☆

磁場に対する生体の反応およびその安全性

(鉄道労働科学研究所) 中 川 正 祥

核融合装置や加速装置は強磁場を用いた特殊な実験設備であるが、近年では核磁気共鳴診断装置(MRI)の普及によって一般人も強磁場に入る機会が出てきた。本稿では、これまでなされた実験結果の一部を紹介し、磁場に対する生体の反応の仕方およびその強さを示す。また、生体の反応の検出限界値を求めることによって、磁場の安全基準が得られる見込みであること、および現時点での磁場の安全性についての考え方を述べる。

☆

☆

I. はじめに

「磁気と生体」の関係についての近代的な研究は、1950年代の宇宙開発との関連で始まった。宇宙の磁場、宇宙船内の磁場の問題と関係しているといわれるが詳細ははっきりしない。1970年代以降の関心は、主に環境因子としての衛生学あるいは生態学的な面と、医療応用への面とに分かれることとなり、今日では発表内容からみると後者への関心が高まっているようである。

環境因子としては、核融合装置、電力貯蔵用の超電導マグネット、磁気浮上式鉄道などがあり、医療応用としては、核磁気共鳴診断装置(MRI)の開発・応用の進展が最たるものであろう。これらの大型装置の普及で、一般の人々も強い磁場へ近づく機会が増してきている。

磁場には、超電導磁石等の定常磁場と変動磁場とがある。変動磁場では、誘導電流による生体組織あるいは体液中の電解質やミトコンドリア、酵素等の生体組成への影響が考えられる。また、パルス状の鋭く変化する磁場では、誘導電流はいっそう大きくなり、磁場の直接的作用とはいいいくくなる。

このため、通常は磁場の作用としては、定常磁場あるいは100 Hz程度までのELF(extremely low frequency, 極低周波)磁場までを扱い、中心はその基礎となる定常磁場である。

磁場の中で人がはっきり感知しうる現象は、19世紀の終りに見出されたもので磁気閃光(magnetophosphenes)として知られている⁽¹⁾。これは、交流磁場の中に頭を入れたときに眼前に光を感じるもので、15~30 Hz付近で最も感じ、磁場の強さは最低0.01 Tほどである。メカニズムとしては、網膜の視細胞における活動電位の発火(視神経膜の静止電位が破れ、膜外のNa⁺

の流入と同時に神経の興奮が起こり神経を伝わり始めること)に直接関わっているとみられる。

もう1つ、磁場と生体との関係を強く示唆する事項は、1970年代半ばからバクテリア⁽²⁾、ミツバチ⁽³⁾、ハト⁽⁴⁾等の体内から次々にマグネタイト(Fe_3O_4)が発見されたことが挙げられる。これらの生物にとっては、地磁気を感じとれることが通常の生活上きわめて有用である。しかし、哺乳類のような高等動物では、たとえ体内からマグネタイトが見出されたとしても、それは進化上の痕跡器官*として残っているだけかもしれない。高等動物にとっては、磁気を感じとることは生命維持上さほど役には立たず、今日では地磁気を感じとることはできないのであろう。

現在知られている生物学上の知見では、磁場が直接に高等動物に影響を及ぼすとみることのできる根拠は得られていない。したがって、ここではどの程度の強さの定常磁場へどのくらいの時間曝露すれば、動物はどのような反応を示したかという結果を示すのみとなる。また、どの強さと曝露期間とで反応が見られないかという結果は、短期間の曝露における一応の安全性の目安となるであろう。

II. これまでの実験結果から

1. ウサギの長期曝露例

ウサギのケージが入る大きさの永久磁石回路320(幅)×600(高)×450(奥行)mmの中でウサギを長期間

Reactions of Organism to Magnetic Fields and Safety of Magnetic Fields: Masayoshi NAKAGAWA.

(1985年12月23日受理)

* 機能をもつまでに発達することなく、単に痕跡的に生ずる器官。例えば、ヒトの耳殻の筋肉は耳を動かす能力を有するまで発達せず、形だけ残っている。

飼育し、磁場による血液(清)成分の変化を調べた。磁場の強さは中心部で0.06 Tある。曝露期間は5週間連続である。曝露前の前値として2週、曝露5週は週1回ずつ、曝露が終って2週後と5週後に1回ずつ、合わせて9回採血し、期間として12週間観察・測定した。変化が見られたのは、血清総コレステロール、尿酸窒素、クレアチニンであった⁽⁵⁾。

本章ではコレステロールの変化について紹介する。第1図は、曝露期間5週間を含めた前後12週間の、曝露群と対照群(磁場をかけない群)それぞれ9匹ずつの血清総コレステロールの平均値の変化を示している。この例では幾分バラツキが大きく有意の差は得られなかったが、著者らの以前の例⁽⁶⁾やPautrizelら⁽⁷⁾によっても、5週間の弱い磁場への曝露で、血清総コレステロールの減少が認められた。

曝露群(●), 対照群(○), 曝露週の前々12週間の変化を示す。

第1図 磁場曝露によるウサギの血清総コレステロールの変化($n=9$)

第2図に Pautrizel らの例を示す。体重3 kgの12匹のウサギに1%のコレステロールを加えた高コレステロール食(1日約1gのコレステロール摂取)を摂らせて、6g/l(通常の15倍)の高コレステロール血症とした。ついで、半数を0.06 Tへ1日3時間の曝露を5週間繰り返した。残りは通常環境で飼育し、双方とも高コレステロール食の投与を続けた。

結果は図のように、磁場群(▲)では高コレステロール食の投与にもかかわらず4週と5週に血清総コレステロールが低下している。さらに曝露を止めた後の6~8週(曝露後1~3週)にもコレステロールの低下が続いている。一方、対照群(□)では血清コレステロー

破線は対照群、実線は磁場群の平均値を結んだもの。細かいマークは各群6匹ずつの測定値をそのままプロットしてある。(Pautrizel⁽⁷⁾による)

第2図 高コレステロール食を与えて磁場に曝露したウサギの血清コレステロールの変化

ルはほとんど上昇していった。

コレステロールには、高比重リポ蛋白と結合したHDL-コレステロールと、低比重リポ蛋白と結合したLDL-コレステロールがあり、前者は心筋梗塞や脳血管障害を防ぐ身体のためによいコレステロールとされている。第3図は、第1図の総コレステロールに対するHDL-コレステロールの占める割合の変化を示したものである。コレステロールの低下とともに、HDL-コレステロールの比率が著明に増加しているが、これはコレステロールの中でも悪役のLDL-コレステロールが主として低下したことを表わしている。

○は対照群, +は前値に対する有意差(+: $p < 0.05$)
*は対照群に対する有意差
(*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$)

第3図 磁場曝露による総コレステロールに対するHDL-コレステロールの比の変化($n=9$)

コレステロールのような液晶構造物は、磁場の中で反磁性のより強い結晶面を、磁場に直交させようとする(反磁性配向*)。メカニズムとしては、この反磁性配向との係わりが考えられるが、0.06 Tの磁場が実際に生体内の反磁性物質にどのような影響を及ぼしているかまではわかっていない。

0.06 Tへ5週間連続して曝露されるということは通常はないが(現実にあったとして、正常のコレステロール値が低下するのは異常な悪影響)、一方, Pautrizelの例のように1日に3時間程度なら現実に可能であり、異常な高コレステロール血症を低下させる作用は興味深いものがあるといえよう。

2. 強磁場への短時間曝露した例

(1) マウスの体重の変化

第4図は、1日に16時間、0.6 Tの磁場へ入れ、4日間繰り返したマウスの体重の変化⁽⁹⁾を示す。ほかに、4℃の寒冷に曝露した例も示している。寒冷環境では、産熱(体温低下を防ぐために解糖代謝を高める)のためにカロリーが使われて体重が増加せず、一方磁場では急激な一時的な低下の後、反跳的に増加した。

これは、磁場の中でマウスが急激な作用を受けたように見える。Barnothy ら⁽¹⁰⁾も同様の变化を報告しており、これを磁場の shock effect と呼んだ。Barnothy らは0.94 Tに4日間連続して曝露させたため、抑制効果も強く出ている。第5図にその様子を示す。

対照群(○), 磁場群(●), 寒冷群(▲)
磁場は0.6 T, 寒冷は4℃にそれぞれ1日16時間曝露し、4日間繰り返した。

第4図 3つの条件によるマウスの体重の変化($n=20$)

2日目に急激な低下があり、直ちに元に復している。
I, IIは試験グループの別。(Barnothy ら⁽¹²⁾による)

第5図 0.94 Tへ4日間連続曝露されたマウスの体重の変化

さらに曝露後2週間の観察では、寒冷群では曝露を止めると反跳的に対照群より体重が増し、一方磁場群では曝露の翌週から体重増加の抑制が起こって2週間後も対照群のレベルまで達しなかった。第2図の例やその他の例からみても、効果が少し長く残るのが磁場の作用の特徴であるように思われる。

* この配向率(β)は、 $\beta = N(\chi_1 - \chi_2)H^2/kT$ で表わされる⁽⁹⁾(N : 分子数, χ_1 : 回転対称軸に対し磁場に平行な磁化率, χ_2 : 垂直な磁化率, k : ボルツマン定数, T : 絶対温度)。

ベンゼンの例では1分子当たり常温、1 Tの磁場で 10^{-7} 程度。したがって 10^7 個の分子が繋がれば、配向により向きを変えることになる。

(2) ラットの学習(条件回避反射)に及ぼす効果

ラットを0.6Tに1日に16時間曝露し、4日間繰り返して条件回避反射の変化をみた⁽¹¹⁾。スケジュールはSidman型で、ラットはスキナー箱のレバーを自由に押すことによって、次の電撃の発生を一定時間(ここでは25s)遅らせることができる。したがって、25s以内にレバーを放して再び押すという動作を続けていけば、箱の底のグリッドにかかる電撃を受けないですむ。この試験は1日に1時間だけ課し、訓練に2~3週、観察記録を4週間とした。

このような簡単なスケジュールでも覚えらるラットは少なく、20例を得るのに224匹をテストした。第6図は、磁場曝露群10例、対照群10例のレバー押し回数の1時間のうち後半30分の値の変化を示している。レバー押し回数は対照群では徐々に増していくが、曝

第2週に4日間だけ、1日0.6Tの磁場へ16時間曝露させた。

第6図 シドマン型電撃回避反射におけるレバー押し回数の変化

磁場へ入れたラットは曝露週と続く2週に電撃を多く受けている。(* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, 対照群との有意差)

第7図 シドマン型電撃回避反射における被電撃回数の変化

露群では少しずつ減少した。しかし、曝露後2週では有意差が出るほどではなかった。

一方、被電撃回数は第7図に示すように、曝露週に増え再び減ってくるが、曝露の後2週間(あるいはもう少し後まで残る。別のスケジュール例で確認)たっても被電撃回数は対照群より増したままであった。

Ⅲ. 磁場の安全性

1. 「安全基準値」案

「安全性」の概念についての詳細は文献^(12,13)を参照されたい。

磁場が生体に何らかの作用を及ぼし得るのかどうか、という点についても現在、まだ2論に分かれているように見える。実験結果は作用があるとするものと、ないとするものの2つに分かれている。

著者らの見解を述べると、強い磁場に比較的長時間曝露し、長期間連続して観察を続ければその効果を見出すことができると考える。一方、①短時間の曝露、あるいは②曝露した直後か、さらに③2~5日後(曝露の強さ：磁場の強さと曝露時間の双方の組合せによって異なる)に生物が刺激に適応*して見かけ上反応がないように見える時、の3つの条件のいずれかの場合は変化を見出し難い。

第7図の例をとれば、曝露直後の7日と、4日後の11日とに検出を試みる場合は、ネガティブ(所見なし)となるだろう。曝露直後と4日後に調べて作用を見出さなかったとしている報告は、最近にも現にある⁽¹⁴⁾。

著者らの急性曝露の実験からいえば、0.6Tへ1日に16時間曝露ではラットへの抑制的な効果を見出した。条件回避反射は検出力の高いテストであるが、強さと曝露時間を下げていけば、0.3Tの1日に4時間曝露程度で作用を検出できなくなるものと見込まれる。急性曝露ではこの何分の1かが安全基準値と考えられる。

第1表に、これまでに勧告された「安全基準値」案の主なものを挙げる。Aは磁場に入った経験のある者への簡単なヒアリングによって参考値を見出したものであり、Bはやや広範囲の実施調査による限界値として得られた。しかし、B案も報告に挙げられた磁場によるとされる様々な症状が、果して磁場のみによって引

* 適応(adaptation): 生体は外界の刺激に対して、自己の内部環境を常に一定に保とうとする(homeostasis)。一度受けた変化をもう一度元に戻そうとする過程および一連の全過程(広義)を H. Selye は適応と呼んだ。

第1表 これまで勧告された主な「安全基準値」案

A. Beischer によるもの(1962)⁽¹⁵⁾

年に3日以内	5,000 G
15分以内	20,000 G

B. Vyalov によるもの(1967)⁽¹⁶⁾

	磁場(Oe)	勾配(Oe/cm)
全身	300	5~20
手	700	10~20

C. SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) によるもの(1971)⁽¹⁷⁾

	長時間(時間レベル) (G)	短時間(分レベル) (G)
全身または頭	200	2,000
腕と手	2,000	20,000

D. 米国 DOE の暫定案(1979)⁽¹⁸⁾

	1日8時間 (T)	1時間以内 (T)	10分以内 (T)
全身	0.01	0.1	0.5
四肢	0.1	1	2

* 1 Oe = 1 G = 10⁻⁴ T

き起こされたものであるかどうかは定かではないと見られている。C, Dの2案については、残念ながらほとんど根拠がない。半分は、政策的な競争意識から作られたもののようである。いずれも正式な提案とは見なし難く、あくまで参考程度と考えられているというのが現状であろう。

2. 具体例のいくつか

米国 DOE の暫定案は、これまでの提案値の中では最も厳しい制限を加えたもののように見える。事実、0.01 T (100 G) 以上の磁場内で1日作業ができないことになっては仕事にならないという声を聞いたことがある。

磁場の強い方であれば、これまでは加速装置の検出部にある泡箱近傍の1 T くらいがかなり強い方だった。ところが近年の MRI では、超電導磁石を使うことになって、最高値として2 T の出力があり、しかも診断の方法によっては10分以内では済まなくなってきた。

そこで、英国放射線防護委員会(1980年)では、定常磁場は2.5 T 以下、最大変化率20 T/s 以下、高周波については被験者の平均体温上昇が1℃以下とした。また、米国食品医薬品局(FDA, 1982年)は、定常磁場は2 T 以下、時間変動は3 T/s 以下、高周波では全身平均0.4 W/kg、局所的には2 W というガイドラインを

出した。

診療を受ける人々にとっては、X線写真の放射線を浴びるよりははるかによい。また、2 T の強磁場へ30分くらい入ったところで、現在の生物学のレベルでは、その変化を捉えることはできないだろう。

次に、実験的な証明が困難な超長期的な曝露について触れる。近年の電場・磁場の影響に関する疫学的な調査報告で問題となっているテーマは、自殺に関するもの^{(19)~(21)}、発癌性に関するもの^{(22)~(25)}および白血病に関するもの^{(26)~(28)}である。自殺や発癌性に関する議論は、主として高圧送電線下の交流磁場(磁場としては小さい)について進められている。ここでは、明らかに定常磁場が関係しているアルミニウム電解工業などにおける白血病による死亡率の増加に関する調査について述べる。

Milham⁽²⁷⁾はワシントン州の1950~79年の職業別・死因別の統計438,000例を調査して、電場あるいは磁場の中で働く人達(白人男性)は白血病による死亡率が一般より高いことを見出した。電気関係の職種11種のうち10種までがこの傾向にあった。ことに有意な増加を示したのは、電気技師、テレビとラジオの修理工、水力発電所の従業員、アルミニウム工場の作業員であった。

アルミニウム電解工場では、全白血病による死亡者20例(一般の期待数10.6に対し1.89倍)、急性白血病による死亡者11例(一般の4.3に対し2.58倍)がいずれも危険率0.01で有意であった。また、11種の職種の合計でも全白血病による死亡136例(一般の99.2に対し1.37倍)、急性白血病60例(一般の36.7に対し1.63倍)のいずれも危険率0.01で有意ということである。

このすぐ後にWright⁽²⁸⁾もロスアンゼルス郡の電場と磁場で働く白人男性の1972~79年の死因別解析を行なって、ほぼ同様の結果を得ている。しかし、例数が少ないことと、これらの職場がほかにも多くの化学物質にさらされる機会があることから、この仮説の詳細な追究が望まれるとしている。

こういった疫学調査による実態の確認はかなり難しい。それと同時に、死因統計の原データの信頼性は高いものである。磁場の生体作用のメカニズムがはっきりしない現在では、このような調査結果を一概に否定してしまうのは早計というものであろう。今後も続けられる調査研究をまって慎重に対処することによって、誤りのない結論が導かれるものと考えられる。

—参考文献—

- (1) D'RSOVAL, A.: C.R. Soc. Biol., Ser. 100, (Paris),

- 3, 450 (1896).
- (2) BLAKEMORE, R.P.: *Science*, **190**, 377 (1975).
- (3) GOULD, J.L., et al.: *ibid.*, **201**, 1026 (1975).
- (4) WALCOTT, C., et al.: *ibid.*, **205**, 1027 (1979).
- (5) 中川正祥, 他: 交通医学, **34**, 376 (1980).
- (6) 中川正祥, 他: 同上, **32**, 129 (1978).
- (7) PAUTRIZEL, R., et al.: *C.R. Hebd. Seances Acad. Sci., Ser. D, Sci. Nat. (Paris)*, **274**, 488 (1972).
- (8) MARET, G., DRANSEFLD, K.: *Physica*, **86**, 1077 (1977).
- (9) 中川正祥, 他: 第59回産業衛生学会予稿集, 511 (1981).
- (10) BARNOOTHY, J.M., BARNOOTHY, M.F.: *Nature*, **200**, 189 (1963).
- (11) NAKAGAWA, M., et al.: *Bioelectromagnetics*, in contribution.
- (12) 中川正祥: 産業医学, **23**, 591 (1981).
- (13) 渥美和彦編: “バイオマグネトロニクス入門”, (1986), オーム社.
- (14) DAVIS, H.P., et al.: *Bioelectromagnetics*, **5**, 147 (1984).
- (15) BEISCHER, D.E.: *Astronaut.*, **7**, 24 (1962).
- (16) VYALOV, A.M.: *Vestn. Akad. Med. Nauk. SSSR*, **22**, 52 (1967).
- (17) BEISCHER, D.E.: *AGARD Conf. Proc.*, N.95, Part II, Aerospace Medical Panel Specialist Meeting, Luchon, France, Sep. 30~Oct. 1, C-12-1, (1971).
- (18) DOE interim guide line for occupational exposure to magnetic field (proposed), in Binational meeting concerning project No. 10A, under the U.S.-Japan non-energy research and development cooperation, (1981).
- (19) REICHMANISS, M., et al.: *Physiol. Chem. Phys.*, **11**, 395 (1979).
- (20) PERRY, F.S., et al.: *Health Phys.*, **41**, 267 (1981).
- (21) SMITH, C.W.: *ibid.*, **43**, 439 (1982).
- (22) WERTHEIMER, N., LEEPER, E.: *Am. J. Epidemiol.*, **109**, 273 (1979).
- (23) EASTERLY, C.E.: *ibid.*, **114**, 169 (1981).
- (24) WERTHEIMER, N., LEEPER, E.: *Int. J. Epidemiol.*, **11**, 345 (1982).
- (25) LIEBMAN, B., WOLF, S.: *N. Engl. J. Med.*, **307**, 292 (1980).
- (26) FULTON, J.P., et al.: *Am. J. Epidemiol.*, **111**, 292 (1980).
- (27) MILHAM, W., et al.: *N. Engl. J. Med.*, **307**, 249 (1982).
- (28) WRIGHT, W., et al.: *Lancet*, **8303**, 1160 (1982).

○「昭和61年秋の分科会」の指定テーマ○

予告⑤

1986年10月16日(木)~18日(土), 九州大学工学部(福岡市東区箱崎6-10-1)

(論文募集記事は5月号に掲載します)

「秋の分科会」の特色として, 一般募集項目(内容・区分)の他に毎回トピックスを選んで「指定テーマ」(発表20分・討論10分)のセッションを設け, 発表・討論の活発化を図っております。

今秋の「指定テーマ」は既報の通り次の2件が決まっておりますので, 関連分野の方は今から早目に準備をお進め願います。(お問合せは企画委員または学会事務局へ)

① 知識情報処理

知識情報処理は現在まだ導入期のフェーズにあるが, 今後, 原子力のみならず広く産業一般に大きなインパクトを与えるものと予想される。本学会でも近年, 診断, 制御, 運転, 設計などの諸分野でエキスパートシステムに関する発表が増えてきつつある。従来, 専門分野別のセッションで発表してきたものを知識情報処理の観点から, 知識表現, 推論, インターフェイス, 期待される効果, などの共通課題を横断的に議論する場を設ける。

② 核融合炉の熱・構造・電磁解析

核融合炉の工学的実証を目的とした設計研究が盛んに行われるとともに, 関連した実験的研究も徐々に進められていく。このような時期に核融合炉の主要コンポーネントである第1壁, ブランケット, 超電導磁石などの設計の基礎をなす熱・構造・電磁解析について集中的な研究発表の場を持つことは有意義と考える。