

磁場のヒトに対するリスク評価法に関する学際的研究

An interdisciplinary study on human risk assessment
of magnetic field exposure

研究代表者	大阪大学医学部教授 (前・愛媛大学) Prof., Faculty of Med. Osaka Univ. Takeshi SHIGA	志 賀 健
協同研究者	理化学研究所主任研究員 Chief Investigator, Institute for Phys. and Chem. Researches (RIKEN) Tetsutaro IIZUKA	飯 塚 哲太郎
	京都大学原子炉実験所教授 Prof., Reactor Institute, Kyoto Univ Yutaka MAEDA	前 田 豊
	徳島大学医学部教授 Prof., School of Med., Tokushima Univ. Hiroshi MIYAMOTO	宮 本 博 司
	高エネルギー物理学研究所名誉教授 Emeritus Prof., Institute for High Energy Physics Masami MASUDA	増 田 正 美
	高エネルギー物理学研究所助教授 Assoc. Prof., Institute for High Energy Physics Takakazu SHINTOMI	新 富 孝 和
	杏林大学保健学部教授 Prof., School of Health Science, Kyorin Univ. Osamu OKAI	岡 井 治
	大阪大学名誉教授 Emeritus Prof., Faculty of Med., Osaka Univ. Itiro TYUMA	中 馬 一 郎
	九州大学工学部教授 Prof., Faculty of Engineering, Kyushu Univ. Shogo UENO	上 野 照 剛

An interdisciplinary research, for establishing the human risk assessment of magnetic field exposure, has been jointly made.

A) Several important discoveries have been made by the individual members: *i.e.*, (1) a modification of the magnetic field effect on a biradical reaction by simultaneous microwave irradiation at the electron spin resonance condition, (2) the attraction of flowing paramagnetic red cells by an inhomogenous magnetic field, (3) the magnetic stimulation to motor area of human brain cortex by AC magnetic pulses, (4) the bradycardia induced by a static magnetic field, and so on.

B) Through the interdisciplinary discussion on the evaluation of past basic researches and present safety criteria, we have made the proposals for future risk assessment of magnetic field exposure: *i.e.*, (1) the necessity of epidemiological studies and the need for developing a sensor to measure the dose of individual exposure, (2) the urgency of animal experiments for studying life-long and/or transgenerational effects, (3) the basic studies on elementary biological phenomena, especially directed to the dose-response relationships, (4) the continuation and distribution of the data base covering the evaluated studies.

はじめに

超電導物質の開発競争が1987年の新聞紙上を賑わせた。もし常温超電導物質が製造できたとして、これを何に利用するかと聞くと、リニアモーターカー（磁気浮上・高速列車）、エネルギー貯蔵マグネット、核融合炉などが考えられ、医療用としては核磁気共鳴イメージングがあるという。このような先端技術の成長が、まだ続くとなると、人類が今までに経験したことのないような強磁場（地磁気の1万倍以上）に曝露される可能性が高くなってきた。しかし、人体の磁場曝露の安全基準・危険限界についてはまだ明瞭な答が出ていないのが実情であり、大型超電導磁石の開発・製作と並行して、誰かがどこかで強磁場の生体影響を科学的に調べるべきであろう。かつてX線が広く用いられるようになり、多数の犠牲者が出てからその人体影響の恐ろしさに気付いたという歴史を繰り返してはならない。

もちろん、磁場の生体影響に関する研究が全くなされていなかったわけではなく、かなりの数の報文がある。ただ、残念なことに、実験の再現性に乏しく、研究成果が一致しないことが多く、「ある現象に対する磁場効果の有無」という最も根本のところ意見（または実験結果）の不一致がある。厳しく評価すると、磁場の生体影響という研究テーマ自体がまだ科学としての市民権を得ていない感がある。本研究では以上の視点から現象論であるが、ヒトに対するリスクを質的、量的に正しく評価する方法を確立するために分子レベルから器官レベルまでの範囲で学際的研究を協力して行った。本報告は全員で検討した結果をまとめたものでその内容は次のとおりである：1) 磁場に関する現在の安全基準と生体影響研究、2) 生体物質

と定常磁場との間の相互作用、3) 磁場が細胞や臓器に及ぼす影響、最後にヒトに対する磁場についての提言をまとめた。（なお、2と3では本研究の代表者および協力者の研究成果に重点を置いたことをお断りしておく。）

1. 磁場に関する現在の安全基準と生体影響研究

a. “磁場”の種類

磁場にはさまざまな種類がある。マグネットの中心部のように磁場強度がある空間内で一定なものは（直流）定常磁場であり、T（テスラ）がその単位である（1T=1万 gauss）。マグネットの中心から遠ざかるにつれて磁場強度は急速に減衰し、空間的な磁場勾配を生じている（不均一磁場）。パルスまたはサイン波状に時間的に強度の変化する磁場もある（パルス磁場または交流磁場）。商用電力線に由来する50/60 Hzのものもあり、家電製品の発する弱い交流磁場でも地磁気より強い¹⁾。

定常磁場への人体曝露について最近の例をあげると、ヒトの³¹P-NMR測定において1.6 Tで脳や肝臓・心臓を調べたという報文^{2),3)}がある：これは地磁気（数10 μ T）のほぼ3万倍の強度であるが、特記すべき人体影響はなかったという。一方、ヒトの心臓部を中心に2 Tの曝磁を行うと心拍数が有意に減少したという、ただし1時間の曝磁後は特に所見がなかったし、1 Tでは徐脈の発生も見られなかったという⁴⁾。なお、磁気浮上リニアモーターカーでは足元で数10 mT（地磁気の約千倍）程度の曝磁量の車両が実用化されているらしい。

b. 安全基準

加速器や診断用核磁気共鳴イメージング(MRI)などについては磁場への人体曝露の安全基準が定

められている。これを例として検討してみる。

定常磁場：スタンフォードの直線加速器において1970年頃に定められた仮りのガイドライン、およびソ連の同様の非公式の基準がある⁶⁾。加速器周辺で働く人についての長時間全身曝露は20-30 mT以下と地磁気(30-70 μ T)の千倍程度を限界としている。

最近(1980年代)のMRIに関するもの⁶⁾では、定常磁場の最大値は曝露時間の短い被検者については2.5 Tに引き上げられた。ただし、オペレーターの長時間全身曝露については20 mT以下と昔の基準値が引き継がれている。

空間的な磁場勾配：ソ連の仮基準では磁場勾配への配慮がみられるが、最近のMRIの基準では無視されている。この点に関し、強磁場内の血流、特に常磁性赤血球の多い静脈血流、について磁場勾配の寄与を考慮しなくて良いのかどうか今後の定量的検討が必要と考えられる。

時間的な磁場勾配：時間的に急変する磁場は組織に電流を誘起し、神経・筋の興奮を惹き起こす⁷⁾。これは生体組織や体液が電導性を有するため、交流磁場やパルス磁場中に曝露されると電磁誘導により生体内にうず電流が生ずるためである。数10 kHz以下の低周波磁場では興奮性膜の興奮などの刺激効果が主であるが、数100 kHz以上の高周波になると熱作用が主となる。もし心臓にある強さの通電を行うと障害(心室細動など)を起こす。これを考慮してMRI-CTでは時間的に変化する磁場についての基準が設定されている。

高周波の電磁波：高周波の電磁波の生体影響は一般に発熱が問題とされ、そのために動物の行動に変化が生ずること(行動分裂)が知られている。特にマイクロ波はその波長が生体各組織・臓器のサイズと重なる領域にあるため干渉を起こしやすく、加えて生体組織に吸収されやすい。MRIでは身体のどこかで1°C以上の加熱が起こらないように基準値が決められている。

低周波の電磁波：低周波電磁波によって生体に誘起電流が流れそれが神経、筋細胞の興奮性膜を直接刺激して起こる効果、陽イオン(K^+ , Na^+ ,

Rb^+)の透過性の変化および Ca^{2+} の流出などがあげられており、商用50/60 Hzのもの(extremely low frequency, ELF)についてはWHOクライテリア⁸⁾で詳しく議論されている。

以上のように“磁場”といっても、直流の定常磁場だけではなくさまざまな波型のものがある。また、交流の場合には電界の影響と磁界の影響を分離できないことが多い。

c. 磁場の生体影響研究

磁場の安全基準値に関連した記事を見ると、必ず次のような注釈がついている。①「磁場の生体影響については諸家の成績が一致しない」が、実用上は何か定めざるを得ないので、②「根拠不十分だが、仮りに次のように決める」けれども、③「将来、信頼できるデータが確立したら、より良い基準に変更する。」

一般に物理力の生体作用を研究するのに2通りのアプローチがありそうである。①一つは化学物理学(または物性物理学)の立場から、磁場と生体物質との間の相互作用を調べたり、あるいは磁場による生化学素反応の変化を見たりする。②今一つは生物学的な立場から、とりあえず磁場中の生物現象を調べ磁場効果の有無を見てゆく。もちろん両者は相補的な関係にあり、いずれにせよ用量-反応関係を正確に研究しなければならない。

本研究グループは「磁場の生体影響」データベースを作成することも研究目標の一つとして挙げている。この種の文献集として日本では中川恭一氏(いすず病院)のものがあり、世界的にはWHOのワーキンググループによるEnvironmental Health Criteriaシリーズ所載のものがある⁹⁾。ただし、いずれもやや網羅的であって、文献批判が弱いため使いにくいという欠点がある。我々が作成中のものは、各分担者が読んで価値ありとしたものを収録した点に特色があり、現在の収録集は570文献である。最近では、発表文献数が急増していて、しかも内容が向上し用量-反応関係を明確に記載したものが多い。

d. 曝磁の疫学と動物実験

生体影響に関するデータの不一致は疫学調査のレベルから、試験管内の生化学実験に至るすべて

の局面でみられる。次にその一、二を紹介する。

疫学調査：有名なものは Vyalov (ソ連, 1971) による磁場に曝露された職場の労働者を対象とする調査¹⁰⁾で、主として不定愁訴と血圧低下傾向が見いだされている。他方, Marsh ら (米国, 1982) の職場調査¹¹⁾では、被曝群でわずかな白血球減少と血圧上昇傾向があったが、一般症状については対照群との間に有意差は見られなかった。

この種の調査で最も困難なことは個人の被曝量の見積りである。調査時期の職場環境は実測できるが、勤続何年かの過去平均曝露量の算出は至難である。また、血球数などの検査値は反復実施すれば信用できるデータが得られるが、一般症状・不定愁訴の聞き取り調査の比較は実にむずかしい。

いずれにしても磁場の生体影響が確立されていない現在、磁場に曝露されている職場においてデータの集積が成されなければならない。すなわち、磁場の種類と強度、被曝時間の記録、定期的健康診断は疫学調査上早急な実施が必要と考えられる。

動物実験：さまざまな種類の動物実験が行われているが、結果は必ずしも一致していない。その最大の理由は大容量の磁場空間を作るために莫大な費用がかかり、大規模な実験ができない点にある。

Osbakken ら (1986) の定常磁場下のマウス全身曝露実験では、12 インチ径の超電導磁石を用い (1.89 T) 1 日 6-12 時間、30-75 日間曝露している¹²⁾。その結果、一般所見、血液検査値および臓器所見については曝露群と対照群との間には有意の差はなかったという。ただし、(i) 磁石室内飼育 (曝露群と対象群) には騒音・調光などの環境に問題があり、動物舎内飼育の対照群との間に有意差が生じた、(ii) 遺伝・生殖・発生については実験していない、(iii) 定常磁場 1.98 T のみの実験であり、曝露可能なラットは 1 群当たり 5-10 匹にすぎない、など今後に残された問題も多い。

空想の研究所：MRI 被検者の安全基準が定常磁場について 2.5 T とされ⁶⁾、志願者の脳や肝の NMR が 1.6 T で研究されている^{2), 3)}現状からみ

て、定常磁場については 5 T 以上の超電導磁石を用いて、マウス (またはラット) の長期曝露と継世代影響を検討すべき時期にきている。

用量 (磁場強度と日数)-反応関係を調べるための最低限の数のマウス長期曝露実験を行うには大型の研究施設が必要であろう。その内容は恒温・恒湿の建物 4 棟以上 (曝露 2 棟, 対照 1 棟, 検疫・洗浄・消毒 1 棟)、大口径超電導磁石 2 基 (1 基は予備兼急性実験用) は必要であり、飼育ケージとその自動運搬システムはすべて反磁性材料で作らねばならない。エネルギーセンター (冷・暖・湿) と冷媒センター (液体 He, 液体 N₂)、研究棟などが必要である (因みに、これに必要な液体ヘリウムを筆者の在籍していた大学で使い捨てにすると年間コストは何百万円となる)。このように定常磁場下のマウス長期間飼育だけでも費用のかかる大型プロジェクトとなる。したがって、この種の大型研究は実用磁場強度の上昇に並行して、国際的かつ学際的に行われるべきであろう。

e. 曝露量測定の問題

実験系における曝露量の測定は容易であるが、職場などにおいて人体がどの程度の磁場にさらされたか定量的に測定することは極めて困難である。しかし、このことは疫学上データを集積する上で重要であり、磁場の種類と平均磁場強度と曝露時間の記録は最低限度必要と考えられる。これと関連して、放射線に対する被曝量をフィルムバッチで知るように、磁場に対する被曝量を記録できるような簡単な装置の開発も望まれる。

2. 生体物質と定常磁場との間の相互作用

物質の磁氣的性質は強磁性、常磁性、反磁性に大別される。これらと定常磁場との間で起こる相互作用について以下にまとめる。

a. 生体の強磁性物質の代表例は走磁性細菌にみられるマグネタイト (Fe₃O₄) である。これは地磁気に感應する生体素子となり、その磁場との相互作用が菌体にトルクを与え、この素子が磁力線と平行になれば最小のエネルギーで菌体が適切な環境に到達できるという。

磁気に直接応答しない動物、たとえば岩礁に棲息するヒサラガイ (カイトン) もマグネタイトで

歯の硬い部分を構成しているが、その意味は分からない。生物が作る磁石は動物の回遊、渡り、帰巣本能と関連して興味もたれ、サケ、マグロ、イルカ、各種の渡り鳥、ミツバチなどで研究が進められている。一方では、このようなマグネタイトの存在に対して生物の持つ生理的機能がどのように相互作用するか、マグネタイト固有の機能、存在する臓器機能と運動との関連性など生物学的には未知の問題が多い。

ヒトの場合にはこのような強磁性物質は認められていないので人体影響と関連して問題になることはない。ただし、医療用に強磁性物質を用いる場合には特別な注意を払うべきことはいうまでもない。

b. 常磁性種の中には酸素分子、鉄錯体、など生体成分として重要なものがある。磁場と間の相互作用は次に詳しく述べるが、量子力学的相互作用（反応速度への影響）と古典力学的相互作用（牽引と配向）の二つのカテゴリーに大別できそうである。

前者の例として、光合成初期反応における磁場効果があり¹³⁾、ラジカル対という特定の状態を経由する反応については、外部磁場の作用により反応速度が変化することが実験的にも理論的にも確立されている^{14), 15)}。志賀らは反応系としてビタミン K₃ を含むラジカル対の人工ミセル中での磁場依存性について研究を進めた^{16), 17)}。特に反応中に磁場とマイクロ波を同時に与え、これらが電子スピン共鳴条件を満たすときに反応収量に変化することを見だし、その理論的考察を行った。

後者の例としては、HbS 症の鎌状赤血球の磁場中での配向²⁰⁾や磁場を利用した常磁性赤血球の分離が挙げられる²¹⁾。志賀らは、末梢血流（特に肺循環）に及ぼす外部磁場の影響を知るために、モデル血管（矩形および円形流路）中を流れる赤血球流（レイノルズ数 0.03~1.4）が不均一磁場より受ける影響について検討した^{22)~24)}。常磁性赤血球（脱酸素化および酸化型赤血球）は、磁場方向に牽引され、磁場方向に分岐した管内への赤血球量が増加した。この変化は、1) 磁場強度が小さいとき“(帯磁率)×(磁場強度)×(磁場勾配)”

に比例するが、磁場強度が大きくなると飽和現象を示した。2) 赤血球の流速が遅いとき、すなわち赤血球が磁場に曝露される時間が長いほど大きくなる。3) 至適ヘマトクリット（約 5%）が存在した。この結果は酸素飽和度の異なる赤血球でも同様であった²⁵⁾。

c. 生体内物質の大部分は反磁性であり、通常は磁場の影響を受けない。しかし、分子の運動エネルギーより磁気エネルギーが大きいような強磁場のもとでは分子は特定の方向に配列する²⁶⁾。高分子タンパクの場合、その磁気異方性はその立体構造と含有芳香族アミノ酸の数によって異なっている。

血液凝固因子の一つであるフィブリノーゲンは α -ヘリックスを有する 3 種のポリペプチド鎖 (α , β , γ) から成る繊維状タンパクである。このフィブリノーゲン溶液にトロンピンを添加すると、フィブリノーゲンペプチド A および B を放出し、フィブリンモノマー、ついでフィブリンポリマーを形成してゲル化する。この過程を強磁場下 (~8 T) に行くと、磁力線と平行にフィブリンが配向することが電子顕微鏡的にまた中性子回折像から観察される^{26), 27)}。すなわち、フィブリノーゲンの α -ヘリックス軸は磁力線に平行に、ペプチド結合面は垂直に配向する。ゼロ磁場下ではフィブリンに配向はみられず、ランダムに存在している。1 T で凝固物に明らかな配向が観察され、8 T では完全な配向が認められる。磁場の下に形成された凝固物ではゼロ磁場で形成されたものに比べて、 α -ヘリックスに垂直方向の力に対して弱い²⁸⁾。フィブリン形成速度あるいはフィブリン溶解には磁場は影響しない。これらの現象は生体内で強磁場下に形成された血栓は物理的な力に対して弱く、不安定であることを示唆しており、血液の凝固・止血効果に対する悪影響が予想される。

生体膜に対する磁場の影響としてよく知られているのは眼の視細胞である桿状体外節部の配向である。外節部は視物質から成る円盤状二重膜を構成しているが、この外節部を単離しその懸濁液を曝磁すると外節の長軸が磁力線に平行に配向する。Hong²⁹⁾ らはこの配向をロドプシン分子の磁気異

方性によって説明し、1 Tの均一磁場でみられた外節の配向において外節1個の磁気エネルギーを 4.5×10^{-10} ergと計算している。この値は後にChabre³⁰⁾が磁石を回転させることにより外節長軸の回転の遅れ角より求めた磁化率の異方性より計算して得られる磁気エネルギーともよく一致している。

DNAの高磁場下における配向がMaret³¹⁾らによって見いだされている。核酸の磁気異方性によるものであり、DNAフィラメント軸が磁場に垂直に配向することを磁気複屈折(Cotton-Mouton効果)を測定することによって観察している。Cotton-Mouton定数は磁場強度(<14 T)の2乗に比例しその程度は塩基組成、つまり芳香環の含量によって異なっている。Brandes and Kearns³²⁾はDNAの磁場(5.9 T)に対する垂直方向の配向を顕微鏡下に観察している。これらの研究は遺伝子レベルでの磁場に対する生体影響も考慮されなければならないことを示しており、継世代的な疫学調査、大規模な動物実験の必要性に迫られていることを示している。

d. 磁気流体力学(magneto-hydrodynamics)による効果は電導性の流体が磁場に垂直方向に流れるとき、流れと磁場と双方に垂直な方向に力(電圧)を生ずるものである。計算では³³⁾、大動脈起始部に5 Tの定常磁場を与えるとき血流速度を10%ほど低下させ得るといふ。

またこの起電力は磁場の磁束密度に比例し、血管の直径および血液の平均流速にそれぞれ比例する。動脈血流はパルスとして流れ、また血流速度が速いので磁場による血流起電力は大きい。岡井らのMagnetorheographyはこの原理に基づくもので、胸部および腹部に外部から0.7 Tの定常磁場を作用させたとき、被曝部位に設置した表面電極より、大動脈の血流と同期した電位が観察された。³⁴⁾

3. 磁場が細胞や臓器に及ぼす影響

磁場の効果がすべて上記のような単純な化学物理学的な素反応によって解析できるとは考えられない。生体の組織構築は複雑であり、複数の磁場効果の相乗作用が起こる上に、他の効果(例えば

温度、pH、など)も複合してくる。

研究の方法論としては定常磁場、パルス磁場及び交流磁場のそれぞれについて、現時点で考えられる最高被曝量の前線で哺乳動物の長期曝露実験を行う必要がある。臓器レベルの慢性障害や発癌などの問題は、既に化学物質の検定法として確立された規模の動物実験が望ましい。また、これに併せて生殖・発生・遺伝などの継世代的影響を調べなければならない。ただし、そのためには定常磁場だけ考えても先に述べたとおりの大規模な実験施設を必要としている。磁場のヒトに対するリスク評価のため、このような学際的かつ国際的プロジェクトが必要である。

大型研究の他に、生物学上の素反応を見る点で細胞機能または単一組織機能に及ぼす磁場効果について継続的に基礎研究を積み重ねる必要がある³⁵⁾。本研究グループは次のような研究領域を取り上げた。

a. 培養細胞に対する磁場の効果

純粋な細胞系に対する磁場の影響を観察する上で培養細胞は好都合である。宮本らは³⁶⁾、定常磁場(Sm-Co磁石)下に長期培養されたヒト正常歯肉繊維芽細胞の増殖速度および細胞内DNA含量を調べたが、非着磁金属下の培養細胞との間に差を認めなかった。また、ヘルムホルツ型電磁石の2 cmギャップ内に置かれたHeLa S3細胞の細胞膜イオン輸送を10-50°Cの温度範囲で観察すると、K⁺のアナログであるRb⁺の取り込みは(1) 42.5°C付近で1 T以上の磁場で対象群に比べて明らかな促進が認められる、(2) 低温下、あるいは0.5 T以下では対象群との間に差は認められない。このような磁場に対するRb⁺取り込み促進はウバイン非感受性輸送成分のみに現れ、Na⁺ポンプによる輸送にはみられなかった。これらは生体膜の相転移温度との関連で興味ある現象である。

b. 興奮性細胞に対する磁場の効果

磁場の興奮性細胞に対する効果においては変動磁場の作用が重要である。生体は基本的に導体であるため、変動磁場内では電磁誘導により“うず電流”が発生する。うず電流による細胞への作用

は細胞膜の電気特性と変動磁場の周波数により変わってくる。数 100 kHz 以上の高周波磁場では熱作用が主体となり、数 10 kHz 以下の低周波磁場では興奮性細胞膜による細胞への作用は膜の電気特性と変動磁場の周波数により変わってくる。低周波磁場では興奮性細胞膜への刺激作用が主体となる。

実際の変動磁場による興奮性細胞に対する磁場効果の例をあげてみる。交流磁場によるものとして 100 年前から磁気閃光という現象が知られている³⁷⁾。これは交流磁場に頭部がさらされたときに視覚が刺激される現象で、発生したうず電流が網膜の細胞を刺激して起こっていると考えられる。これは著明な周波数依存性を示し 20 Hz 付近で磁場強度に対する閾値が最小となる。また、パルス磁場によって大脳皮質のニューロンを刺激することが可能である。Barker ら³⁸⁾は頭蓋の外から単一コイルを使い大脳皮質運動野を刺激した。これにより伝導路系の興奮伝導・伝達を測定し、神経疾患の検査や脳の研究に役立てようとしている。単一コイルが脳の広範囲を同時に刺激するのに対して、上野ら³⁹⁾は逆直コイル対を用いて脳の局所を刺激することに成功した。例えば、大脳運動野の一部を刺激することで母指球筋のみを収縮させることが出来る。さて、一般に興奮性細胞膜のパルス磁場に対する閾値は、磁気閃光と同様に V 字形の周波数特性を示し、閾値が最小となる周波数は組織の電気特性に依存している。中枢神経や心筋に対する周波数特性は実験的にはまだ得られていないが、今後の研究を期待するものである。

c. 心臓機能に対する定常磁場の効果

岡井らは電磁流量計の原理を発展させ、人体の胸部に外部磁場 (0.7 T, DC 磁場) を作用させ、胸部表面に設置した電極より、上行大動脈血流および下行大動脈血流と同期した電位変化を観測した³⁴⁾。この電位変化は磁場の作用方向 (背側から腹側) を逆にすると逆転し、ECG や他のノイズと区別される。また磁場の作用方向の逆転に伴い心拍数の変化 (徐脈) が起こることも観察されている⁴⁰⁾。この現象の機構については今後の詳細な検

討が待たれる。

まとめと提言

磁場の生体影響といっても研究すべき範囲は広い。しかも、地磁気の何万倍という強磁場を作り出せるようになった現在、このような強磁場の生体影響が全く分かっていないというのははなはだ危険である。本稿の前段で紹介したように、磁場の人体曝露についての一応の安全基準はあるが、短時間の曝露はともかくも、長期間曝露の知識は乏しい。ヒトに対するリスク評価と確実な安全基準を確立するため、私達の提言は次のようにまとめられる：

- 1) 疫学調査、およびこれに関して曝磁量の測定法の開発、
- 2) 動物実験、特に長期飼育実験の緊急性、
- 3) 小規模実験における用量-反応関係の確立、
- 4) 文献データベースの製作と充実、および利用。

1. ヒトに対する磁場のリスク評価のための基礎的データはまだ不足している。曝露下に作業する人達の曝露量 (磁場の種類と平均強度、曝磁時間) と健康診断は疫学的には最低限必要事項となろう。特に長期曝露に対する生体影響は継代的にデータを集積する以外方法はない。曝磁量測定器具の開発も課題の一つであろう。

2. 動物実験による短期・長期曝露の影響研究はヒトに対する磁場の影響の検討にもまして急がねばならない。先に述べた空想の研究所は空想だけであってはならない時期にきている。特に実験動物の長期間曝露には研究所クラスの施設・設備は必須であり、リニア・モーターカーや超電導物質の開発、製作と並行して着手されなければならない課題である。

3. 研究室レベルの規模では当面、①化学物理学的に的確な研究を生体の素反応をベースに組み上げ、②生物学的にデータ解釈上のまぎれのない実験系について確実な研究を積み上げる必要がある。いずれにせよ用量-反応関係を正確に測定することが望まれる。

4. 本研究グループが作成した「磁場の生体影響」データベースは今後さらに追加、集積されなければならない。一方、データベースの利用方法については国内だけではなく国際的レベルの拡大が

検討されなければならない。

最後に、本研究を行うに当たり、日産科学振興財団の学術研究助成金をいただいたことを感謝致します。

引用文献（研究代表者と協力者の発表論文には*印を付した。）

- 1) Stuchly, M. A. (1986): Human exposure to static and time-varying magnetic fields. *Health Physics*, 51, 215-225.
- 2) Oberhaensli, R. D., Galloway, G. J., Taylor, D. J., Bore, P. J. and Radda, G. K. (1986): Assessment of human liver metabolism by phosphorus-31 magnetic resonance spectroscopy. *Br. J. Radiol.*, 59, 695-699.
- 3) Barany, M., Langer, B. G., Glick, R. P., Venkatasubramanian, P. N., Wilbur, A. C. and Spigos, D. G. (1988): *In vivo* H-1 spectroscopy in human at 1.5 T. *Radiology*, 167, 839-844.
- 4) Jehenson, P., Duboc, D., Lavergne, T., Guize, L., Guerin, F., Degeorges, M. and Syrota, A. (1988): Change in human cardiac rhythm induced by a 2-T static magnetic field. *Radiology*, 166, 227-230.
- 5) Alpen, E. L. (1978): Magnetic field exposure guidelines. In: *Magnetic Field Effects on Biological Systems* (ed. by Tenford, T. S.) pp. 25-32, Plenum, NY.
- 6) Natl. Radiol. Protect. Board on MRI (1983): Revised guidance on acceptable limits on exposure during nuclear magnetic resonance clinical imaging. *Br. J. Radiol.*, 56, 947-977.
- 7*) Ueno, S., Lovsund, P. and Oberg, P. A. (1986): Effect of time-varying magnetic field on the action potential in lobster giant axon. *Med. Biol. Eng. and Comput.*, 24, 521-526.
- 8) WHO/IRPA Task Group (1984): Extremely low frequency (ELF) fields. *WHO Environm. Health Criteria*, 35, WHO, Geneva.
- 9) WHO/IRPA Task Group in Magnetic Fields (1987): Magnetic fields. *WHO Environm. Health Criteria*, 69, WHO, Geneva.
- 10) Vyalow, A. H. (1974): Clinico-genetic and experimental data on the effects of magnetic fields under industrial conditions. In: *Influence of Magnetic Fields on Biological Subjects* (ed. by Kholodov, Yu. A.) pp. 163-174 (Engl. transl.: Joint Publ. Res. Service, Arlington, Virginia, Report No. JPRS-63038).
- 11) Marsh, J. L., Armstrong, T. J., Jacobson, A. P. and Smith, R. G. (1982): Health effect of occupational exposure of steady magnetic fields. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 43, 387-394.
- 12) Osbakken, M., Griffith, J. and Taczanowsky, P. (1986): A gross morphologic, histologic, hematologic, and blood chemistry study of adult and neonatal mice chronically exposed to high magnetic field. *Magn. Reson. Med.*, 3, 502-517.
- 13) Hoff, A. J. (1986): Magnetic interactions between photosynthetic reactions. *Photochem. Photobiol.*, 43, 727-745.
- 14) Hayashi, H. and Nagakura, S. (1978): The theoretical study of external magnetic field effect on chemical reaction in solution. *Bull. Chem. Soc. Japan*, 51, 2862-2866.
- 15) Turro, N. J. (1983): Influence of nuclear spin on chemical reactions: magnetic isotope and magnetic field effects. (A Review)
- 16*) Okazaki, M., Sakata, S., Konaka, R. and Shiga, T. (1985): Application of spin trapping to probe the radical pair model in magnetic-field dependent photoreduction of naphthoquinone in SDS micellar solution. *J. Am. Chem. Soc.*, 107, 7214-7216.
- 17*) Okazaki, M., Sakata, S., Konaka, R. and Shiga, T. (1987): Magnetic-field-dependent spin adduct yield in the photoreduction of naphthoquinones in SDS micellar solution. *J. Phys. Chem.*, 91, 1131-1137.
- 18*) Okazaki, M. and Shiga, T. (1986): Product yield of magnetic-field dependent photochemical reaction modulated by electron spin resonance. *Nature*, 323, 240-243.
- 19*) Okazaki, M., Sakata, S., Konaka, R. and Shiga, T. (1987): Product yield detected ESR on magnetic field-dependent photoreduction of quinones in SDS micellar solution. *J. Chem. Phys.*, 86, 6792-6800.
- 20) Murayama, M. (1965): Orientation of sickled erythrocytes in a magnetic field. *Nature*, 206, 420-422.
- 21) Melville, D., Paul, F. and Roath, S. (1975): Direct magnetic separation of red cells from whole blood. *Nature*, 255, 706.
- 22*) Okazaki, M., Maeda, N. and Shiga, T. (1986): Drift of an erythrocyte flow line due to the magnetic field. *Experientia*, 42, 842-843.
- 23*) Okazaki, M., Maeda, N., and Shiga, T. (1987): Effects of an inhomogeneous magnetic field on flowing erythrocytes. *Eur. Biophys. J.*, 14, 139-145.
- 24*) Okazaki, M., Kon, K., Maeda, N. and Shiga, T. (1988): Distribution of erythrocyte in a model vessel exposed to inhomogeneous magnetic fields. *Physiol. Chem. Phys. Med. NMR*, 20, 3-14.

- 25*) 精山明敏, 前田信治, 志賀 健(1988): 不均一磁場中の管内を流れる赤血球の偏り. マグネティック研究会資料 (MAG-89-8), pp. 67-73.
- 26) Torbet, T., Freyssinet, J.M. and Hudry-Clergeon, G. (1981): Orientated fibrin gels formed by polymerization in strong magnetic field. *Nature*, 289, 91-93.
- 27) Freyssinet, J.-M., Torbet, J., Hudry-Clergeon, G. and Maret, G. (1983): Fibrinogen and fibrin structure and fibrin formation measured by using magnetic orientation. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 80, 1616-1620.
- 28) Yamagishi, A., Takeuchi, T., Date, M. and Higashi, T. (1989): Polymerization of biological molecules under high magnetic fields. *Physica. B*, 155, 433-436.
- 29) Hong, F. T., Mauzerall, D. and Mauro, A. (1971): Magnetic anisotropy and the orientation of retinal rods in a homogeneous magnetic field. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 68, 1283-1285.
- 30) Chabre, M. (1978): Diamagnetic anisotropy and orientation of α helix in frog rhodopsin and meta II intermediate. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 75, 5471.
- 31) Maret, G., Schickfus, M. V., Mayer, A. and Dransfeld, K. (1975): Orientation of nucleic acids in high magnetic fields. *Phys. Rev. Lett.*, 35, 397-400.
- 32) Brandes, R. and Kearns, D. R. (1986): Magnetic Ordering of DNA liquid crystals. *Biochemistry* 25, 5890-5895.
- 33) Chen, I. I. and Saha, S. (1984): Analysis of an intensive magnetic field on blood flow. *J. Bioelect.*, 3(1/2), 293-298.
- 34*) Okai, O., Togawa, T. and Oshima, M. (1974): Magnetorheography nonbleeding measurement of blood flow in man. *Japan Heart. J.*, 15, 469-474.
- 35*) 志賀 健, 中馬一郎(1989): 環境科学シンポジウム 1988. 磁場・電場の生体影響. 環境科学会誌, 2, 129-134.
- 36*) 佐藤 圭, 山口久雄, 細川敬子, 池原敏孝, 宮本博司, 木内陽介, 吉田幸子(1989): 傾斜をもった定常磁場がヒト培養細胞におよぼす影響. 日本生体磁気学会誌, 特別号, 2, (1), June (1989), p. 10.
- 37) D'Arsonval, M. A. (1886): Dispositifs pour la mesure des courants alternatifs de toutes fréquences. *Comp. Rend. Soc. Biol.*, 3, 45-451.
- 38) Barker, A. T., Jaliou, R. and Freeston, I. L. (1985): Non-invasive magnetic stimulation of human motor cortex. *Lancet*, 1, 1106-1107.
- 39*) 上野照剛, 松田鶴夫, 原田耕介, 藤木 稔, 堀重昭(1989): 逆方向パルス磁場対による脳の標的刺激. マグネティック研究会資料 (MAG-89-9), pp. 75-82.
- 40*) 岡井 治(1989): 強磁場による心拍数の変動. マグネティック研究会資料 (MGA-89-12), pp. 97-105.