

磁界の生体に及ぼす影響

中村孝夫 , 小野寿樹* , 野村保友 , 馮 忠剛**

山形大学大学院医学系研究科生命環境医科学専攻生体情報工学講座

*山形大学大学院理工研究科システム情報工学専攻

**山形大学工学部応用生命システム工学科

(平成17年9月27日受理)

要 旨

科学技術の進歩に伴い、自然環境下には存在し得ない磁界環境が我々の身の回りに形成されつつある。そのような状況下、1979年には米国で高圧送電線近辺の居住民に白血病が多発することが報告され、それ以降磁界の生体影響についての研究が精力的に進められるようになった。近年の磁界研究では、発がん性に着目した研究のみならず、磁界(変動磁界と静磁界)の生体影響のメカニズム解明を目的として、個体ならびに細胞レベルで多くの研究が行われている。例えば個体レベルの研究では乳腺腫瘍の促進などが、細胞レベルでは細胞膜を通したイオンの流入出などが報告されている。しかし一方ではこれらを否定する報告も見られ、統一の見解はまだ得られていない。その理由として、磁界に高い感受性を示す生物学的指標が知られていない上に、生体特有の機能である情動などが磁界影響の検出を困難にしていると考えられている。また変動磁界を用いた実験では、磁界自体による効果と興奮性組織への刺激や熱の効果を分離することが難しいため、実験上の問題点も指摘されている。本稿では、これらの磁界研究の現状と主な問題点について整理、解説するとともに、それらの改善のために静磁界を用いた細胞レベルの研究が重要であることを指摘する。またその研究成果は環境問題の理解と改善に役に立つばかりでなく、磁界の積極的な医療応用への展開も考えられるので、例えばコラーゲン配向効果等、その目的のためにこれまでに得られている主な知見についても概観する。

キーワード：低周波磁界、高周波磁界、静磁界、非熱効果、細胞レベル

はじめに

地球上に存在する生物は、古代から地球および太陽などから発生する磁界に曝露されてい

る。特に地球は巨大な磁石で、発生する磁界(地磁気)の強さは両極地で約60 μ T、赤道で約30 μ T、日本では約50 μ Tである。地磁気の影響下で発生進化してきた生物は、生命活動を維持するために地磁気を感知する手段を習得し

てきた。

例えば、地磁気を感知して泳ぐ走磁性細菌から磁鉄鉱(マグネタイト)が Blakemore によって発見¹⁾され、特にミツバチはマグネタイトを地磁気のセンサとして使用し、雲で太陽が見えない時にも飛行方向を検知している²⁾。その他多くの研究によって、生物が磁界を感知して生命活動を維持していることがわかってきている³⁾。人体においては、1992年に脳細胞からマグネタイト類似の結晶が Kirschvink 等によって発見⁴⁾され、このことから磁界が人体の生命活動において重要な役割を果たしていることが推測できる。

工学的には1820年にデンマークのエルステッドが電磁誘導を発見してから1世紀以上が経過し、磁界の利用は著しく発達してきた。最近では、リニアモーターカーやMRIに用いられている超電導技術の進歩によって、約20 Tまでの磁界強度を発生させることが可能になっている。

近年これらの科学技術の進歩によって、自然環境下には存在し得ない磁界環境が我々の身の回りに形成されつつある。それに伴い、磁界環境の生体に及ぼす影響の解明と理解に対する社会的関心が高まっている。磁界の生体影響につ

いて興味を持たれるようになったのは、1966年に旧ソビエト連邦の超高压変電所作業員に頭痛、疲労、性的能力減退などの不定愁訴が現れるという Asanova 等⁵⁾と Korobkova 等⁶⁾の医学検査報告を発端としている。その後世界的に多くの磁界研究が行われ、1979年に米国で磁界と生体に関する疫学調査結果が Wertheimer 等によって報告された⁷⁾。この報告では、高压送電線近くに住む子供に小児がんが多発しており、高電圧から誘起される磁界と生体影響の関連性が初めて科学的に認められ、以降本格的な磁界研究が行われるようになった。

このように磁界の生体影響については、プラス面とマイナス面があると考えられている。最近の磁界研究では、発がん性に着目した研究(表1)⁸⁾¹²⁾のみならず、磁界の生体影響のメカニズム解明を目的として個体ならびに細胞レベルで多くの研究が精力的に進められている。本稿では環境問題の理解と改善だけでなく、磁界が生体に影響を及ぼすのであればこれを積極的に医療へ応用することも考慮した磁界研究の現状について解説する。

表1. 発がんに関する磁界研究の例⁸⁾¹²⁾

研究者	目的	対象	磁界強度と曝露特性	結果
Galloni	マウスの腺がんの進展に対する磁界曝露の影響	C3H/DBA2J マウス	・ 50 Hz, 0.25 およ び 0.5 mT ・ 25 週間曝露	・ 影響なし
Boorman	ラットの発がんに対する長期磁界曝露の影響	F344/N ラット	・ 60 Hz, 0 ~ 1 mT ・ 105 週間曝露	・ 影響なし
Mandeville	ENU † で誘発したラットの脳腫瘍の進展に対する磁界曝露の影響	F344 ラット	・ 60 Hz, 0 ~ 2 mT ・ 妊娠 18 日間で実験開始	・ プロモータ効果なし
Thun-Battersby	DMBA †† で誘発したラット乳腺腫瘍の進展に対する磁界曝露の影響	Sprague-Dawley 系ラット	・ 50 Hz, 100 μT ・ 27 週間曝露	・ プロモータ効果あり
Mevissen	ラットの ODC ††† 活性に対する磁界曝露の影響	Sprague-Dawley 系ラット	・ 50 Hz, 0.1 mT ・ 13 週間曝露	・ 乳腺腫瘍発生と ODC 活性は磁界曝露時間に依存

† ENU (N-ethyl-N-nitrosourea)

†† DMBA (7,12-dimethylbenz()anthracene)

††† ODC (ornithine decarboxylase)

磁界効果の概略

磁界には変動磁界と静磁界の2種類が存在し、その生体効果は根本的に異なる。磁界の生体効果としては、以下の3つに大別できる¹³⁾。

- () ジュール熱の発生 (熱効果)
- () 神経、筋、感覚器等、興奮性組織への刺激 (刺激効果)
- () 組織、細胞などへの直接作用 (非熱効果)

変動磁界の効果には、誘導電流によって発生する渦電流の及ぼす影響も含んでいる。そのため生体の電気的特性¹⁴⁾から、周波数 100 kHz 以上の高周波磁界では体内に流れる電流によってジュール熱が発生し、熱効果が支配的となる。一方それ以下の周波数 (低周波磁界) では、神経や筋などの興奮性組織が興奮する刺激効果が主な効果となる。すなわち変動磁界を用いた場合、高周波では熱と磁界の効果、低周波では刺激と磁界の効果が同時に発現することになり、磁界そのものの効果である非熱効果だけを分離することは難しい。従って非熱効果のみを検討するには、誘導電流を発生させず、熱や刺激の効果を持たない静磁界を用いることが適当である。図1は、これまでに知られている生体磁気や外部磁界の生体影響について主なものを取り上げ、磁界強度と周波数の関係としてまとめた結果¹⁵⁾である。

本稿ではまず、変動磁界による熱と刺激の効果に関して、これまでの精力的な研究からほぼ明らかにされてきている知見を概観する。次に最近多くの研究が始まっているが、依然として不明な点が多山積している非熱効果に着目した研究について紹介する。

変動磁界の生体影響

1) 低周波磁界

前述の Wertheimer 等の報告⁷⁾に続いて、Milham がワシントン州の男性の死亡原因を解析し、電気作業員の白血病リスクが増加することを報告¹⁶⁾し、生活環境下で使用している商用電力から誘起される周波数 (50 / 60 Hz) の変動

磁界が生体に悪影響を与えている可能性に関する社会的関心が高まったことを受けて、それを検証すべく世界的に多数の研究が行われた。

一般的に個体レベルに対する低周波磁界はエネルギーが小さいため、直接的に DNA を損傷してがんを発症することはないと考えられている。そのため、疫学調査で報告されているような磁界とがんの関係があるのならば、化学的発がん性物質によるがん誘発に対して、磁界が協動的に働く可能性が疑われ、モデル動物を用いたがん誘発に対する磁界のプロモータ効果の関係についての研究が行われてきた。その結果、個体レベルで例えば乳腺腫瘍に対して Thun-Battersby 等¹¹⁾と Mevissen 等¹⁷⁾は、化学的発がん性物質 DMBA (7,12-dimethylbenz()anthracene) による乳腺腫瘍の誘発に対して、環境レベルよりも強い人工発生的外部磁界としては低強度の 100 μ T の磁界でプロモータ効果を得ているが、脳腫瘍に対して Mandeville 等¹⁰⁾と Deseze 等¹⁸⁾は、化学的発がん性物質 ENU (N-ethyl-N-nitrosourea) や BaP (benzo()pyrene) による神経系腫瘍の誘発に対して、中強度の 100 mT でもプロモータ効果を観測できていない。これらの研究は、現在でも引き続き進めら

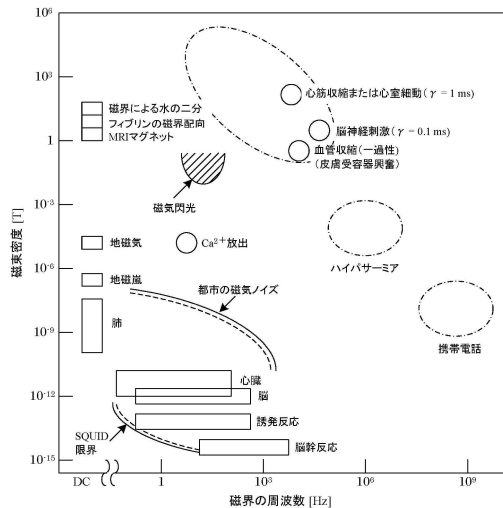


図1. 生体磁気現象と外部磁界の強度と周波数 (文献¹⁵⁾を改変)。DCは静磁界を表す。

れている。

このような個体レベルにおける低周波磁界影響のメカニズムを詳細に解明することを目的として、細胞レベルでの研究も精力的に行われている。例えば細胞増殖、細胞分化などに加え、特異的な遺伝子発現、シグナル変換などに対する磁界の影響が検討されてきた^{19)・29)}。Miyakoshi 等は、中強度の 5 mT の磁界をチャイニーズハムスター卵巣由来の線維芽細胞株 (CHO) に曝露するための施設を開発して実験を行ったが、DNA 損傷や遺伝子的な損傷を及ぼす証拠は得られなかった³⁰⁾。Ohtsu 等は、神経細胞のモデルとしてよく用いられるラット副腎髄質褐色細胞腫由来の細胞 (PC12-VG) に同じく 200 ~ 400 mT の磁界を曝露すると細胞死に至るような有毒効果ではなく、細胞膜を通じたイオンの流入出などの細胞内情報伝達に影響を及ぼす可能性を示唆する結果を得ている³¹⁾。また Yaguchi 等は、マウス線維芽細胞 (m5S) を用いて DNA の複製過程における細胞内調節機構への磁界影響 (5 ~ 400 mT) も指摘し^{32)・33)}、さらに 400 mT の磁界が放射線や化学物質などが細胞に作用する過程を修飾している可能性を指摘している^{30)・33)}。

これら低周波磁界の生体影響についての総合的研究プロジェクトの代表として、1993年から6年間、米国にて行われた RAPID (Research and Public Information Dissemination) 計画が挙げられる。その成果をまとめて、1999年に NIEHS (National Institute of Environmental Health Sciences) から「磁界は生体に悪影響を与えないが、何らかの影響はある」と言う灰色の結果が報告³⁴⁾され、未だに低周波磁界の生体影響についての明確な結論には至っていない。しかし一方では、低周波磁界 (数十 ~ 数百 mT) の刺激効果を応用して、Bassett 等が電気刺激に代わる骨折の刺激療法^{35)・36)}を見出し、低周波磁界の刺激効果を利用した医療機器等が開発されつつある。

2) 高周波磁界

携帯電話の普及に伴い、1992年米国で携帯電話が原因で脳腫瘍になったとの訴訟があった。これが発端となり、世界保健機関 (WHO) などによって高周波磁界に対する安全性評価が実施されるようになった^{37)・39)}。近年の個体レベルにおける研究では、Imaida 等が携帯電話の電力レベルで周波数 1.5 GHz の磁界をラットに曝露しても肝臓ガンの促進がないことを報告している⁴⁰⁾。また周波数 800 MHz の磁界をマウスに曝露してもリンパ腫の促進がないことを Imaida 等⁴¹⁾ や Utteridge 等⁴²⁾ が報告している。なお市販の携帯電話レベルの磁界強度は、電波防護指針から数 μ T と規定されている。

細胞レベルにおいては挙動や DNA への磁界影響について、例えば Adey⁴³⁾ や Grodsky⁴⁴⁾ は支持し、Michaelson⁴⁵⁾ や Erwin⁴⁶⁾ は懐疑的であるなど、議論が両極端に分かれている現状である。これは、報告された現象を他の研究者が再現しようとしても同じ結果が得られないことが多く、実験容器内の環境や試料のばらつきが十分に制御されていないためと考えられたり、また高周波磁界は熱効果⁴⁷⁾ が大きく、その効果を分離して非熱効果のみを選択的に検討することが難しいためと考えられる。

これらの報告から今のところ、携帯電話レベルの高周波磁界が生体に悪影響を及ぼす具体的な根拠はないと考えられている。今後ミリ波領域における電磁界利用の拡大が予想されているが、ミリ波のエネルギーは体表面でほとんどが吸収されることが知られているため、生体内部への特別な影響は考えにくいとされている。しかし、個体および細胞レベルにおける科学研究による確認が必要であることは言うまでもない。なお現在、高周波磁界の熱効果⁴⁷⁾ を利用して、ジアテルミやハイパーサーミアが臨床で利用されている。

静磁界の生体影響

静磁界の生体影響については、Koana 等⁴⁸⁾ や

磁界の生体に及ぼす影響

吉川等⁴⁹⁾によるショウジョウバエ体細胞の突然変異への静磁界の影響(600 mT)などの個体レベルで研究が行われてきたが、機序を説明しようような効果は見出されていない。これらの結果、磁界の強さや曝露時間、着目する指標の選び方などによって極めて種々の結論が出てくる現状を考慮すると、静磁界の影響は仮に存在するとしてもかなり弱いものであり、生体機能の維持に影響を及ぼすことは考えにくいとされている。また動物実験において全身を長時間磁界にさらした場合、行動に抑制的な効果が現れるとの報告はあるが、それらは器質的なものではなく一過性の機能的変化であると考えられ、脳波に対する影響も見出されていない^{50), 51)}。

個体レベルにおける静磁界の影響を明確に検出するのは困難であるが、生体内には常磁性物質であるマグネタイト類似結晶の他に酸素やヘム鉄が存在しているため、細胞および分子レベルにおいては静磁界の影響はあるものと考えられている。酸素は呼吸によって肺内に取り込まれ、赤血球中のヘモグロビンと結合して組織へと運ばれる。酸素は組織から細胞に運ばれ、細胞内にてグルコースと酸化のリン酸化を行い生命維持に必要なエネルギーを産生する。その反応の始めと終わりだけを式で表すと以下ようになる。



この反応を空气中で起こそうとすると、燃焼現象であるために高い温度が必要となるが、細胞内では多数の酵素および補酵素の一連の触媒作用により体温下で進行する。

このような生体内酸化過程では、ミトコンドリア内に存在する電子伝達系の構成要素である金属酵素チトクロムが重要な役割を果たしているため、上野等は磁界と代謝との関連をチトクロムの磁氣的性質から論じている⁵²⁾。チトクロムはヘムを持つタンパクの一つで、呼吸鎖における電子伝達系で重要な役割を担っている。ヘム鉄は Fe^{2+} Fe^{3+} の形で酸化還元を行うが、 Fe^{2+} は d 電子 6 個、 Fe^{3+} は d 電子 5 個を有し、

表 2 . ヘムタンパクの磁氣的特性(文献⁵³⁾を
 改変)

電子スピン	Fe^{2+}	Fe^{2+}	Fe^{3+}	Fe^{3+}			
	S = 2	S = 0	S = 5/2	S = 1/2			
$d_{x^2-y^2}$	↑	—	↑	—			
d_{z^2}	↑	—	↑	—			
電子配置							
					例	還元形チトクロム Cytc(Fe^{2+}) Cyth(Fe^{2+}) Cytb(Fe^{2+})	酸化形チトクロム Cytc(Fe^{3+}) Cyth(Fe^{3+}) Cytb(Fe^{3+})

これら d 電子の配置の仕方では磁氣的性質が決まる。すなわち、ヘム鉄は通常 4 種類(表 2⁵³⁾の異なる電子配置をとる。チトクロムの磁氣的性質の場合、 Fe^{3+} は低スピンフェリ (Fe^{3+} , $S = 1/2$) で常磁性、 Fe^{2+} は低スピンフェロ (Fe^{2+} , $S = 0$) で反磁性である。すなわちチトクロムは電子移動に伴って常磁性や反磁性の特徴を持つ。生体系物質の大部分は反磁性物質により構成されているが、この電子伝達過程にみられるように重要な生命過程には常磁性物質の関与が必須であり、ここに磁界の生体へ及ぼす影響についての一つの可能性があると考えられている。

近年の超電導技術の進歩によって、人工的外部磁界として極めて高強度(5 ~ 10 T)の磁界が比較的容易に得られるようになり、これまで反磁性物質としてほとんど問題にされていなかった生物物質や、個体に対する磁界の影響が次第に明らかにされてきている。その例として、フィブリンやコラーゲンが強静磁界によって配向する現象⁵⁴⁾が Eguchi 等により見出され、人工的に神経や血管を構築する再生医療分野への応用が期待されている。

我々の知る限り、これら以外に静磁界の生体への効果について現在までに明らかにされている知見はほとんどなく、強静磁界以外の生体影

響については未解明な部分がまだ山積になっている。そこで我々は、反磁性物質に影響を及ぼさないと考えられている人工的外部磁界として、中強度(数~数百 mT)の静磁界影響のメカニズム解明を目指している。すなわち磁界に高い感受性を示す生物的指標を見出すために細胞挙動に着目し、その制御機構(細胞内の情報伝達機構)に及ぼす静磁界の影響について分子レベルで検討を行っている。

その結果^{55),56)}これまでに、強度 50 mT の静磁界曝露が、神経芽細胞腫(NG108-15)の培地中グルコースの取り込みと呼吸鎖に着目した代謝活性を促進させて、エネルギー産生を増加させるとともに、形態変化や接着活性を抑制することが明らかになっている。さらにこれらの実験結果と既知の知見に基づき、細胞挙動を制御する細胞内の情報伝達機構への静磁界影響を検討し、細胞内の情報伝達機構への静磁界影響メカニズムのモデルを構築しつつある。今後は、静磁界の作用部位を特定するために必須である細胞内深部情報伝達機構への静磁界影響を詳細に明らかにしていくことが重要な課題の一つであって、その解明は静磁界影響のメカニズムを明らかにする学問的意義ばかりでなく、機能的な人工的細胞挙動の制御等の各種応用研究にも発展していくことが期待される。

おわりに

本稿では、磁界の非熱効果についてこれまでに行われてきた研究の現状を概観した。低周波磁界については、20年以上にわたる実験・調査研究がなされてきており、特に米国の RAPID 計画、その後の IARC(International Agency for Research in Cancer)による発がん性に関する評価⁵⁷⁾が一大国家的プロジェクトとして行われてきた。現在は、WHO が環境保健基準の見直しを目的として、1996年から2007年を目途に低周波および高周波磁界の生体影響プロジェクト(国際電磁界プロジェクト)を進めている。

本稿で概観してきたように磁界の生体影響については、長年の研究によって決して少なくないデータの蓄積がある。今後は、その積極的・消極的知見にかかわらず、両面から得られた知識を体系的に統合し、活用していくべきである。しかし、非熱効果については未だに不明な点も多く残されており、研究をさらに進めていく必要がある。特に細胞レベルにおいて磁界に高い感受性を示す生物的指標を見出してそのメカニズムを解明し、組織レベルの知見を個体レベルのそれらへと繋げる研究が重要である。

21世紀においてますます拡大する磁界環境との共存を考えるうえで、磁界の生体影響についてのさらなる科学的な知見の蓄積とその有機的な統合が重要な課題であり、そのためには磁界の生体影響に対する科学的な根拠を明らかにしていく必要がある。また磁界影響のメカニズムを解明することは、科学技術の進歩とともに医療分野への新しい応用につながるものと期待される。

文 献

1. Blakemore R: Magnetotactic bacteria. *Science* 1975; 190: 377-379
2. Lindauer M, Martin H: Die Schwereorientierung der Bienen unter dem Einfluß des Erdmagnetfeldes. *Z Vergl Physiol* 1968; 60: 219-243
3. Wiltschko R, Wiltschko W: Magnetic orientation in animals. Springer-Verlag, New York, 1995; 1-297
4. Kirschvink JL, Kobayashi-Kirschvink A, Woodford BJ: Magnetite biomineralization in the human brain. *Proc Natl Acad Sci USA* 1992; 89: 7683-7687
5. Asanova TP, Rakov AL: The state of health of persons working in the electric field of outdoor 400 and 500 kV switchyards. *Gig Trud Prof Zabol* 1966; 10: 50-52
6. Korobkova VP, Morozov YA, Stolarov MS,

磁界の生体に及ぼす影響

- Yakub YA: Influence of the electrical field in 500-750 kV switchyards on maintenance staff and means for its protection. Paris; CIGRE, 1972: 1-9
7. Wertheimer N, Leeper E: Electrical wiring configuration and childhood cancer. *Am J Epidemiol* 1979; 109: 273-284
 8. Galloni P, Marino C: Effects of 50 Hz magnetic field exposure on tumor experimental models. *Bioelectromagnetics* 2000; 21: 608-614
 9. Boorman GA, McCormick DL, Findlay JC, Hailey JR, Gauger JR, Johnson TR, et al.: Chronic toxicity/oncogenicity evaluation of 60 Hz (power frequency) magnetic fields in F344/N rats. *Toxicol Pathol* 1999; 27: 267-278
 10. Mandeville R, Franco E, Sidrac-Ghali S, Paris-Nadon L, Rocheleau N, Mercier G, et al.: Evaluation of the potential promoting effect of 60 Hz magnetic fields on N-ethyl-N-nitrosourea induced neurogenic tumors in female F344 rats. *Bioelectromagnetics* 2000; 21: 84-93
 11. Thun-Battersby S, Mevissen M, Loscher W: Exposure of Sprague-Dawley rats to a 50-Hertz, 100-microTesla magnetic field for 27 weeks facilitates mammary tumorigenesis in the 7,12-dimethylbenz[*a*]-anthracene model of breast cancer. *Cancer Res* 1999; 59: 3627-3633
 12. Mevissen M, Haussler M, Loscher W: Alterations in ornithine decarboxylase activity in the rat mammary gland after different periods of 50 Hz magnetic field exposure. *Bioelectromagnetics* 1999; 20: 338-346
 13. 電気学会・高周波電磁界の生体効果に関する計測技術調査専門委員会編：電磁界の生体効果と計測．東京；コロナ社，1996: 33-45
 14. 斎藤正男：電磁界の生体への影響．テレビジョン学会誌 1988; 42: 945-950
 15. 上野照剛：生体磁気研究の最近の展開．電気学会論文誌C 1996; 116: 141-144
 16. Milham S: Mortality from leukemia in workers exposed to electrical and magnetic fields. *N Engl J Med* 1982; 307: 249
 17. Mevissen M, Haussler M, Lerchl A, Loscher W: Acceleration of mammary tumorigenesis by exposure of 7,12-dimethylbenz[*a*]-anthracene-treated female rats in a 50-Hz, 100-microT magnetic field: replication study. *J Toxicol Environ Health A* 1998; 53: 401-418
 18. Deseze R, Tuffet S, Moreau JM, Veyret B: Effects of 100 mT time varying magnetic fields on the growth of tumors in mice. *Bioelectromagnetics* 2000; 21: 107-111
 19. Livingston GK, Witt KL, Gandhi OP, Chatterjee I, Roti Roti JL: Reproductive integrity of mammalian cells exposed to power frequency electromagnetic fields. *Environ Mol Mutagen* 1991; 17: 49-58
 20. Miyakoshi J, Ohtsu S, Tatsumi-Miyajima J, Takebe H: A newly designed experimental system for exposure of mammalian cells to extremely low frequency magnetic fields. *J Radiat Res* 1994; 35: 26-34
 21. Cohen MM, Kunska A, Astemborski JA, McCulloch D, Paskewitz DA: Effect of low-level, 60-Hz electromagnetic fields on human lymphoid cells: I. Mitotic rate and chromosome breakage in human peripheral lymphocytes. *Bioelectromagnetics* 1986; 7: 415-423
 22. Reese JA, Jostes RF, Frazier ME: Exposure of mammalian cells to 60-Hz magnetic or electric fields: analysis for DNA single-strand breaks. *Bioelectromagnetics* 1988; 9: 237-247
 23. Scarfi MR, Lioi MB, Zeni O, Franceschetti G, Franceschi C, Bersani F: Lack of chromosomal aberration and micronucleus induction in human lymphocytes exposed to pulsed magnetic fields. *Mutat Res* 1994; 306: 129-133
 24. Lacy-Hulbert A, Wilkins RC, Hesketh TR, Metcalfe JC: No effect of 60 Hz electromagnetic fields on MYC or beta-actin expression in human leukemic cells. *Radiat Res* 1995; 144: 9-17
 25. Saffer JD, Thurston SJ: Short exposures to 60 Hz magnetic fields do not alter MYC expression in HL60 or Daudi cells. *Radiat Res* 1995; 144: 18-25

26. Miyakoshi J, Ohtsu S, Shibata T, Takebe H: Exposure to magnetic field (5 mT at 60 Hz) does not affect cell growth and c-myc gene expression. *J Radiat Res* 1996; 37: 185-191
27. Azadniv M, Klinge CM, Gelein R, Carstensen EL, Cox C, Brayman AA, et al.: A test of the hypothesis that a 60-Hz magnetic field affects ornithine decarboxylase activity in mouse L929 cells in vitro. *Biochem Biophys Res Commun* 1995; 214: 627-631
28. Cossarizza A, Monti D, Sola P, Moschini G, Cadossi R, Bersani F, et al.: DNA repair after gamma irradiation in lymphocytes exposed to low-frequency pulsed electromagnetic fields. *Radiat Res* 1989; 118: 161-168
29. Frazier ME, Reese JA, Morris JE, Jostes RF, Miller DL: Exposure of mammalian cells to 60-Hz magnetic or electric fields: analysis of DNA repair of induced, single-strand breaks. *Bioelectromagnetics* 1990; 11: 229-234
30. Miyakoshi J, Koji Y, Wakasa T, Takebe H: Long-term exposure to a magnetic field (5 mT at 60 Hz) increases X-ray-induced mutations. *J Radiat Res* 1999; 40: 13-21
31. Ohtsu S, Miyakoshi J, Tsukada T, Hiraoka M, Abe M, Takebe H: Enhancement of beta-galactosidase gene expression in rat pheochromocytoma cells by exposure to extremely low frequency magnetic fields. *Biochem Biophys Res Commun* 1995; 212: 104-109
32. Yaguchi H, Yoshida M, Ejima Y, Miyakoshi J: Effect of high-density extremely low frequency magnetic field on sister chromatid exchanges in mouse m5S cells. *Mutat Res* 1999; 440: 189-194
33. Yaguchi H, Yoshida M, Ding GR, Shingu K, Miyakoshi J: Increased chromatid-type chromosomal aberrations in mouse m5S cells exposed to power-line frequency magnetic fields. *Int J Radiat Biol* 2000; 76: 1677-1684
34. NIEHS NIH: NIHES Report on Health Effects from Exposure to Power-Line Frequency Electric and Magnetic Fields. NIH publication, North Carolina, 1999; 1-40
35. Bassett CA, Mitchell SN, Gaston SR: Treatment of ununited tibial diaphyseal fractures with pulsing electromagnetic fields. *J Bone Joint Surg Am* 1981; 63: 511-523
36. Bassett CA: Fundamental and practical aspects of therapeutic uses of pulsed electromagnetic fields (PEMFs). *Crit Rev Biomed Eng* 1989; 17: 451-529
37. World Health Organization / International Radiation Protection Association: Electromagnetic fields(300 Hz to 300 GHz). World Health Organization publication, Geneva, 1993; 1-290
38. Saunders RD, Kowalczyk CI, Sienkiewicz ZJ: Biological effects of exposure to non-ionising electromagnetic fields and radiation. National Radiological Protection Board (NRPB), Didcot, 1991; 1-140
39. Repacholi MH: Low-level exposure to radiofrequency electromagnetic fields: health effects and research needs. *Bioelectromagnetics* 1998; 19: 1-19
40. Imaida K, Taki M, Watanabe S, Kamimura Y, Ito T, Yamaguchi T, et al.: The 1.5 GHz electromagnetic near-field used for cellular phones does not promote rat liver carcinogenesis in a medium-term liver bioassay. *Jpn J Cancer Res* 1998; 89: 995-1002
41. Imaida K, Taki M, Yamaguchi T, Ito T, Watanabe S, Wake K, et al.: Lack of promoting effects of the electromagnetic near-field used for cellular phones (929.2 MHz) on rat liver carcinogenesis in a medium-term liver bioassay. *Carcinogenesis* 1998; 19: 311-314
42. Utteridge TD, GebSKI V, Finnie JW, Vernon-Roberts B, Kuchel TR: Long-term exposure of E-mu-Pim1 transgenic mice to 898.4 MHz microwaves does not increase lymphoma incidence. *Radiat Res* 2002; 158: 357-364
43. Adey WR: Tissue interactions with nonionizing electromagnetic fields. *Physiol Rev* 1981; 61: 435-514
44. Grodsky IT: Possible physical substrates for

磁界の生体に及ぼす影響

- the interaction of electromagnetic fields with biologic membranes. *Ann N Y Acad Sci* 1975; 247: 117-124
45. Michaelson SM: Effects of exposure to microwaves: problems and perspectives. *Environ Health Perspect* 1974; 8: 133-155
46. Erwin DN: Mechanisms of biological effects of radiofrequency electromagnetic fields: an overview. *Aviat Space Environ Med* 1988; 59: A21-31
47. 中山昭雄 (編): 温熱生理学 理工学社, 東京, 1981; 1-638
48. Koana T, Ikehata M, Nakagawa M: Estimation of generic effects of a static magnetic field by a somatic cell test using mutagen sensitive mutants of *Drosophila melanogaster*. *Bioelectrochem Bioenergetics* 1995; 36: 95-100
49. 吉川勲, 岩坂正和, 上野照剛: ショウジョウバエ体細胞突然変異検出系への磁場影響. *日本応用磁気学会誌* 1995; 19: 597-600
50. 中川正祥, 室屋英幸: 定常磁場がマウスの情動行為と平衡感覚に及ぼす作用. 第54回日本産業衛生学会予稿集 1981; 23: 784-785
51. 中川正祥: 定常磁場への短時間曝露におけるウサギの電気生理学的反応の検出. *日本衛生学雑誌* 1984; 38: 899-908
52. 上野照剛: 電気学会マグネティックス研究会資料 MAG 1983; 83: 1
53. Wüthrich K (荒田洋治, 甲斐荘正恒訳): 生体物質のNMR. 東京化学同人, 東京, 1979; 1-355
54. Eguchi Y, Ogiue-Ikeda M, Ueno S: Control of orientation of rat Schwann cells using an 8-T static magnetic field. *Neuroscience letters* 2003; 351: 130-132
55. 小野寿樹, 斎藤正男: 静磁界曝露下における細胞の挙動. *電気学会論文誌 C* 2002; 122: 1547-1552
56. 小野寿樹, 斎藤正男, 中村孝夫: 静磁界曝露下における細胞挙動の変化. *日本生体磁気学会論文誌* 2004; 17: 25-30
57. WHO-IARC Working Group: Static and Extremely Low-Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans Vol 80 Non-Ionizing radiation, part 1. WHO-IARC publication, Lyon, 2002; 1-429

Biological Effects of Magnetic Field

Takao Nakamura, Toshiki Ono*, Yasutomo Nomura, Zhonggang Feng**

*Department of Biomedical Information Engineering, Yamagata University
Graduate School of Medicine*

**Department of Systems and Information Engineering, Yamagata University
Graduate School of Science and Engineering*

***Department of Bio-System Engineering, Faculty of Engineering, Yamagata University*

ABSTRACT

With spreading magnetic fields in our environment, effects of the magnetic fields on the biological systems have been of great concern, and the effects of low frequency, high frequency, and static magnetic fields have intensively been evaluated. Although there have been many reports so far on the effects, it is still being argued if there are significant effects or not. In the final reports of RAPID (Research and Public Information Dissemination) program completed in 1999 in the United States, it was concluded that the magnetic fields exposure makes little effects on the human health. One of the reasons why common understanding has still not been fixed yet may be attributed to various experimental setups of studies. If we use an animal, for example, we must consider various biological factors such as emotion and hormones in addition to the magnetic effects themselves. Furthermore, alternative field may induce thermal and stimulation effects on the excitable tissues as well. To overcome the situation, as the first step, studies on the effects of static magnetic field (with non-thermal, non-stimulation effect) on cellular level (without humoral and/or emotional factors) must be quite useful. The results of the study may be applicable to the medical and tissue engineering fields.

Key words : Low frequency magnetic field, High frequency magnetic field, Static magnetic field, Non-thermal effect, Cellular level