総 説

生体に及ぼす磁界の影響[†]

上野照剛

東京大学大学院医学系研究科
113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

Key Words: magnetic field, living system, extremely low frequency (ELF), static magnetic field, time varying magnetic field

1. はじめに

近年、商用周波電磁界を中心として変動磁界および直流磁界の生物学的影響の有無について関心が高まっており、国内外においてすでに多くの調査研究報告が見られる¹⁾⁻²⁾。

電磁界の安全性に社会的関心が寄せられる一方で、磁界の有効利用の立場より医学応用などを目標とした様々な研究がなされている。これらの最近の研究の進展により、生物に対する電磁界影響についてようやく体系的な理解が得られ始めるようになってきたといえよう。

環境電磁界の安全性に関し、超低周波数 ELF (extremely low frequency) 電磁界の生体影響が検討され、高電圧線の沿線住民を対象とした発がん率調査や、生物個体および細胞を用いた実験により、ELF 電磁界の生体影響に関するさまざまな研究報告が公表されている。これらの研究報告の中には影響を認めるものと否定するものが存在している。実験動物や細胞を用いて ELF 電磁界曝露の影響を調べる研究は近年ますます盛んになりつつある。松果体のメラトニン分泌、細胞におけるカルシウム流入・放出、細胞内信号伝達に対する ELF 磁界曝露の研究などが報告されている。しかし、こ

れらの報告については、十分な確証が得られていないものが多い。

一方、直流磁界の生体影響に関しても、これまでに多くの研究報告が見られる。MRI (magnetic resonance imaging: 核磁気共鳴イメージング) で用いられている 1-2 テスラ (T) 程度の直流磁界は、短時間の曝露であれば人体の健康に対して悪影響を与えないと考えられている。近年の超伝導技術の進歩により 10 T オーダの直流磁界を発生する室温空間が得られるようになり、微生物や生体構成物質に対する 10 T オーダの直流磁界効果が、再現性のある現象として報告されている。しかし、細胞増殖、生物発生や生物個体の健康状態を顕著に変化させるほどの効果は、たとえ 10 T 前後の直流磁界下でも観測されていない。

本報告では、変動磁界の医療応用の例として生体磁気刺激法等の紹介を行い、10 T オーダの直流磁界下での生物および物理化学的效果の研究例について述べる。また、ELF 電磁界の生体影響に関する基礎研究サイドでの現状の簡単な解説を行う。

2. 変動磁界の生体影響

磁界の周波数を 0 (直流) から高周波まで変化させた場合に見られるさまざまな生体関連現象を図 1 に示す。生体内の電氣的活動によりピコテスラオーダの微小な変動磁界が発生している。また、生体外部から生体内に影響を及ぼし

[†] Effects of Magnetic Field on Living System. Shogo UENO: Graduate School of Medicine, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan.

うる磁界の磁束密度は周波数により異なり、影響の閾値となる磁束密度は周波数の増加とともに減少すると考えられる。直流磁界 (DC) が生体に与える影響に関しては3章で述べるが、ヒトの健康影響の閾値となる磁束密度は未だに不明である。

変動磁界の場合、影響の程度は生体を構成する物質の電気的特性に依存する。生体内部に誘起される誘導電場 (電流) の大きさおよび、電磁界の周波数の大きさにより熱的な影響と非熱的な影響に区別される。

商用周波数 ELF 電磁界の影響の機構は非熱効果に分類される。携帯電話で用いられる数百メガ Hz - ギガ Hz の高周波電磁場では、電磁場曝露による生体の吸収電力の推定が研究対象

となっている。ハイパーサーミアでは、生体組織の電磁場エネルギー吸収に伴う熱発生により腫瘍部位を加温することを目的としている。

変動磁界が生体組織内に誘導させる電流による非熱効果として、誘導電場による神経刺激あるいは細胞刺激がこれまで盛んに研究されている。最も古い研究報告は磁気閃光であろう。磁気閃光とは、交流磁界に頭部が曝されたとき視覚が認められる現象である。この現象は1896年に d'Arsonval によって報告され、20 Hz 近傍の交流磁界に視神経を曝した場合に最もよく光が見える。そのときの最小の磁界強度は目のあたりで 10 mT である。電磁誘導により頭の中に渦電流が流れ、これが網膜を刺激して閃光が知覚されると考えられる。

図 1 磁界の周波数とさまざまな生体関連現象 (文献 1, 2 より引用)

パルス磁界を用いれば、パルスの立上り時の磁界の急激な変化を利用して生体内に電流を誘起させることが可能である。図1の周波数 $\sim 10^3$ Hz および磁束密度 ~ 1 T に、神経や筋を誘導電流で刺激する磁気刺激の領域があるが、これはパルスの立上り／立下り時間を交流磁界周波数に便宜的に換算して示してある。

2・1 生体磁気刺激

パルス磁界によって生体内に渦電流を誘起させ、これにより神経や筋を刺激する磁気刺激が最近注目されている。磁気刺激については1965年よりいくつかの刺激方法が開発され、基礎研究が積み重ねられてきたが、実用化をはばむ種々の問題があり、臨床に应用されるまでには至っていなかった。ところが、ヒトの頭の表面にドーナツ状のコイルを置き、このコイルに大電流を瞬間的に流しパルス磁界をつくることにより脳を刺激することが可能となり³⁾、これを契機として、脳や末梢神経の磁気刺激に関する研究が盛んに行われるようになってきた。しかし、初期の磁気刺激では、標的のみを局所的に刺激することができず、いろいろと不都合であった。これに対して、Ueno らにより8字コイルを用いた局所的磁気刺激法が考案され⁴⁾ 大脳皮質の標的のみを5mm以内の分解能で刺激することが可能となった⁵⁾。また、脊髄根や横隔膜、さらには、心臓も磁気刺激することが可能で、磁気による人工呼吸や徐細動の研究も進められている^{6), 7)}。

2・2 ハイパーサーミア

ハイパーサーミアによるがんの温熱療法の研究も行われており、いくつかの加温方式が提案されている。ソフトヒーティング法では、感温磁性材料と呼ばれる低キュリー温度の磁性材料を生体内に埋め込み、生体の外部から高周波磁界を印加して感温磁性材料の鉄損による発熱を生じさせ、腫瘍をキュリー温度まで加温することができるため有望視されている⁸⁾。

3. 直流磁界の生体影響

3・1 人体に対する直流磁界の影響

人体が自然に曝されている直流磁界は地磁気であり、その磁束密度は30-50 μ Tである。現在、人体が曝される最大の直流磁界は、医療機関において人体断層撮影に用いられるMRIが発生する磁界である。これまでのMRIの磁束密度は主に1.5Tか2.0Tであったが、最近の機能的MRI(fMRI)では脳の機能代謝情報を得るため4Tの超伝導磁石を用いる場合がある。すでに、ボランティアの協力による総計150時間の4T磁界曝露によるヒトの健康影響が報告されているが、4T磁界の曝露開始時および曝露後1年の間において、顕著な健康異常はどのボランティアからも検出されなかった⁹⁾。しかし、健康異常はないが、4T磁界曝露により非常に軽い“めまい”などの感覚刺激を感じたという報告がある⁹⁾。直流磁界中にて人体が動いた場合に神経周囲の導電性媒体に誘導電流が生じることで内耳が刺激された可能性が考えられる。

直流磁界が仮に生体に直接作用するとした場合、その機構として「力学的効果」と「化学的效果」が考えられている¹⁾。人体(あるいは生体)を構成する物質は非磁性物質であり磁界に対して感応しない、と考えられてきた。しかし、数テスラの磁束密度を持つ磁界では生体物質がもつ小さな磁化率が無視できなくなる。生体を構成する大部分の物質は反磁性物質でありその磁化率はマイナスである。表1に示すように、磁化率 χ を持つ物体が磁束密度の空間勾配 dB/dz をもつ直流磁界に曝された場合、 dB/dz と B と χ の積に比例する力を受ける。蛋白質や水などの反磁性物質は磁束密度の高い方から低い方へ磁気力を受ける。一方、酸素分子などの常磁性物質は磁束密度の低い方から高い方へ磁気力を受ける。勾配磁界下で生体を受ける磁気力が重力に匹敵する条件を得るには、 dB/dz と B の積が数千 T^2/m 以上必要である。現

表 1 直流磁界影響の物理化学的メカニズム

(1) 均一磁界	例
● トルク	生体高分子の磁界配向
$T = -\frac{1}{2\mu_0} B^2 \Delta \chi \sin 2\theta$	
● Zeeman分裂	ラジカル対を経由する化学反応への磁界効果
(2) 勾配磁界	
● 磁気力	磁界による水の二分(モーゼ効果)
$F = \frac{\chi}{\mu_0} (\text{grad } B) B$	

在用いられている MRI における dB/dz と B の積は最大数百 T^2/m 程度であるため、人体に作用する磁気力は地球重力より 1-2 桁小さく、健康上特に悪影響はないと思われる。

直流磁界のもう一つの「力学的効果」として磁気トルク作用が考えられる。反磁性磁化率に異方性をもつ分子団を多数含む生体高分子は磁力線に平行または垂直に配向する。さまざまな生体高分子で構成される細胞にも直流磁界下で配向するものが報告されている。数テスラの磁界下の異方性生体高分子の磁気トルクエネルギーは、配向によって生体組織の構造を変えたりするほど大きくないため、人体に悪影響を及ぼす要因になりえないと考えられる。

以上二つの「力学的効果」は磁束密度に比例して磁界効果が増加する例であるが、「化学的効果」は必ずしも磁界の影響力が磁束密度に比例しないことも予想される。磁界の「化学的効果」として報告されている例として、光化学反応に対する磁界効果がある¹⁰⁾。生体内で起こっている生化学反応では、磁界効果が現れるのに必要な反応条件が揃いにくいいためか、これまでに生化学反応に直流磁界効果が見られたという報告は非常に少なく、効果があってもかなり特殊な条件で観測されており、直流磁界の人体影響に結び付ける証拠になりえないと考えられる。今後、実験動物を用いて生化学反応プロセスに対する直流磁界効果をさらに詳細に調べて

いく必要があるといえる。

3・2 生体物質、細胞および実験動物レベルでの直流磁界効果

3・2・1 生体高分子に対する直流磁界効果

生物物質の磁界配向として、血液凝固に関するフィブリンの磁界配向が見いだされている¹¹⁾。血液凝固第一因子フィブリノーゲンは、トロンビンの作用でゲル化してフィブリンを重合するが、この重合過程に磁界をかけておけば、磁界方向に並行にそろったファイバー状のフィブリンが得られる。フィブリンの磁界配向の機構はペプチド基がもつ反磁性磁化率の異方性によるものである。

同様の原理にてコラーゲンや脂質膜も配向することが知られている。コラーゲン重合体の場合、磁界方向に垂直に配向する。

3・2・2 細胞に対する直流磁界効果

血液細胞に対する直流磁界の力学的効果が多数報告されている。勾配磁界下での磁気力が赤血球のふるまいに及ぼす影響に関し、血管中の血球の流れの偏位がどの程度の磁界勾配で起こるかという基礎実験が、Ozaki らによってシアノメトヘモグロビンなどの常磁性血球を用いて行われた¹²⁾。その結果、50 T^2/m オーダの勾配磁界で常磁性血球の偏位が認められている。また、高勾配磁気分離 (HGMS: high gradient magnetic separation) の手法により赤血球を血液から分離することが試みられている¹³⁾。

反磁性磁化への磁気トルク作用による磁界配向に関し、Higashi らは蛋白質以外にも赤血球¹⁴⁾や精子など細胞レベルでの磁界配向を報告した。また、赤血球の凝集・沈降反応が磁界配向に影響を受けることも指摘されている¹⁵⁾。

3・2・3 微生物に対する直流磁界効果

高磁界下における微生物反応に関する報告がなされている。Okuno らは 7T 定常磁界および最大 7T の変動磁界下での生物実験が可能な超伝導マグネットバイオシステムを開発し¹⁶⁾、微生物 (大腸菌、枯草菌) に対する磁界影響を

調べた結果、微生物の遺伝子組替体に顕著な変化は見られなかったが、高磁界中の微生物の方が、対照群よりも死滅期の細胞数が増加した。しかも定常磁界よりも変動磁界中の方が生存菌数が増加した。微生物を磁界に曝露する期間（増殖期，定常期，死滅期）を変化させても同様の磁界効果が観測された。

3・2・4 実験動物に対する直流磁界効果

発生生物学的立場から、磁界中のツメガエルの胚の初期発生過程が観測されたが、8 T の強磁界においても、特筆すべき変化は認められていない¹⁷⁾。しかし、磁界による催奇形成の有無は慎重に検討する必要がある。

また、ハツカネズミ、ラット、マウス、ウサギなどの動物を磁界に曝露した場合のふるまいや生化学的指標の変化に関する研究が Nakagawa らにより報告されている¹⁸⁾。

一方、直流磁界の突然変異誘発能の有無を検討するため、Yoshikawa らはショウジョウバエの眼と羽の体細胞突然変異検出系を遺伝的に組み合わせた系を構築し、磁界の遺伝的影響を調べた。ショウジョウバエの幼虫を 8 T 磁界に曝露することで、眼色モザイク突然変異率の増加が有意に認められた¹⁹⁾。一方、Koana らは 5 T 磁界にショウジョウバエの幼虫を曝露することで、羽の体細胞突然変異率の増加を観測するとともに、ラジカル消去剤であるビタミン E が磁界効果を打ち消すことを見いだした²⁰⁾。

3・2・5 酵素反応に対する直流磁界効果

酵素活性に関しては、活性中心が Fe^{3+} をもつカタラーゼの働きが、0.6 - 6 T の磁界で変化を受けたとの報告²¹⁾ や 0.1 - 8 T の均一磁界および 0 - 200 T/m の勾配磁界中、酵素活性そのものに対する磁界効果は認められなかったとの報告²²⁾ など、相反する報告が見られる。カタラーゼの酵素活性に関しては、最近、カタラーゼによる過酸化水素分解反応速度が 8 T 直流磁界下²³⁾ や 1 T 変動磁界下²⁴⁾ で抑制されたとの報告もある。

溶液中のある種の光化学反応で磁界効果が見

いだされており¹⁰⁾、その機構がほぼ明らかにされている。溶液中の化合物が光刺激によって励起され、ラジカル対を溶媒かご内に形成するが、このラジカル対を中間体として光化学反応が進行する過程で一重項ラジカル対と三重項ラジカル対がある確率で生成される。一重項ラジカル対は溶媒かご内で成分ラジカル同士が反応して、かご生成物を与える。三重項ラジカル対では成分ラジカルはばらばらになって溶媒かごから拡散し散逸生成物を与える。ここで、一重項ラジカル対 (S) と三重項ラジカル対 (T) の間で S-T 変換が存在する場合、この S-T 変換の速度が磁界によって変化を受ければ、かご生成物と散逸生成物の収率が磁界によって変化を受けることになる。これが光化学反応の磁界効果の基本的機構である。

Grissom らは光化学反応系における磁界効果の機構を生化学反応系に応用し、ethanolamine ammonia lyase の酵素反応系において、ラジカルペアが生成され 0.25 T の磁場下で酵素反応速度定数に変化が見られたと報告した²⁵⁾。最近、ペルオキシダーゼの酵素活性がラジカルペア機構により変化を受けると報告された²⁶⁾ が、最大 14 T までペルオキシダーゼと合成基質の酵素反応速度がまったく影響を受けないとの報告例²⁷⁾ もあり、磁界影響の再現性は低いと見られる。

酵素反応レベルでの磁界効果の機構解明が詳細になされれば、生体内化学反応システムの変化から生物個体への磁界効果まで、首尾一貫した説明が可能となるため、その解明には期待が持たれる。さらに、生体に磁界とレーザー、または磁界と放射線などを与えると、がん治療の新しい可能性なども期待できると思われる。

3・2・6 勾配磁界による生体物質の濃度変化

勾配磁界では、特に水中の溶質が磁気力を受けて溶質濃度の再分布が起こることが考えられる。先に述べた赤血球の牽引効果などに見られるように、常磁性物質に対する磁気力が大きいことが期待されるため、常磁性の溶存酸素に対

する勾配磁界効果が Ueno らによって報告されている²⁸⁾。

水は生体内における最も重要な物質の一つと考えられ、またその磁気的な性質が反磁性であることなどは知られている。水の反磁性により強い磁界から弱い磁界の方向へ水が並進力を受けることで、水の水面が分割されて容器の底が大気にさらされる現象（モーゼ効果）が Ueno らによって報告された²⁹⁾。

水中の溶質が分子量数十万以上の巨大分子であれば、その巨大分子の体積磁化率とその周囲の水の体積磁化率の差により、勾配磁界下で正味の磁気力が巨大分子に作用し濃度変化が観測される。この現象は磁気泳動効果とよばれている³⁰⁾。

3・2・7 気相を介しての直流磁界の間接的効果

Ueno らにより気相中の燃焼反応やガスの流れが 1 - 2 T, 50 T/m の磁界で顕著な影響を受けることが報告された³¹⁾。たとえば、磁極の上方より磁極間空隙に向かって炭酸ガスや酸素ガスなどを流せば、勾配磁界によりガス流は阻止されはね返されてしまう。最近、Ichioka らにより 8 T 磁界下での実験動物の体温が顕著に減少し、微小循環系が影響を受けることが報告された³²⁾。また Nakagawa らにより、容器内の水の蒸発速度が 8 T 磁界により増加することが報告された³³⁾。勾配磁界により気相のガス流の動態に変化が生じ、水分蒸発や動物の皮膚の状態が変化したと解釈できる。これらの研究報告は、生体への磁界効果を検討する際に、直流磁界の気相を介しての間接的効果が無視できないことを示唆しており重要である。

3・2・8 走磁性細菌

地磁気を感じて北や南に向かって泳ぐ細菌が発見された³⁴⁾。体内から生物が作る磁性粒子が抽出され、それが生物が体内で作ったマグネタイト (Fe_3O_4) の単結晶の列であることが明らかにされた。このような生物磁石はその後、ミツバチやハト、さらにはサケやマグ

ロ³⁵⁾、ヒトの脳³⁶⁾からも抽出されるに至った。

また最近、磁性細菌の培養技術が確立され、磁性粒子をつくる遺伝子の解明がなされるとともに、バイオテクノロジーへの応用が検討されている³⁷⁾。

4. ELF 電磁界の生体影響に関する最近の話題

ELF 電磁界とは、商用周波数である 50/60 Hz を含む 30 Hz から 300 Hz の周波数帯の電磁界とされている。磁束密度としては、マイクロテスラからミリテスラの範囲であると考えられる。ELF 電磁界のエネルギーは、たとえば 60 Hz の場合に熱エネルギーの約 10^{-11} 倍、化学結合を切断するのに必要なエネルギーの約 10^{-14} 倍であり非常に小さい。したがって、ELF 電磁界は DNA や蛋白質の化学結合を破壊せず、ELF 電磁界がそれ自身のエネルギーを用いて細胞の死や遺伝子突然変異を直接的に誘発することはない。また、ELF 電磁界が熱エネルギー的に生体に作用すること、すなわち、thermal effect はないと考えられる。

1960~70年代に商用周波数電磁界のヒトの健康への影響の可能性が、旧ソ連や合衆国において報告されて後、動物実験や細胞レベルおよび疫学調査が進められてきた。ELF 電磁界の生体影響に関する実験報告の多くについては、現在も各国において再現性確認実験が進行中であり、現時点で明確な結論は出されていないといえる。

米国では 1992-1998 年に米国政府が約 60 億円を投入して取り組まれている大規模な研究計画（電界と磁界に関する研究および情報公開計画：通称 RAPID 計画）において、これまでに報告された電磁界生体影響の再現性確認を主眼とした活動がなされてきた。また、1996年10月に米国科学アカデミー（National Academy of Sciences : NAS）が過去17年間の電磁界影響関連文献の評価結果について、「居住環境レベルの電磁界が人体の健康に障害を与えることを示

す証拠はない」と公表した。

わが国では通商産業省資源エネルギー庁、環境庁等の各官庁をはじめとし、電気学会などでも調査活動が継続中である。

近年、合衆国を中心として開かれている BEMS (Bioelectromagnetics Society) 会議では、電磁界の生体影響に関する最新の研究が報告されている。ここ 3-4 年の BEMS 会議の特徴として、携帯電話関連の電磁界影響・計測の演題が増えていることが挙げられる。これまで、携帯電話が発生する電磁波によるヒトの頭内の specific absorption rate (SAR) を算出した報告や、実際に携帯電話や高周波発生源を用いた動物および細胞実験の報告などもあり、携帯電話関連の電磁界（電磁波）問題に関する世界的・社会的関心の高まりが感じられる。また、商用周波数の ELF 電磁界生体影響問題と携帯電話の高周波電磁波問題がそれぞれ区別して取り組まれるべき課題であり、公衆にもこの点をご理解いただく必要があると思われる。

ELF 電磁界生体影響の研究は、①細胞を用いた生体外 (*in vitro*) での研究、②実験動物を用いた生体内 (*in vivo*) での研究、③分子レベルでの機構モデリング、④疫学研究、⑤電磁界曝露量評価とリスクアセスメント、等に大きく分類できる。ここでは、①～③について簡単にふれてみたい。

4.1 細胞レベルでの研究

最新の分子生物学的手法を用いることで、細胞内での生化学物質の機能に対して磁界が影響を及ぼしうるかについて実験が行われているが、まだ周知の事実とされる現象が認められていない。

細胞に対して化学物質や機械的ストレスなどの刺激が加えられた場合、その刺激を感受するのは主に細胞膜や細胞膜内に存在するイオンチャネルなどの物質であると考えられる。細胞膜を通して細胞外部の情報が細胞内に伝えられることで、細胞が各情報に対応して増殖、分化

したり遺伝子を発現させたりしている。このような信号伝達経路のどこかに磁界が作用して発がん等を誘導するのではとの疑問により多くの研究がこれまでに展開されている。

4.1.1 カルシウムイオン

最も多く研究がなされている細胞内情報伝達物質はカルシウムイオンである。カルシウムイオンは細胞のさまざまな機能の調整に関係しているため、細胞膜を通してのカルシウムイオンの流れに着目した実験が多くなされている。たとえば、Liburdy らはラット胸腺由来リンパ球を Con-A という物質で刺激しつつ 60 Hz, 22 mT の変動磁界で刺激することで細胞内カルシウムイオン濃度が変動すると報告した³⁸⁾。

4.1.2 ODC および PKC

がん細胞に関連して細胞内に存在する酵素オルニチンデカルボキシラーゼ (ODC) やプロテインキナーゼ C (PKC) への磁界効果を調べた研究例も多い。発がんプロモータで誘導される ODC の活性が 60 Hz 電磁界曝露によって一時的に増加するとの報告があり³⁹⁾、またヒト白血病細胞の PKC 活性が 0.1 mT, 60 Hz の電磁界曝露によって増加するとの報告もある⁴⁰⁾ が、再現性が得られていない。

4.1.3 遺伝子レベルでの影響

細胞内では遺伝子の発現、転写が行われているが、ELF 電磁界が遺伝子の発現や転写に影響を及ぼした場合、細胞のがん化が促進されることが考えられるため、がん化遺伝子あるいはがん化抑制遺伝子を指標とした研究が行われている。細胞内の DNA の遺伝情報が RNA を経由して蛋白質というかたちで生成される過程、すなわち遺伝子発現が電磁界の影響を受けるか否かについては、1991年頃より Goodman らが遺伝子発現に対する電磁界影響を調べ、変動磁界により細胞培養液に誘導される電界が比較的低い場合 (1 mV/m 以下) でも、がん遺伝子 (c-myc) や熱ショック蛋白質 (熱ストレスにより誘導される蛋白質) が増えると報告した⁴¹⁾。しかし、これまでに行われた再現性確認

実験では、遺伝子発現への日常生活環境レベルの電磁界影響は見られていない⁴²⁾。一方、強い電磁界で行われた実験では影響が出たとの報告例も多い。Miyakoshi らは、日常生活環境レベルをはるかに上回る 400mT, 60Hz の電磁界が突然変異誘発頻度を増加させる結果を報告している⁴³⁾。

4.2 実験動物を用いた研究

マウスやラットを用いた生体内 (*in vivo*) における電磁界影響評価実験では、発がんを促進する因子の一つとしての電磁界の可能性を検討した研究が多い。環境電磁界のエネルギーは他の発がん性因子（放射線や化学物質）が持つ物理化学的エネルギーに比較して小さい。したがって、環境電磁界が単独でがんを誘発することはないと考えられるため、他の発がん性因子と電磁界の相乗効果を調べる実験が多くなされている。これまでのところ、環境電磁界ががん誘発を促進するという証拠は示されていない。Yasui らは白血病になりやすいラットを用いて最大 5mT, 60mT の電磁界影響を調べたが、電磁界の発がん性は見られなかったと報告した⁴⁴⁾。

最近には特に、電磁界の生体影響に関連する脳内物質としてメラトニンが注目されている。動物の頭部の松果体からのメラトニン分泌が抑制された場合、腫瘍細胞の成長が促進されるといわれている。また、メラトニンは、がん細胞増殖抑制作用があるともいわれている。Kato らはラットの血中メラトニン濃度を調べた結果、回転磁界が夜間のメラトニン分泌を抑制するが、直線磁界はメラトニン濃度に影響を及ぼさないことを見いだした⁴⁵⁾。

4.3 分子レベルでの ELF 電磁界影響の機構モデリング

直流磁界と変動磁界の存在下で荷電粒子がサイクロトロン共鳴を起こすため、Liboff は早くから生体磁界影響の仮説として取り上げ⁴⁶⁾、

最近では Lednev⁴⁷⁾ や Blackman ら⁴⁸⁾ が関連したさまざまな理論や実験を公表したが、実験は他研究者による再現性がない。また、米国の RAPID の経過報告（1997年 3 月）においても、サイクロトロン共鳴説は物理学的に支持できないとの評価が与えられている。

ELF に限らず磁界の生体影響の機構として、化学的な説明が可能な機構は 3・2・5 に述べたラジカルペア機構による酵素反応変化である。しかし、ラジカルペア機構による磁界影響は数十 10 mT 以上の磁束密度で観測される現象であり、環境電磁界影響の主要因となる可能性は低い。

また、3・2・8 で述べた生体内のマグネタイトに関する ELF 電磁界影響の機構も提唱されている。Kirshvink ら³⁶⁾ は細胞膜には強磁性マグネタイトが存在し、ELF 電磁界により振動するためイオンチャネルの開閉および細胞機能に影響を与えるというモデルを示した。

以上のような仮説が多く提唱されているにもかかわらず、生体への ELF 電磁界影響の事実そのものが未解明であるため、物理化学的根拠と生物影響の因果関係が ELF 電磁界影響研究で明確に認められない。

5. む す び

変動磁界の人体影響については、パルス磁界による神経刺激など医療応用の可能性が明確に示されている一方、環境レベルの比較的弱い変動磁界の生物影響全般において不明確な部分が未だに多い。直流磁界の人体影響については、MRI で用いられる数 T の強磁界においても人体に対する顕著な健康影響はないように見られる。10 T オーダの直流磁界では生体物質レベルで明らかな磁界効果が多く観測されるようになってきているが、生体が正常機能を保つことの不可能な直流磁界というものが数十 T オーダなのか 100 T オーダなのかについて、現在のわれわれは実験することが困難である。

われわれの日常生活環境の磁界レベルを適度

に管理しつつ生物と磁界の未知の部分を科学的に解明していけば、磁界の有効性を幅広く活用できると思われる。

文 献

- 1) Ueno, S. and Iwasaka, M.: Magnetic Nerve Stimulation and Effects of Magnetic Fields on Biological, Physical and Chemical Processes, in "Biological Effects of Magnetic and Electromagnetic Fields", Ueno, S., Ed. pp. 1-21, Plenum Press, New York (1996)
- 2) 上野照剛：生体磁気, 日本応用磁気学会誌, **19**, (3), 677-683 (1995)
- 3) Barker, A. T., Jalionus, R. and Freeston, I. L.: Noninvasive magnetic stimulation of the human motor cortex, *Lancet* **I**, 1106-1107 (1985)
- 4) Ueno, S., Tashiro, T. and Harada, K.: Localized stimulation of neural tissues in the brain by means of a paired configuration of time-varying magnetic fields, *J. Appl. Phys.*, **64**, 5862-5864 (1988)
- 5) Ueno, S., Matsuda, T. and Fujiki, M.: Functional mapping of the human motor cortex obtained by focal and vectorial magnetic stimulation of the brain, *IEEE Trans. Magn.*, **26**, 1539-1544 (1990)
- 6) Bourland, J. D., Mouchawar, G. A., Nyenhuis, J. A., Foster, K. S., Jones, J. T. and Graber, G. P.: Transchest magnetic (eddy-current) stimulation of the dog heart, *Med. Biol. Eng. Comput.*, **28**, 196-197 (1990)
- 7) 上野照剛：磁気刺激, 医用電子と生体工学, **30**, 136 (1992)
- 8) Matsuki, H., Yanada, T., Watanabe, T., Murakami, K. and Kikuchi, S.: *IEEE Trans. Magn.*, **25**, 3815-3817 (1989)
- 9) Schenck, J. F.: Health and Physiological Effects of Human Exposure to Whole-Body Four-Tesla Magnetic Fields during MRI, in "Biological Effects and Safety Aspects of Nuclear Magnetic Resonance Imaging and Spectroscopy", Edited by Magin, R. L., Liburdy, R. P. and Persson, B., *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, **649**, 285-301 (1992)
- 10) Nagakura, S. and Molin, Y. (Guest Editors): Magnetic field effects upon photophysical and photochemical phenomena, *Chemical Physics, special issue*, **162**, 1 (1992)
- 11) Torbet, J., Fryssinet, M. and Hudry-Clergeon, G.: *Nature*, **289**, 91-93 (1981)
- 12) Okazaki, M., Maeda, N. and Shiga, T.: *Eur. Biophys. J.*, **14**, 139-145 (1987)
- 13) Melville, D., Paul, F. and Roath, S.: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-11**, 1701-1703 (1975)
- 14) Higashi, T., Yamagishi, A., Takeuchi, T. and Date, M.: Effects of static magnetic fields on erythrocyte rheology, *Bioelectrochem. Bioenerg.*, **36**, 101-108 (1995)
- 15) Iino, M.: Effects of a homogeneous magnetic field on erythrocyte sedimentation and aggregation, *Bioelectromagnetics*, **18**, 215-222 (1997)
- 16) Okuno, K., Tsuchiya, K., Ano, T., Shoda, M. and Okuda, M.: A new cultivation system operated under a super high magnetic field, *J. Ferment. Bioeng.*, **77**, 453-456 (1994)
- 17) Ueno, S., Iwasaka, M. and Shiokawa, K.: Early embryonic development of frogs under intense magnetic fields up to 8 T, *J. Appl. Phys.*, **75**, (10), 7165-7167 (1994)
- 18) 中川, 松田：強磁場内におけるラットの行動解析, 交通医学, **38**, (6), 373-381 (1984)
- 19) 吉川, 岩坂, 上野：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, **19**, (2), 597-600 (1995)
- 20) Koana, T., Ikehata, M. and Nakagawa, M.: Estimation of genetic effects of a static magnetic field by a somatic cell test using mutagen-sensitive mutants of drosophila melanogaster, *Bioelectromag. Bioenerg.*, **36**, 95-100 (1995)
- 21) Haberditzl, W.: Enzyme activity in high magnetic fields, *Nature*, **213**, 72-73 (1967)
- 22) Ueno, S. and Harada, K.: Experimental difficulties in observing the effects of magnetic fields on biological and chemical processes, *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-22**, (5), 868-873 (1986)
- 23) Ueno, S. and Iwasaka, M.: Catalytic activity of catalase under strong magnetic fields of up to 8 T, *J. Appl. Phys.*, **79**, (8), 4705-4707 (1996)
- 24) 山田, 橋口, 細野, 山本, 別所, 上野, 谷本：低周波交流磁界による生体内化学反応への影響, 電気学会論文誌 C, **116**, (2), 187 (1996)
- 25) Harkins, T. T. and Grissom, C. B.: *Science*,

- 263, 958 (1994)
- 26) Taraban, M. B., Leshina, T. V., Anderson, M. A. and Grissom, C. B.: Magnetic field dependence of electron transfer and the role of electron spin in heme enzymes: Horseradish peroxidase, *J. Am. Chem. Soc.*, **119**, 5768-5769 (1997)
- 27) 岩坂, 上野: 強磁場中の酵素反応について—SOD, Peroxidase 等を中心に—, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-96-132, 103 (1996)
- 28) Ueno, S., Iwasaka, M. and Kitajima, T.: Redistribution of dissolved oxygen concentration under magnetic fields up to 8 T, *J. Appl. Phys.*, **75**, (10), 7174-7176 (1994)
- 29) Ueno, S. and Iwasaka, M.: Properties of diamagnetic fluid in high gradient magnetic fields, *ibid.*, **75**, (10), 7177-7179 (1994)
- 30) Iwasaka, M. and Ueno, S.: Optical measurements of magnetophoresis of macromolecules, *IEEE Trans. Magn.*, in press (1998)
- 31) Ueno, S. and Harada, K.: Effects of magnetic fields on flames and gas flow, *ibid.*, **MAG-23**, (5), 2752-2754 (1987)
- 32) Ichioka, S., Iwasaka, M., Shibata, M., Harii, K., Kamiya, A. and Ueno, S.: Biological effects of static magnetic fields on the micro-circulatory blood flow *in vivo*: A preliminary report, *Med. Biol. Eng. Comput.*, **36**, 91-95 (1998)
- 33) 中川, 廣田, 北澤, 正田: 酸素ガスに対する磁場効果 II (酸素中における水の蒸気への磁場効果), 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-96-132, 9 (1996)
- 34) Blakemore: *Science*, **190**, 377 (1975)
- 35) 青山, 谷野, 楠, 小倉: 鮭の卵に存在する磁性物質の分析, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-93-84 (1993)
- 36) Kirschvink, J. L. and Kirschvink, A. K.: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **89**, (16), 7683-7687 (1992)
- 37) 中村, 柳生, 早出, 松永: 磁性細菌粒子の応用と遺伝子操作, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-93-83 (1993)
- 38) Liburdy, R. P., Callahan, D. E., Harland, J., Dunham, E. and Sloma, T. R.: Experimental evidence for 60 Hz magnetic fields operating through the signal transition cascade—Effects on calcium influx and c-MYC mRNA induction—*FEBS Lett.*, **334**, 301-308 (1993)
- 39) Byus, C., Pieper, S. E. and Adey, W. R.: The effect of low-energy 60 Hz environmental electromagnetic fields upon the growth-related enzyme ornithine decarboxylase, *Carcinogenesis*, **10**, 1385-1389 (1987)
- 40) Uckun, F. M., Kurosaki, T., Jin, J., Jun, X., Morgan, A. and Takata, M.: Exposure of B-lineage lymphoid cells to low energy electromagnetic fields stimulates lyn kinase, *J. Biol. Chem.*, **270**, 27666-27670 (1995)
- 41) Goodman, R. and Shirley-Henderson, A.: Transcription and translation in cells exposed to extremely low frequency electromagnetic fields, *Bioelectrochem.*, *Bioenergetics*, **25**, 335-355 (1991)
- 42) Saffer, J. D. and Thurston, S. J.: Short exposures to 60 Hz magnetic fields do not alter MYC expression in HL60 or daudi cells, *Radiat. Res.*, **144**, 18-25 (1995)
- 43) Miyakoshi, J., Yamagishi, N., Ohtsu, S., Mohri, K. and Takebe, H.: Increase in hypoxanthine-guanine phosphoribosyl transferase gene mutation by exposure to high-density 50 Hz magnetic fields, *Mutat. Res.*, **349**, 109-114 (1996)
- 44) Yasui, M., Kikuchi, T., Ogawa, M., Otaka, Y., Tsuchitani, M. and Iwata, H.: Carcinogenicity test of 50 Hz sinusoidal magnetic fields in rats, *Bioelectromagnetics*, **18**, (1997)
- 45) Kato, M., Honma, K., Shigemitsu, T. and Shiga, Y.: Effects of exposure to circularly polarized 50 Hz magnetic field on plasma and pineal melatonin levels in rats, *ibid.*, **14**, 97-106 (1993)
- 46) Liboff, A. R. and Mcleod, B. R.: Kinetics of channelized membrane ions in magnetic fields, *ibid.*, **9**, 39-51 (1988)
- 47) Lednev, V. V.: Possible mechanism for influence of weak magnetic fields on biological systems, *ibid.*, **12**, 71-75 (1991)
- 48) Blackman, C. F., Blanchard, J. P., Benane, S. G. and House, D. E.: The ion parametric resonance model predicts magnetic field parameters that affect nerve cells, *FASEB J.*, **9**, 547-551 (1995)