. Enzyme-substrate reactions in very high magnetic fields II. *Biophys. J.* 1967 7;319-327.
  - 23) M. Ikehata, T. Koana, Y. Suzuki, H. Shimizu and M. Nakagawa. Mutagenicity and co-mutagenicity of static magnetic fields detected by bacterial mutation assay. *Mutation Research* 1999 427;147-156.
  - 24) 宮越順二編著, 電磁場生命科学. 京都: 京都大学学術出版会; 2005.
  - 25) Okano H, Onmori R, Tomita N, Ikada Y. Effects of a moderate-intensity static magnetic field on VEGF-A stimulated endothelial capillary tubule formation in vitro. *Bioelectromagnetics* 2006 27;628-40.
  - 26) Schenck JF, Dumoulin CL, Redington RW, Kressel HY, Elliott RT, McDougall IL. Human exposure to 4.0-Tesla magnetic fields in a whole-body scanner. *Med. Phys.* 1992 19;1089-1098.
  - 27) Okano H, Gmitrov J, Ohkubo C. Biphasic effects of static magnetic fields on cutaneous microcirculation in rabbits. *Bioelectromagnetics* 1999 20;161-71.
  - 28) Suzuki Y, Ikehata M, Nakamura K, Nishioka M, Asanuma K, Koana T, Shimizu H. Induction of micronuclei in mice exposed to static magnetic fields. *Mutagenesis* 2001 16;499-501.
  - 29) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Physics.* 1994 66:1;100-106.
  - 30) Irnich W and Batz L. Assessment of threshold levels for static magnetic fields affecting implanted pacemakers. Berlin, Germany: Federal Office of Health; Report Fo 1-1040-523 E15; 1989 (in German) .
  - 31) Ikehata M, Takashima Y, Miyakoshi J, Koana T. Estimation of biological effects of extremely low frequency magnetic fields, Proceedings of the International Union of Radio Science General Assembly 2005, Oct, 21-29; New Delih, India, 2005.