

第 2 章

2

生物学研究

第2章 生物学研究 目次

| | | | | |
|--------|-------|-------|-------|----|
| 我孫子研究所 | 生物科学部 | 上席研究員 | 根岸 | 正 |
| 我孫子研究所 | 生物科学部 | 主任研究員 | 西村 | 泉 |
| 我孫子研究所 | 生物科学部 | 主任研究員 | 小田 | 毅 |
| 我孫子研究所 | 生物科学部 | 主任研究員 | 中園 | 聡 |
| 我孫子研究所 | 生物科学部 | 主任研究員 | 窪田ひろみ | |
| 我孫子研究所 | 生物科学部 | 上席研究員 | 重光 | 司 |
| 我孫子研究所 | 生物科学部 | 主任研究員 | 今井 | 節夫 |

| | | |
|--------|--------------------|----|
| 2 - 1 | 研究の経緯 | 14 |
| 2 - 2 | 研究作業仮説の設定 | 14 |
| 2 - 3 | 細胞内情報伝達機構への影響 | 15 |
| 2 - 4 | 微生物における遺伝子発現への影響 | 18 |
| 2 - 5 | 遺伝子変異への影響 | 20 |
| 2 - 6 | 免疫系への影響 | 20 |
| 2 - 7 | 中枢神経系ホルモンへの影響 | 23 |
| 2 - 8 | 霊長類（ヒヒ）を用いた社会・学習行動 | 25 |
| 2 - 9 | 生殖機能への影響 | 26 |
| 2 - 10 | 発がんに対する影響 | 26 |
| 2 - 11 | まとめと今後の課題 | 29 |

根岸 正（8ページに掲載）



小田 毅（1996年入所）
低周波電磁界の生物影響に関する研究に従事。現在は、分子生物学的手法を用いて電磁界曝露による遺伝子発現の研究に取り組んでいる。



西村 泉（1984年入所）
専門は毒性学。電磁界の生物研究では、細胞内カルシウム・免疫系への影響に関する研究を行った。現在は、粒子状物質の生物影響評価研究に取り組んでいる。



中園 聡（1993年入所）
電磁界の生体影響について、遺伝子変異および遺伝子発現を指標に評価を行ってきた。現在は、DNAチップなどの手法を用いヒト全遺伝子レベルでの発現応答から、環境毒性因子の迅速スクリーニングおよび生体影響評価の研究に取り組んでいる。



窪田ひろみ（1997年入所）
電磁界の免疫機能への影響に関する研究を
分担してきた。現在、微量物質および粒子状
物質の生物影響に関する研究を進めている。



今井 節夫（1996年 日本生物科学研究
所より出向派遣）
電磁界の生物影響研究のうち、実験動物を
用いた生殖影響等に関する研究に従事してき
た。現在は、経済産業省資源エネルギー庁か
らの受託研究である「腫瘍に及ぼす影響」に
関する研究に取り組んでいる。



重光 司（1980年入所）
電磁界の生物影響研究のうち、電磁界曝露
装置の開発等、工学的研究から実験動物を用
いた研究、ならびにデータベースのとりまと
め等、広範囲の分野にわたって研究を進めて
いる。

2 - 1 研究の経緯

1990年代前半、関連学協会の極低周波磁界の健康に関わる生物学的研究の関心は、Katoら^①（当所と北海道大学との共同研究による成果：本章「中枢神経系ホルモンへの影響」参照）やYellonら^②によって示唆された松果体から分泌されるホルモンであるメラトニンの夜間の分泌抑制、Liburdy^③らによる乳がん細胞 MCF - 7におけるメラトニンの作用低下、あるいは、Goodman^④らによるがん関連遺伝子やストレス関連遺伝子などの遺伝子発現への影響などであった。

これらの研究結果は、いずれも再現ができなかったり、特定の培養細胞系にしか現象が確認できないなど、科学的証拠となるべき現象が見出せなかった。しかし、これらの断片的な論文発表は、米国を中心として、一般社会に不安感を提供することとなり、極低周波磁界問題が社会問題の一つになった。

このような背景のもと、膨大な研究資源を投入して、再現性のある科学的証拠を検索すべく開始されたのが、後述の米国によるRAPID計画(第4章参照)である。

当所では従来から積極的に関連研究情報の収集・分析・評価を行いつつ、生物学的研究および電気工学的研究を進めてきたが、1990年代中葉になると、我が国に

おいても磁界と健康に関する問題が社会問題の一つになる兆しが見え始めたこともあり、当所は所内に「電磁界検討委員会」を設け、当所の関連研究、主として生物学的研究の推進戦略を検討した。

この委員会の答申は、「商用周波微弱磁界の生物影響を科学的に解明し、影響の予測・評価を行う。このため、研究作業仮説を基に、細胞・分子レベルや、生理学的機能への再現性のある反応の探索を行うとともに、一部の疫学調査で影響が示唆されている生殖、腫瘍への影響については、実験動物を用いて実証的に検討するなど、総合的に生物学的研究を推進する。さらに、磁界計測手法の標準化、磁界曝露による生体内誘導電流の解析・評価技術の開発などの電気工学的研究を進めるとともに、疫学調査、内外の公的機関の本問題に関する評価等について分析・評価する。」というものであった。

当所ではこの答申を踏まえ、下記の研究作業仮説を設定するとともに、プロジェクト型の総合的実験研究を遂行するため、大幅な実験設備の整備と研究要員の充実を図り、細胞・遺伝子レベルから動物実験まで幅広い実験研究を開始した。

2 - 2 研究作業仮説の設定

当所の電磁界問題関係者は、上記の答申を踏まえ、これまでに発表された生物学的研究結果、疫学調査結果を精査し、「一部の疫学調査が示唆している腫瘍、中枢神経系障害、生殖障害が、真に科学的根拠のある現象であれば、げっし類などの実験動物に磁界を曝露することにより、影響を示唆する結果が得られるはずであり、それらの影響が発現するためには、発がんに関連した遺伝子の発現などの細胞・分子レベル、あるいは、免疫、ホルモンなどの生体防御、生体調節機能にも影響が現れるはずである。」という研究作業仮説（図2-2-1）を設定し、体系的に生物学的研究を展開させた。

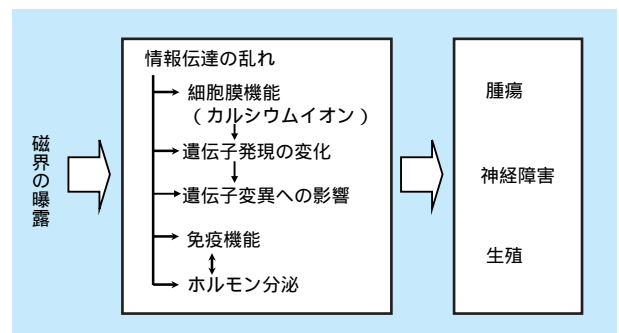


図2-2-1 研究作業仮説

2 - 3 細胞内情報伝達機構への影響

研究作業仮説における情報伝達の乱れの一つとして、細胞増殖や細胞の活性化など、細胞機能の引き金になっている細胞内カルシウムイオンと、細胞膜からの信号を細胞核に伝える情報伝達機構のひとつであるチロシンキナ - ゼのリン酸化反応について実験した。

2-3-1 細胞内カルシウムイオン

実験動物であるラットから取り出した胸腺、脾臓の細胞を培養しながら、50Hzの水平、垂直、回転円磁界を20～30分間、細胞に曝露した。実験によっては、曝露前に刺激を与えた細胞も用いた。細胞の機能に変化が現れるときには細胞内のカルシウム濃度が増加するため、それを測定することで磁界による影響の有無を検証した。細胞内のカルシウムイオン濃度の測定には、多数の細胞をごく短時間で測定可能なフロ - サイトメトリ - (FCM)法を採用し、磁界曝露する前、曝露中、曝露後と連続してその濃度変化を測定した。また、FCM用培養装置は磁界が乱されることなく細胞に達するように非磁性素材を用い、かつ、温度制御が可能な専用装置を開発した(図2-3-1)。

結果の一例を図2-3-2に示した。30分間の磁界曝露中に細胞内カルシウム濃度に変化はなかったが、曝露後に細胞内カルシウムイオンを増加させる試薬(カルシウムイオノフォア)を加えるとその濃度は著しく増加した。このことから、実験に使用した細胞には、正常に細胞内



図2-3-1 当所が開発した細胞培養器

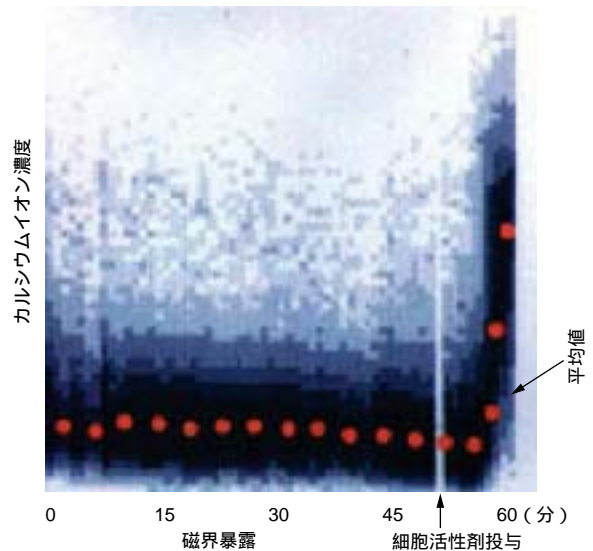


図2-3-2 細胞内カルシウムイオン濃度変化の例

カルシウムが増加する能力はあるが、磁界にはその作用のないことが明らかになった。全ての実験結果をまとめたものを表2-3-1に示した。

磁界の曝露により細胞内の遊離カルシウムイオン濃度が増加するという研究があり、細胞レベルでの磁界影響として議論されている。Liboffら⁽⁵⁾は、特定の周波数と強度の磁界が細胞に影響を与えるとし、その現象を説明するイオンサイクロトロン仮説を提唱した。測定法としてLiburdyら⁽⁶⁾は放射性同位元素(^{45}Ca)を用い、Lindstromら⁽⁷⁾は蛍光顕微鏡を、Lyle⁽⁸⁾やFritzら⁽⁹⁾はFCMを用いている。当所の研究では高精度の測定を行うために、FCM法を採用した。また、Liburdyらが使用した磁界曝露用コイルと同一のものを米国エネルギー省より借用し、当所が開発したFCM用細胞培養装置をバツテル研究所のFritzらに提供するなど、国際的な協力のもとで研究を進めた。

磁界影響有りとする他所での研究との結果の相違については、測定法の違いに起因する可能性が考えられた。放射性同位元素法では曝露前と直後の時点でしか細胞内カルシウムを測定できず、細胞膜の外側に付着したカルシウムイオンも測定対象となる可能性がある。蛍光顕微鏡法では顕微鏡の視野に入る細胞のみが測定対象となり、必ずしも細胞集団全体の平均的な反応を評価していない

表2-3-1 細胞内カルシウムに関する実験結果

| 磁界強度 (mT) | 磁界特性 | 曝露時間 (分) | 繰り返し (回) | 細胞 (刺激) | 磁界反応 | 陽性反応 |
|-----------|---------|----------|----------|---------|------|------|
| 0.10 | 水平 | 30 | 3 | 胸腺 (無) | 検出せず | 反応あり |
| 0.10 | 垂直 | 30 | 6 | 胸腺 (無) | 検出せず | 反応あり |
| 0.10 | 水平 + 垂直 | 20 + 20 | 6 | 胸腺 (無) | 検出せず | 反応あり |
| 0.14 | 回転円 | 30 | 6 | 胸腺 (無) | 検出せず | 反応あり |
| 0.14 | 回転円 | 30 | 3 | 胸腺 (有) | 検出せず | 反応あり |
| 5.00 | 垂直 | 30 | 6 | 胸腺 (無) | 検出せず | 反応あり |
| 5.00 | 垂直 | 30 | 6 | 胸腺 (有) | 検出せず | 反応あり |
| 5.00 | 垂直 | 30 | 6 | 脾臓 (有) | 検出せず | 反応あり |
| 5.00 | 垂直 | 30 | 3 | 末梢血 (有) | 検出せず | 反応あり |

可能性も考えられる。FCM法では細胞内のカルシウムイオンのみを選択的に測定し、多数の細胞を高速に処理するため、細胞を満遍なく網羅し、かつリアルタイムで測定できる。当所を含め、FCM法を用いたいずれの研究機関における実験でも磁界曝露による影響を見出していない。当所で繰り返し行った実験結果を総合すると、本実験条件下では磁界の細胞内カルシウムに対する影響はないことが示唆された⁽⁰⁰⁰¹⁾。

2-3-2 チロシンキナーゼのリン酸化反応

細胞内情報伝達機構の一部を担うチロシンキナーゼは、細胞膜表面で認識された信号をチロシンリン酸化により細胞内に伝達し、細胞の機能発現等の重要な働きを制御する酵素の一つである (図2-3-3)。磁界が細胞に何らかの刺激を与えていると仮定した場合、このリン酸化反応に変化が生じることが考えられる。一般的に、神経細胞は電気的な信号により感覚、認識、学習、行動といった生命現象を司っていることから中枢神経系への影響が推測される。

このため、本実験では生後7日齢のラット小脳顆粒細胞を供試し、水平、垂直磁界がそれぞれ10mT発生可能な細胞実験用磁界発生装置 (図2-3-4) を用いて、磁界曝露強度は最大で14mTまでの50Hz回転円磁界とした。細胞は、4日程度培養し、電気的な応答に鋭敏な神経突起が伸展した状態で、磁界を曝露した (図2-3-5)。

図2-3-6、図2-3-7に実験結果の例を示すように、14mT、1時間曝露の場合に分子量約60kDa付近のチロシンキナーゼのリン酸が、対照 (非曝露) に対して再現性のある増加を示した。これに対して強度は十分の一の



図2-3-4 細胞実験用磁界発生装置

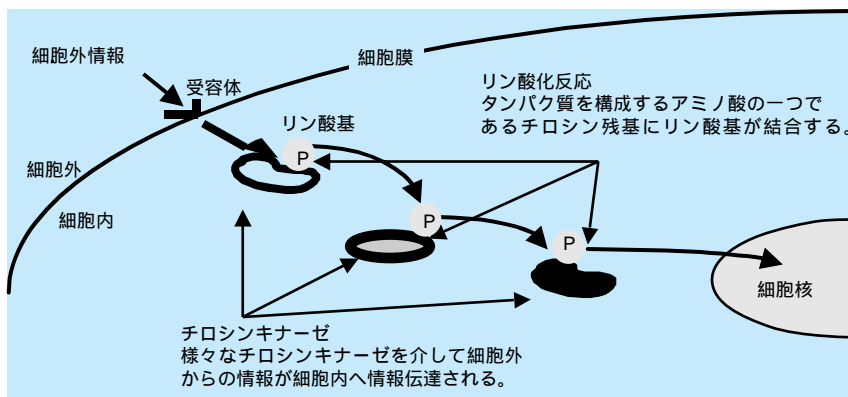


図2-3-3 チロシンキナーゼによる情報伝達の模式図

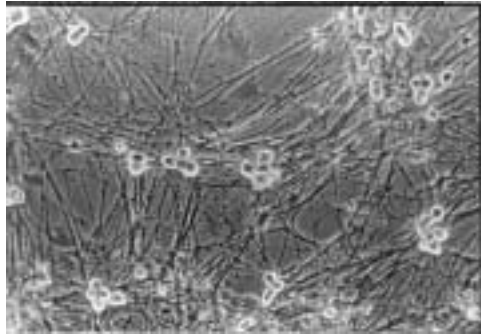


図2-3-5 実験に用いたラット小脳顆粒細胞

1.4mTの場合、この有意な変化は観察されなかった。すなわち、非常に強力な磁界強度においては、細胞の応答が観察されたが、その十分の一程度の強度では、この反応が起こらないことが明らかとなった。これらの結果は、日常生活や職場環境レベルの磁界では、今回の実験に用いた小脳顆粒細胞の細胞内情報伝達機構の一部であるチロシンキナーゼのリン酸反応に影響を与えることはない⁴²⁾と推定される。

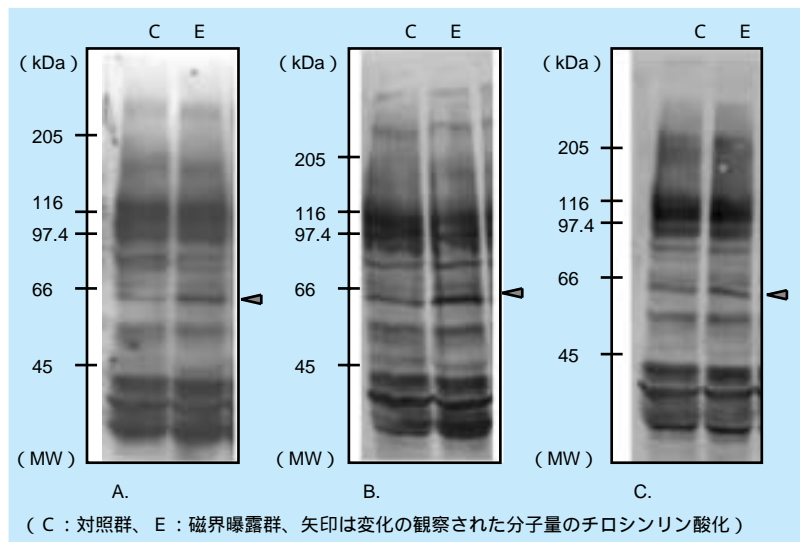


図2-3-6 14mT、60分磁界曝露後のチロシンリン酸化のX線フィルム画像

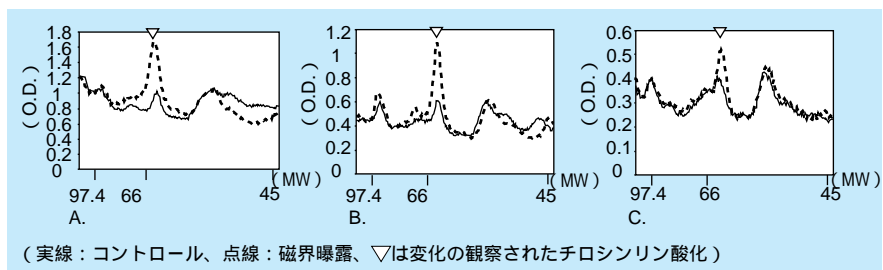


図2-3-7 X線フィルム画像のデンストメーターでの解析

2 - 4 微生物における遺伝子発現への影響

前節の実験結果は、通常の生活・職場環境の極低周波磁界が、細胞膜機能の一つである細胞内のカルシウムイオン濃度や細胞膜から細胞核への情報伝達機構のチロシンキナゼのリン酸化反応に影響を与えそうもないことを示したが、通常環境の数千倍から数万倍の強い磁界を曝露すると、後者の反応が増大することなどが分かった。

そこで、本節ではモデル生物である大腸菌あるいは酵母といった微生物を用いて、細胞内情報伝達機構の下流に位置する、ストレス応答遺伝子を含む広範な遺伝子の発現について検討した。

2-4-1 大腸菌の熱刺激タンパク質の発現

大腸菌に外部刺激として熱を与えると、環境温度の上昇に対応すべく、その細胞は特定のタンパク質を産生することが良く知られている。また、このタンパク質は他の様々な外部刺激に対しても産生されることが知られている。もし、外部からの強力な磁界が大腸菌にストレスを与えるのであれば、磁界の曝露によって、この種のタンパク質を産生することが想定される。そこで、細胞実験用磁界発生装置の磁界曝露空間に、今回特に試作した大腸菌用培養器を設置し、大腸菌を培養しつつ、磁界を曝露した。同時に、別に準備した磁界を発生させない細胞実験用磁界発生装置を用いて、対照データを確保すると共に、培養温度を30 から50 に上昇させて陽性対照とした。さらに、培養条件として、通気なし16時間と通気下6.5時間の2種類で実験を行った。それぞれの

条件で培養した大腸菌は、所定時間後に回収して、2次元電気泳動法で、タンパク質発現パターンおよび発現量を測定した。この方法は、既知のタンパク質のみでなく、未知のタンパク質でも検出が可能である。すなわち、磁界に対して未知のタンパク質が産生された場合でも、生体影響を検出することが出来るという利点がある。

図2-4-1は、30、磁界なしの培養条件、すなわち対照条件、30、14 mT円磁界の曝露条件及び50、磁界なしの条件すなわち熱刺激陽性対照条件での発現タンパク質に関する2次元電気泳動法による出力データの例である。この図は、横軸を等電点、縦軸を分子量とし、黒い斑点の部分は、その等電点と分子量を有するタンパク質が多く発現していることを示す。この例からも明らかのように、50の熱刺激を与えて培養した場合、対照培養である30での培養の時に比べて、多くのタンパク質が増加したり、減少していた。それに対して、14 mTの磁界を曝露しつつ培養しても、対照培養の時とほとんど差はなく、どのタンパク質をとってみても、その増減に統計的な有意差はなかった。つまり、最も単純なモデルとしての大腸菌は、強力な磁界でも、それをストレスと受け止めていないことが分かった⁽¹³⁾。

2-4-2 真核細胞の共通遺伝子

本項ではヒトと同類の真核細胞で、多くの共通の遺伝子を持ち、かつ、全ての遺伝子配列が明確になっている酵母細胞を用いた。酵母を培養しつつ、50Hz、10 mT

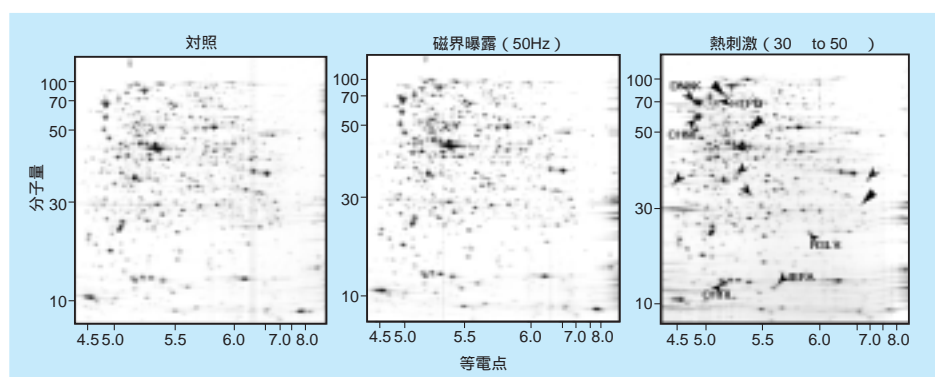


図2-4-1 大腸菌のタンパク質発現特性の例

～300mTという強力な磁界を曝露し、タンパク質のみならず、ほぼ全ての遺伝子への影響を検討した。

通気なしの通常培養を対照条件とし、陽性対照として通気培養での実験も同時に行った。それぞれの条件での培養の後、2次元電気泳動法により、約1000種類のタンパク質（全タンパクの約1/6）の発現パターンを図2-4-2に示す。同図中の矢印は、画像分析の結果、対照に比べて有意に増減したタンパク質を示している。一方、磁界を曝露した群では、そのようなタンパク質の発現変化は確認できなかった。また、DNAマイクロアレイ法により、約5900種類の遺伝子（全遺伝子の約95%）のmRNA合成パターンを分析した。その結果を図2-4-3に示す。同図において、一つ一つのスポットが遺伝子を

示し、赤いスポットは、左の条件に対して、右の条件で合成量が減少したものの、緑色は増加したものの、黄色は変化が無かったものを示す。これらの図から、対照に対して、熱刺激や好気条件の陽性対照では、多くのmRNAの合成量に変化があったのに対して、磁界を曝露したのものには、それらの変化が見られなかった。つまり、ヒトの細胞に近い、真核細胞である酵母細胞は50 Hz、300mTという強力な磁界環境下でも、そのタンパク質発現や遺伝子発現に影響を受けないことが分かった。

以上の結果、通常の生活、職場環境における磁界に比べ強力な10～300mT程度の磁界においても、細胞が直接磁界の影響を受けて、遺伝子の発現に変化が生じることはないものと推定された¹⁾。

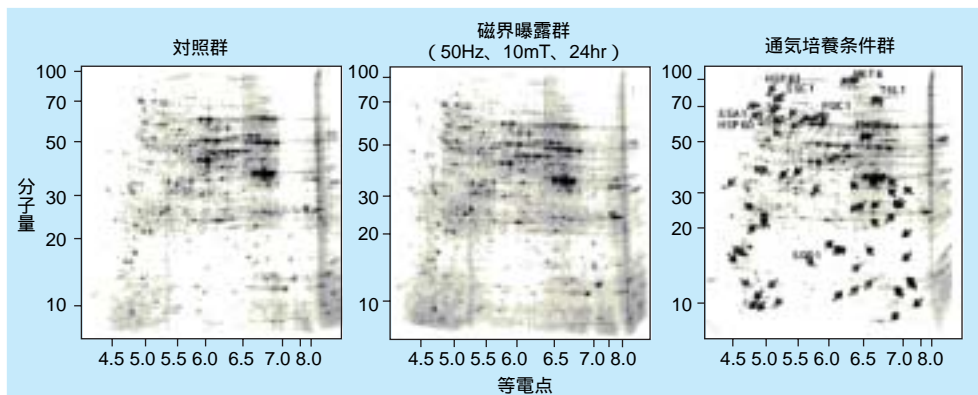


図2-4-2 酵母細胞のタンパク質合成パターン

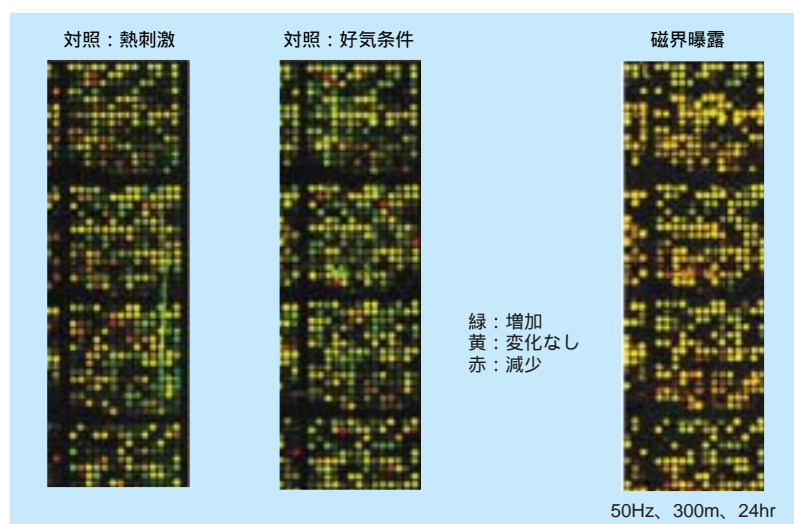


図2-4-3 酵母細胞のmRNA合成パターン

2 - 5 遺伝子変異への影響

遺伝子の損傷に与える影響は、発がん過程において最も重要なステップであるが、極低周波磁界は、そのエネルギー - があまりにも小さいため、遺伝子の変異原性、つまり遺伝子を直接傷つける作用はないものとされていた。しかし、特定の処理を施したヒト由来のメラノ - マ細胞に60Hz、400mTという極めて強力な磁界を曝露すると、この変異原性を示すことが報告されたり¹⁰⁶⁾、大腸菌に5 Tの定常磁界を曝露すると、化学物質などの変異原に対する感受性が増加する助変異原性を示す¹⁰⁷⁾ことなども報告されている。このため、当所ではサルモネラ菌及び大腸菌を用いて、この変異原性を生じる可能性及びラジカルなど変異原物質に対する助変異原性に関する実験を行った。

まず、変異原性の実験では、増殖に必要なアミノ酸を合成するための遺伝子が欠損しているサルモネラ菌と大腸菌を用い、14mTの円磁界を曝露することにより、増殖を始めてしまう、つまり復帰変異に変化が生じるかを確認した。

表2-5-1は、その実験結果の一覧表で、この表から明らかのように、3～4回繰り返し実験を行ったが、変異原性を全く観察することができなかった。さらに、ラジカルなどの遺伝子(DNA)との反応性に磁界が影響することが報告されている様々な化学変異原に対する助変異原性を検討した。

表2-5-1 変異原性の実験結果

サルモネラ菌

| 菌株 | TA1535 | TA1537 | TA98 | TA199 |
|------|--------|--------|------|-------|
| 復帰変異 | 0/3 | 0/3 | 0/4 | 0/4 |

大腸菌

| 菌株 | WP2uvrA | WP2uvrA/pkM101 |
|------|---------|----------------|
| 復帰変異 | 0/4 | 0/4 |

注) 復帰変異: 変異原性に有意な差のあった回数/実験数

その結果は、表2-5-2に示す通りで、中には有意な差を生じた場合もあるが、いずれも一貫した有意差を生じることがなかった。

以上の結果、懸念されている化学物質の発ガン作用を増加させるような作用が、通常環境に比べ極めて強い磁界においても見られないことが分かった¹⁰⁸⁾¹⁰⁹⁾。

表2-5-2 助変異原性の実験結果

| | サルモネラ菌 | | 大腸菌 | | |
|-------------------|--------|-------|---------|----------------|-----|
| | TA98 | TA100 | WP2uvrA | WP2uvrA/Pkm101 | |
| DNA反応性変異原 | ENNG | 0/4 | 0/4 | 0/4 | 0/4 |
| | AF-2 | 0/4 | 1/4 | 0/4 | 0/4 |
| | 4-NQO | 1/4 | 0/4 | 0/4 | 0/4 |
| 代謝活性化されるDNA反応性変異原 | 2AA | 1/4 | 1/4 | 0/4 | 0/4 |
| | AC | | 0/4 | 1/4 | 2/4 |
| フレームシフト型変異原 | AO | 1/4 | 1/4 | 1/4 | 1/7 |
| ラジカル型変異原 | CH | 0/4 | 0/4 | 1/4 | 1/4 |
| | BH | 0/4 | 0/4 | 2/4 | 0/4 |

注) 有意な差があった回数/実験回数

2 - 6 免疫系への影響

免疫系は、生体内への異物の進入の阻止や進入した異物を処理して生体の恒常性を維持する生体防御系に含まれ、リンパ球やマクロファージなどの免疫担当細胞による抗原抗体反応、免疫情報伝達物質の産生や分泌、異物の貪食などの機能が重要な役割を担っている¹¹⁰⁾。

本節では、免疫系に対する磁界の影響を細胞・動物レベルで明らかにするため、これら産生・分泌・貪食機能に着目し、正常な免疫機能が磁界曝露により変化するかどうかを検討した。実験では、予め培養液中や動物体内の

免疫担当細胞を刺激し活性化させて応答性を高めた上で、それらの免疫機能に与える磁界影響の有無を検討した。

2-6-1 マクロファージの機能への影響

マクロファージは、生体内に侵入した微生物に対し免疫情報伝達物質を産生する分泌能や異物を取り込んで処理する貪食能等の役割を担い、様々な生物に共通した免疫担当細胞である。マクロファージの機能のうち、分泌

能と貪食能が磁界曝露により変化するか否かを調べた。

実験は、特定病原菌のいないマウスの腹腔から採取したマクロファージに、50Hz磁界を曝露した。無曝露条件の対照群を同時に実験し、盲検法により実験者の先入観を避けると共に、同一実験を最低3回繰り返してデータの再現性を確認した。結果は群間で統計学的に比較し有意差の有無を調べた。分泌能は、情報伝達物質として重要な一酸化窒素(NO)とサイトカイン(TNF- α 、IL-1 β 、IL-6)産生量を指標とし、分泌能を働かせる刺激物質を添加した条件下で、細胞を14mTrms回転円磁界に24時間曝露後、培養液中に分泌された各物質を測定した(図2-6-1)。その結果、再現性のある変化はみられなかった⁽²⁾。マクロファージのNO、サイトカイン分泌能は磁界の影響がないとする報告が殆どであり⁽²⁾、本研究はこれらの報告をさらに裏付ける結果であった。

貪食能は、異物を模擬したビーズと共に細胞を培養しながら1.4~14mTrms回転円および1~10mTrms垂直磁界に1、2時間曝露し、細胞に貪食されたビーズ数を測定した(図2-6-2)。一部に有意差がみられたが、変化の増減は一貫せず再現性のある変化はなかった⁽³⁾。これまで報告された貪食能の研究では磁界影響の有無が混在している⁽⁴⁾。本実験ではそれらも考慮した上で実験条件を設定し定量性の高い計測手法を用いて解析・評価したが、磁界特性、強度や曝露時間に依存した反応はみられなかった。

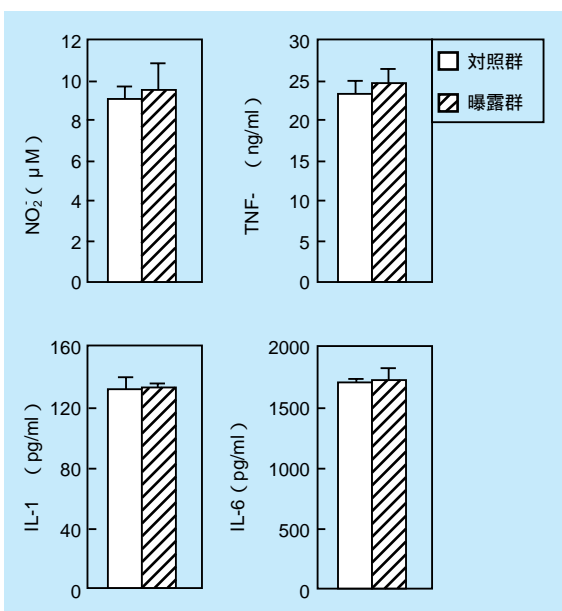


図2-6-1 分泌能の結果例

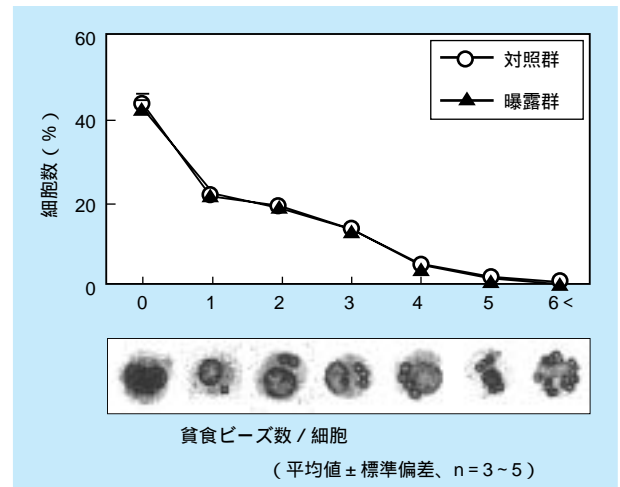


図2-6-2 貪食能の結果例(14mTrms、1時間曝露)

以上の結果から、商用周波磁界曝露はマクロファージの機能に影響しないことが示唆された。

2-6-2 免疫物質(サイトカイン)の産生量への影響

免疫系の作用は、T・Bリンパ球、マクロファージなどの免疫細胞とそれらの細胞から産生される細胞どうしの免疫情報を伝えるサイトカインの働きにより調節されている。細胞や動物を用いた磁界曝露実験ではサイトカイン分泌量への影響を示唆する研究があるため、2種類の免疫刺激により産生されるサイトカイン量に磁界の影響があるか否かを検討した。

初めに、正常動物を免疫学的に刺激した実験では、SPFの2系統の雄性マウス(C57BL/6とddY)に、50Hz、最大350 μ Trmsの回転円もしくは水平磁界を、最長12週間連続曝露した。曝露終了直後に、Tリンパ球のみを刺激する抗体(anti-CD3 mAb)、もしくはBリンパ球、マクロファージを刺激する大腸菌由来の毒素(LPS)を静脈に投与した。各サイトカインごとにその産生量が最大になる一定時間後にそのマウスから血清と脾臓を採取して、Tリンパ球から産生された5種類のサイトカイン(IFN-、TNF-、IL-4、IL-6、IL-10) Bリンパ球、マクロファージからの5種類のサイトカイン(TNF-、IL-1-、IL-6、IL-10、IL-12)の量をELISA法で測定した。

磁界の曝露実験に先立ち、実験に使う動物の均一性と当所の4つの磁界曝露室(図2-6-3)における飼育環境

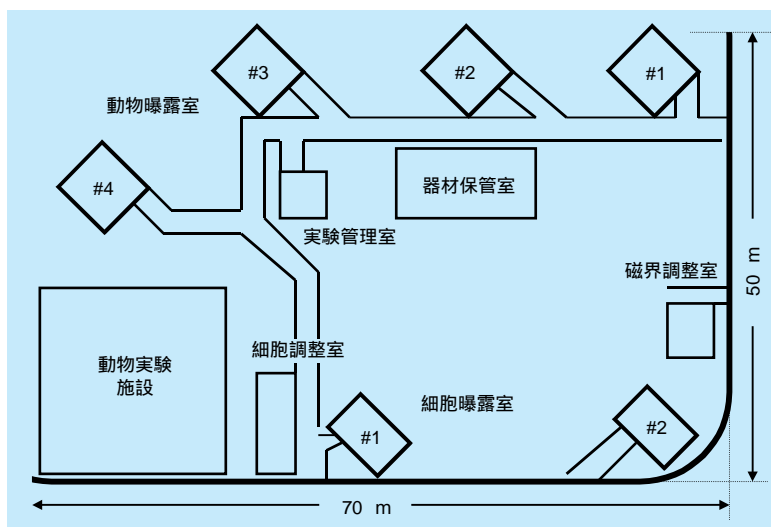


図2-6-3 研究設備の配置図

の均一性を確認するため、全ての曝露室の磁界を $0 \mu\text{T}$ として1群12匹のマウスを6週間飼育し、血清と脾臓中のサイトカイン量を測定した。その結果、全ての群間で統計学的に有意な差はなく、群間で実験条件に差のないことが確認された。

上記を確認後、動物用磁界発生装置（図2-6-4）を用い、マウスにさまざまな磁界を曝露してサイトカイン産生を測定した。実験結果をまとめたものを表2-6-1に示した。一部の条件下では磁界による有意なサイトカイン産生の変化があったが、その変化は曝露強度や曝露期間とは無関係で、再実験では再現性がなかった。また、系統の異なるマウス間でも磁界に対する反応の差異はなかった⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾。

サイトカイン産生と磁界の関係は、細胞曝露実験で Petrini ら⁽²⁷⁾がヒト末梢血細胞における IFN- γ や TNF-

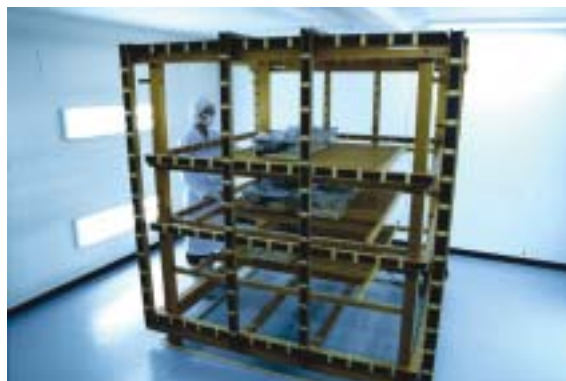


図2-6-4 動物用磁界発生用装置

表2-6-1 磁界に曝露した免疫刺激マウスのサイトカイン産出

| 刺激方法 | 抗CD3抗体投与 | | | LPS投与 | | | |
|-------|-------------------|------|---------------------------------------|---------------------|------|----------------------|---------------------|
| | 3週間 | 6週間 | | 3週間 | 6週間 | 12週間 | 12週間曝露後、1週間休止 |
| 無曝露 | - | 変化なし | | 変化なし | 変化なし | 変化なし | 変化なし |
| 回転円磁界 | 1.4 μT | 変化なし | 変化なし | 血清のIL-6に3回中1回のみ変化あり | 変化なし | 変化なし | 脾臓のIL-1に3回中1回のみ変化あり |
| | 70 μT | - | 血清のTNF- α 、脾臓のIL-6に3回中1回のみ変化あり | 変化なし | 変化なし | 脾臓のIL-12に3回中1回のみ変化あり | 変化なし |
| | 350 μT | 変化なし | 血清のIL-6に3回中1回のみ変化あり12週間曝露で変化なし | 変化なし | 変化なし | 変化なし | 変化なし |
| 水平磁界 | 250 μT | - | 変化なし | 変化なし | 変化なし | 変化なし | 変化なし |

注記：無曝露条件以外は各実験を3回繰り返した。
- 印は実験をしていないことを示す。

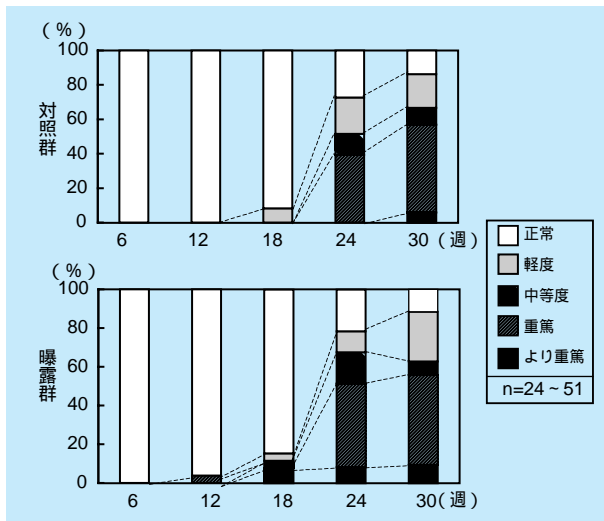


図2-6-5 50Hz、350 μ Trmsの回転磁界に6～30週間曝露したAKRマウスにおける白血病の発生と進行

の低下を、動物曝露実験ではBPAが送電線下で飼育したヒツジの血清IL-1の低下⁽²⁾を報告しているが、必ずしも一貫した結果とはなっていない。

次に、遺伝的に白血病になる性質を持ったマウス（AKR/Jマウス）に磁界を曝露することで、白血病の発病が促進されるか否かを検討した。実験は、5週齢の雌性AKR/Jマウスを、50 Hz、350 μ Tの回転円磁界に30週間曝露し、6、12、18、24、30週目で解剖して白血病の進行を病理組織学的に評価した。その結果を図2-6-5に示した。曝露群の方が若干進行は速かったが、両群間に統計学的に有意な差はなかった。また、同じ磁界条件下で行った別の24週間の実験ではむしろ曝露群の白血病進行が遅い傾向にあり、結果を総合すると本実験条件下では磁界曝露は白血病の発症・進行に影響を与えないことが示唆された⁽²⁾。当所以外でも白血病の動物実験は行われている⁽³⁾⁽³¹⁾が、ほとんどの実験で磁界の影響は認められていない。当所の実験では白血病に対抗する免疫系の機能として、臓器や血清中のサイトカイン量も同時に測定したが磁界による影響はなく、免疫機能にも影響がないことが示唆された⁽²⁾。

2-7 中枢神経系ホルモンへの影響

極低周波電磁界の中枢神経系ホルモンへの影響は、第1章で述べたように、本問題の発端が変電所従業員の不定愁訴という中枢神経系障害が、電界のためではないかとされたことに始まる。

当所における中枢神経系ホルモンに対する取り組みは早く、1980年代から米国エネルギー省との共同研究として、霊長類であるヒヒを用いた社会・学習行動及びメラトニン分泌への影響研究、北海道大学とのメラトニンに関する共同研究があり、さらに所内研究として、尿中の中枢神経系ホルモンを分析する手法の開発研究等を進めた。

2-7-1 米国エネルギー省との共同研究

ヒヒを用いた実験では、対照群、電磁界複合曝露群の各3頭の雄ヒヒに血液自動採取装置を装着し、電磁界曝露前、曝露中、曝露後のそれぞれ6週間にわたって、2時間毎に血液を採取し、血清中のメラトニン濃度の経時変化を測定した。電磁界の曝露は、変電所従業員の勤務

時間を考慮して、昼間のみの1日12時間とし、30 kV/m、100 μ Tおよび6kV/m、50 μ Tの2つのケースを採用した。

1日の時間変化として整理した測定結果の例を図2-7-1に示す。この図から明らかなように、ヒヒメラトニンの分泌量は、昼間に比べて夜間の方が多という概日リズムを有しているが、電磁界の曝露による影響はみられなかった⁽²⁾。

2-7-2 北海道大学との共同研究⁽³³⁾⁻⁽⁴²⁾

当所で開発した正方形多重コイル内で、Wistar-King雄性ラットに1～250 μ Tの回転円磁界、楕円、あるいは、垂直磁界を6週間磁界曝露した後、12時と24時に松果体及び血液を採取して、メラトニン濃度を測定した。一部の実験では、供試動物にLong Evans雄性ラットを用い、メラトニンの下位ホルモンであるテストステロン濃度も測定した。

回転円磁界を曝露した時の血漿中のメラトニン濃度の

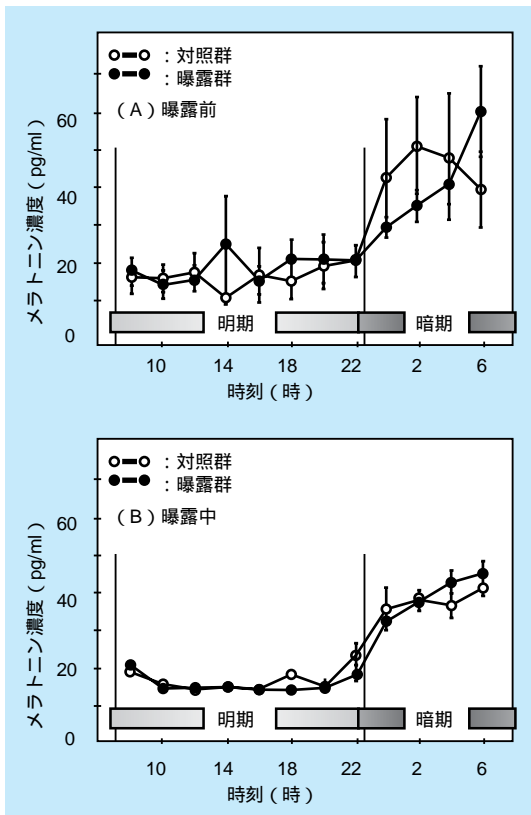


図2-7-1 ヒヒの血清中メラトニン濃度

例を図2-7-2に示す。この図から明らかなように、対照群に比べて、磁界曝露群のメラトニン濃度は昼夜ともに有意に減少した。しかし、楕円磁界や垂直磁界では、この抑制現象は観察されなかった。また、テストステロン濃度は、どの実験においても磁界の影響を受けなかった。

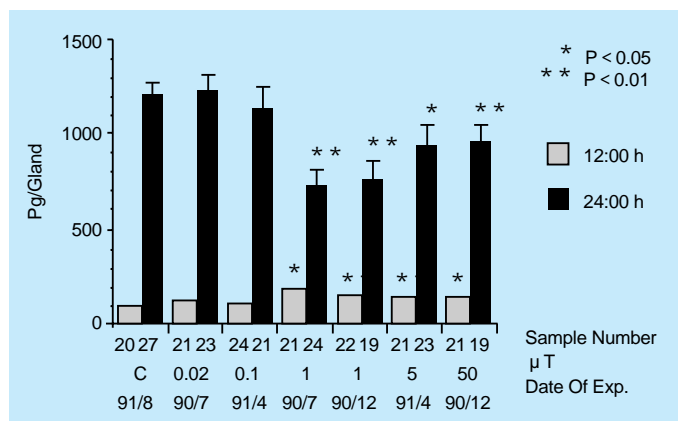


図2-7-2 回転円磁界曝露とラットのメラニン濃度

さらに、磁界曝露停止後のメラトニン分泌の回復期間を知るために、6週間回転円磁界を曝露した後、曝露停止後4週間にわたって深夜(24時)の血漿中メラトニン濃度を測定した結果、1週間以内に曝露前の状態に復帰することを確認した。

このメラトニンへの影響は回転円磁界固有の影響かどうか、さらに検討される必要があるものの、下位ホルモンであるテストステロンには影響がみられないことから、後述するような生殖障害や性ホルモンの影響を受ける腫瘍への関与を主張する仮説を支持するものではない。

2-7-3 所内研究の経緯

米国エネルギー省との共同研究では、大型実験動物であるヒヒから血液自動採取装置を用いて経時的データを確保したが、北大との共同研究では、実験動物が小型げっし類であることから、血液を定期的に採取し、同一個体での経時変化を明らかにすることができなかった。

当所では、小型実験動物を用いた磁界曝露と中枢神経系ホルモン分泌との関連性についての研究結果が関連学協会で混乱している原因の一つが、個々の供試動物の経時的データが少ないことにもあり得ると考え、実験動物の自発運動の検出システムを開発した後⁴³⁾⁴⁴⁾、尿自動採取装置を開発し、実験を行っている。

2 - 8 霊長類（ヒヒ）を用いた社会・学習行動⁽³²⁾

当所と米国エネルギー省との共同研究では、霊長類であるヒヒを用いた社会・学習行動の実験を米国サウスウエスト研究所に委託して実施した。

本共同研究は、職業者の電界曝露による中枢神経系への影響検証を目的として実施されたため、前半は電界単独曝露実験、後半は電界と磁界を重畳した電磁界複合曝露実験が行われた。前節で紹介したメラトニン分泌に関する実験は、本共同研究の後半に行われたものである。

2-8-1 電界単独曝露実験

まず、65kV/mまでの電界を曝露しても、ヒヒは忌避あるいは回避行動を起こさないことを確認した後、6頭のヒヒに対して電界の感知実験を行った。その結果、電界の感知レベルは平均12kV/m(6~16kV/m)で、これはヒトやラットで得られている強度とほぼ同じであった。以上の実験の後、社会・学習行動に関する実験を実施した。

社会行動に関する実験は、雄性ヒヒ8頭を1群として、2群のグループに十分な馴化期間を置いて、グループの社会構造を安定化させ、その後一方は電界を曝露し、他方は電界を曝露せずに、両者の社会行動の変化を継続的に観察した。一例として、30kV/mの電界を曝露している時の受動的親和行動の実験結果を図2-8-1に示す。この図から明らかなように、電界を曝露した直後ののみ、

曝露群の受動的親和行動が多くなったが、その後の変化は認められなかった。以上の結果は、初めて電界を曝露されると、静電誘導による体毛の振動により、ムズムズ感を感じ、互いによりそってこれを緩和しようとする行動するが、しばらくすると順応してしまうことを示している。

学習実験では、6頭のヒヒを質問に対する正答を出すと餌がもらえることを事前に十分に理解させる訓練をした上で、3頭に電界を曝露し、残り3頭を対照群として実験を行った。その結果、曝露直後は質問に対する正答率は変化しないものの、社会行動の場合と同様に、質問に答えようとする行動が減少した。これは、社会行動と同様に、ムズムズ感の方に意識が集中したことによるものと思われる。

2-8-2 電磁界複合曝露実験

電力設備保守従業員は、電界のみならず磁界にも曝露されていることから、共同研究の後半は電磁界複合曝露の条件で実験を行った。

社会行動は電界単独曝露実験の時と同一の方法が取られたが、電磁界曝露直後および曝露期間中を通じて電界の時のような一過性の行動変化は観察されなかった。また、学習行動に関しても電磁界の複合曝露の有害な影響は認められなかった(図2-8-2)。

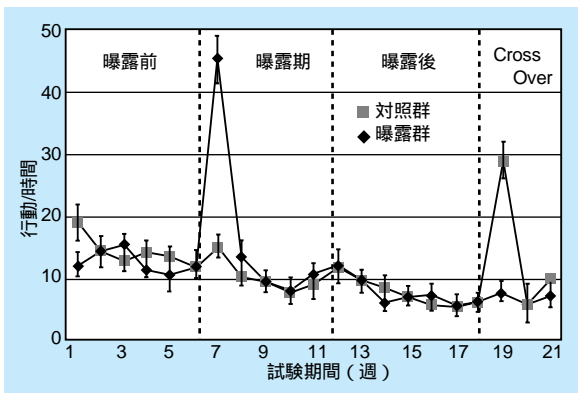


図2-8-1 受動的親和行動の経時変化

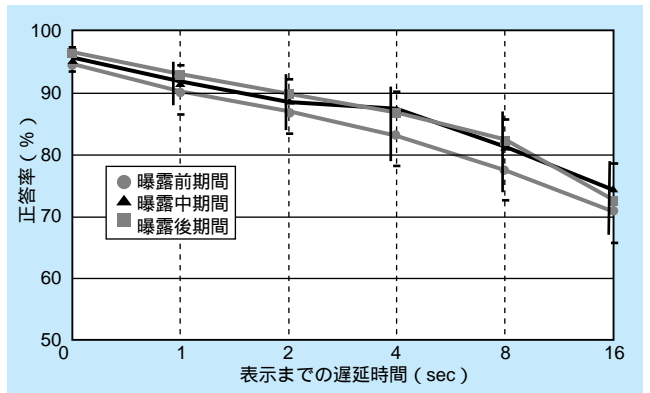


図2-8-2 短期記憶能力の実験結果

2 - 9 生殖機能への影響

生殖は動物が種を維持・繁殖させる上で最も基本的、かつ、重要な機能である。この生殖機能に対し、一部の疫学調査が影響を示唆していたことから、当所では早くから商用周波電界および磁界の生殖への影響を実験動物を用いて調べてきた。

最初に、商用周波電界の影響について調べた。卵子が受精し、母親の体内で盛んに細胞分裂をしている胚・胎児期間は、外部からの刺激の影響を生物学的に最も受けやすいため、妊娠したハムスターに商用周波電界を曝露して、妊娠動物及び胎児への影響に関する動物実験に取り組み、1980年代後半には、商用周波電界が、妊娠動物の生殖機能及び胚・胎児の発育・発達に影響を与えないことを確認した。

引き続き、免疫機能に及ぼす影響実験で使用した動物用磁界曝露設備を用いて、妊娠動物及びその胎児への磁界影響実験を実施した。受精したラット及びハムスター

を用い、様々な期間に0 (sham)、7、70、350 μ Tの回転磁界を曝露した。さらに、実施環境や実験動物の観察・検査内容、方法は、国の定める毒性試験法に関するガイドラインに準じて実施した。1群の動物数は25匹以上とし、胎児を摘出して、外表、臓器、骨格などを検査した。観察結果に研究者の主観が入ることを避けるため、各群の磁界曝露強度は研究者には伏せたままで実験を行い、データの再現性の確認のため、原則として、実験はそれぞれ2回以上繰り返して実施した。6年間にわたる実験結果は表2-9-1の通りであった。なお、ラットを用いての試験は資源エネルギー庁からの受託研究として実施したものである。

この表から分かるように、ハムスター及びラットに、妊娠前後の様々な期間に磁界を曝露しても、その胎児には全く影響がみられなかった。また、雄親および母動物の生殖機能にも磁界曝露の影響はみられなかった⁽⁶⁾⁻⁽⁷⁾。

表2-9-1 生殖に関する動物実験結果

| 供試動物 | 曝露時期 | 実施回数 | 磁界曝露の影響 | | | |
|-------|------------|------|---------|----|---------|---------|
| | | | 雄親 | 雌親 | 胚・胎児の発育 | 胎児の器官形成 |
| ハムスター | 精子形成期～出産前日 | 3 | なし | なし | なし | なし |
| ハムスター | 器官形成期 | 2 | - | なし | なし | なし |
| ラット | 器官形成期 | 2 | - | なし | なし | なし |
| ラット | 着床前期 | 2 | - | なし | なし | なし |

- : 検査を実施せず

2 - 10 発がんに対する影響

がんに至る過程は複雑であるが、イニシエーション、プロモーション、プログレッションの3段階に整理されて論じられることが多い(発がんの多段階仮説)。イニシエーションとは、何らかの刺激により遺伝子が損傷を受け、細胞が潜在的にがん細胞化する過程をいう。プロモーションとは潜在的にがん化した細胞が増殖を始め、顕在化する過程をいう。プログレッションとは、がん細胞が浸潤・転移などの性質を示し、悪性化する過程をい

う。本節では、実験動物を用い、イニシエーションおよびプロモーションの両過程への影響を調べた発がん性試験、および、発がん物質によって誘発した乳腺腫瘍および発がん物質とプロモーターにより誘発した皮膚腫瘍に対するプロモーション作用に関する影響試験について述べる。なお、以下に記載の発がんに関する試験は、資源エネルギー庁からの受託研究として実施したものである。

がんに関する試験では、多数の動物を一度に試験出来

るように、生殖試験で用いたコイルと同機構で、容積で2倍以上の均一磁界が発生可能な4つの正方形多重コイルを同一建屋内（図2-10-1）に設置して実験を行った。また、生殖に関する試験と同様に、実験の実施環境は、国の定める毒性試験法に関するガイドラインに準じ、動物の観察、分析に当たっては、結果に研究者の主観が入らないよう、被実験動物個体と磁界曝露強度との関係は研究者には伏せたままで実施した。

2-10-1 乳がんを指標にした発がん性試験

極低周波磁界は、その量子としてのエネルギー - レベルがあまりにも低く、直接遺伝子（DNA）に作用して損傷を与えることはなく、従って、単独ではがんを引き起こさないというのが、関連学協会の共通した認識である。本節は、これを動物実験を通して検証した試験結果について取りまとめたものである。

試験では7週齢の雌ラットを用い、0（sham）、7、70、350 μ Tの円磁界曝露4群に加えて、発がん物質であるDMBAを90mg/kg投与した陽性対照群、無処置の陰性対照群の6群を準備し、磁界曝露群は8週齢から30週間にわたって、磁界を曝露した。各群は60匹とし、毎週触診により乳腺の結節（しこり）の発生状況を測定すると共に、曝露後に解剖検査を行った。

図2-10-2に、その結果を示す通り、発がん物質であるDMBAを投与した陽性対照群では、投与から6週目に最初の結節が観測され、30週経過すると、約98%のラットの乳腺にしこり、すなわち、乳腺腫瘍が観察され

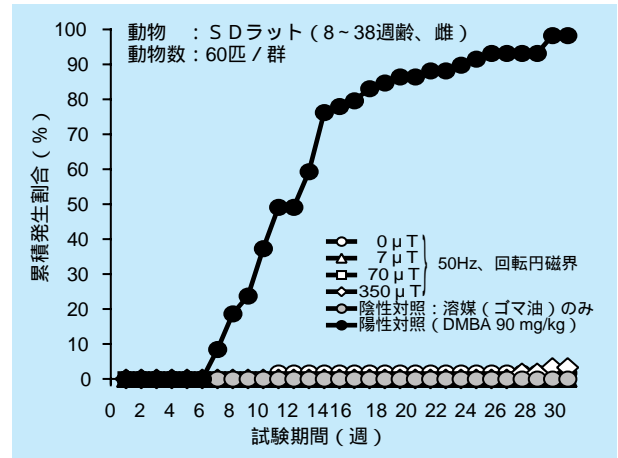


図2-10-2 発がん性試験結果

た。これに対して、磁界を曝露した群では、30週経っても通常の発生率に相当する5%未満であり、かつ、その頻度は曝露磁界の強さに依存していなかった⁽⁴⁸⁾⁽⁴⁹⁾。

商用周波磁界曝露による発がん性試験は、これまで米国毒性試験プログラム（NTP）⁽⁵⁰⁾やわが国⁽⁵¹⁾においても行われており、我々の結果と同様に磁界の影響を全く観察していない。すなわち、極低周波磁界は実験動物であるラットにおいて、単独ではがんを引き起こさないと推定される。

2-10-2 乳腺腫瘍に対するプロモ - タ - 効果検証試験

続いて、発がん性試験と同様に、雌ラットを用いて、乳腺腫瘍に関するプロモ - タ - 効果検証試験を実施した。イニシエーターとして発がん性試験の陽性対照群と同様

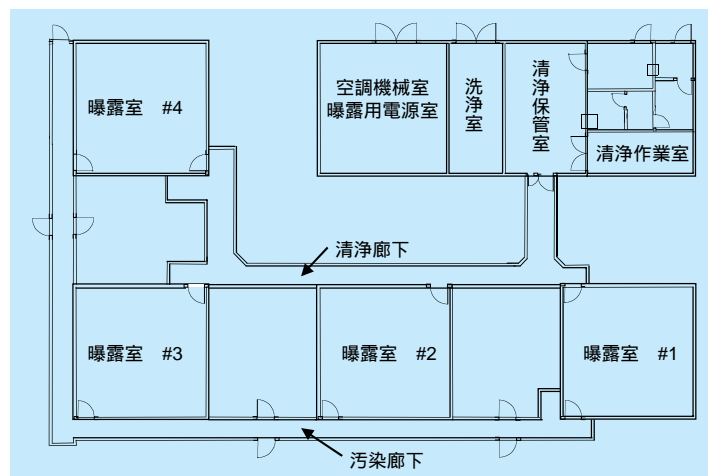


図2-10-1 動物用大型磁界発生コイルのレイアウト図

にDMBAを用いた。プロモ - タ - 効果の評価に適した用量として、最大反応を得る用量の約1/3の用量を採用した。磁界曝露群は0 (sham)、5、50、250 μ T 水平磁界の4群とし、磁界曝露前にDMBAを投与した。さらに、無処置の陰性対照群、磁界曝露群と同量のDMBAを投与の後、プロモ - タ - としてよく知られているコ - ノオイルを餌に混入して飼育した陽性対照群の合計6群 (各群60匹) を準備して、磁界曝露群には、所定の磁界を曝露しつつ、26週間にわたって、毎週結節の発生を観察した。そして、26週間後には、全例を解剖して、詳細な病理検査、組織学的検査を行った。

図2-10-3にDMBA投与時からの触診による乳腺部結節の累積発生割合の推移を示した。観察期間中、結節の発生に磁界曝露の影響はみられなかった。なお、本実験では、陽性対照物質であるコーン油投与の影響は明瞭でなかったため、図には含めていない。また、表2-10-1に病理組織学的検査結果を示した。観察された結節の90%以上は腺癌であり、これらの発生に磁界曝露の影響はみられなかった。また、少数の動物にみられたその他の腫瘍の発生率にも曝露磁界の強さに依存した変化は

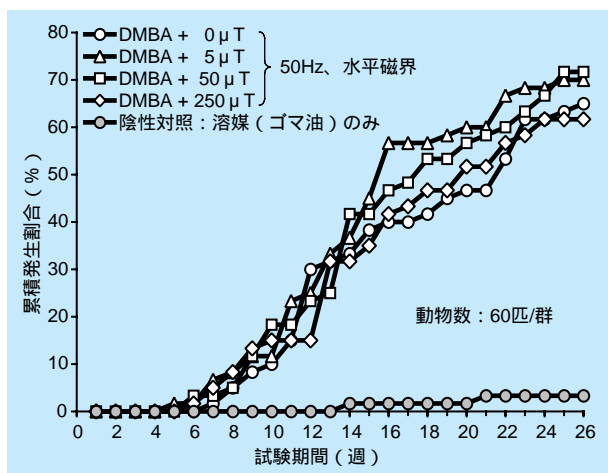


図2-10-3 乳腺腫瘍プロモーター作用検索試験結果

表2-10-1 乳腺の病理組織検査結果

| 群 | 0 μ T | 5 μ T | 50 μ T | 250 μ T | 陰性対照 | 陽性対照 |
|------------|-----------|-----------|------------|-------------|------|------|
| 動物数 (匹) | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| 前腫瘍性病変 (%) | 18 | 10 | 17 | 20 | 10 | 25 |
| 腫瘍性病変 (%) | 68 | 65 | 72 | 58 | 5 | 58 |
| 腺腫 (%) | 8 | 7 | 5 | 5 | 3 | 7 |
| 線維腺腫 (%) | 5 | 15 | 3 | 12 | 0 | 10 |
| 腺癌 (%) | 63 | 62 | 72 | 53 | 3 | 70 |

みられず、他の臓器への転移等の悪性の兆候もみられなかった。

以上の結果から、極低周波磁界にはラットの乳腺腫瘍の発生・成長に対するプロモ - タ - 効果はないものと推定された^{(52)~(54)}。

極低周波磁界が、腫瘍の発生・成長に対してプロモーター効果を持つのではないか、という議論は、Löscherらが行った実験結果⁽⁵⁵⁾に端を発している。この結果に関心を持ったBoormanらは、米国毒性試験プログラム (NTP) の一環として、これの再現性確認実験を行ったが、この効果を再現できなかったと報告している⁽⁵⁶⁾。今回、我々の行った実験とあわせて、3ヶ所でほぼ同一の手法を用いて、DMBAをイニシエ - タ - として投与したラットに対する約半年間の極低周波磁界のプロモ - タ - 効果検索試験が行われたことになる。しかし、Löscherらが影響ありと示唆し、Boormanらと当所は影響なしとの結果を得ており、一致していない。このように結果が一致していないことに対する理由を断定する段階には至っていないが、今後、細かな実験条件の違いや、用いた動物の遺伝的背景の違いについて議論を進め、Löscherらの報告が再現性のある現象なのかどうかについて確認する必要がある。

2-10-3 皮膚腫瘍に対するプロモ - タ - 効果検証試験

化学発がん物質による皮膚腫瘍の発生・成長に関し、特に感受性の高いマウスを用いて実験を行った。このモデルでは、発がん物質DMBAの1回の塗布だけでは皮膚腫瘍はほとんど生じない。その後、定期的にプロモーター作用を持つ物質を塗布することにより、皮膚腫瘍が発生する。プロモ - タ - 作用を持つ物質であるTPAの用量は、プロモ - タ - 効果の評価に適した用量として、最大反応を得る用量の1/2 ~ 1/3に相当する用量を採用した。実験では、6 ~ 7週齢の雌マウスの皮膚にDMBAを1回塗布し、翌週から既知のプロモーターであるTPAを週1回、25週間にわたり塗布した。磁界曝露群は0 (sham)、7、70、350 μ T 回転円磁界の4群とし、溶媒であるアセトンのみを塗布した溶媒対照群の合計5群 (各群100匹) を準備して、磁界曝露群には、所定の磁界を曝露しつつ、25週間にわたって、毎週結節

の発生を観察した。25週間後には、全例を解剖して、詳細な病理検査、組織学的検査を行った。

図2-10-4に皮膚結節（腫瘍）の累積発生割合の推移を示した。観察期間中、結節の発生に磁界曝露の影響はみられなかった。また、表2-10-2に皮膚の病理組織学的検査結果を示した。観察された結節の98%以上は良

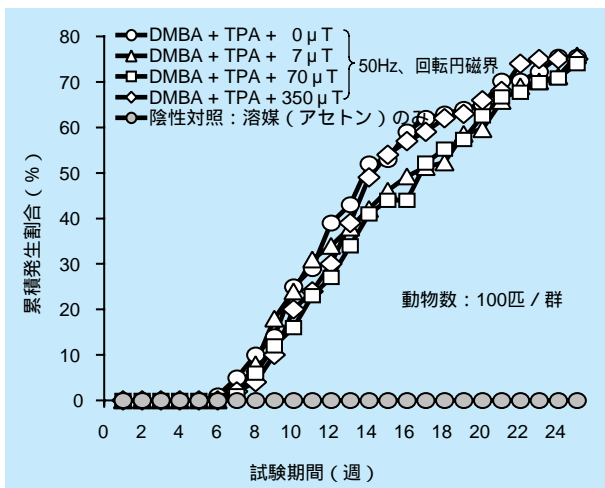


図2-10-4 皮膚腫瘍プロモーター作用検索試験結果

表2-10-2 皮膚の病理組織検査結果

| 群 | 0 μT | 7 μT | 70 μT | 350 μT | 陰性対照 |
|------------|------|------|-------|--------|------|
| 動物数 (匹) | 100 | 100 | 100 | 100 | 99 |
| 前腫瘍性病変 (%) | 16 | 19 | 10 | 18 | 0 |
| 腫瘍性病変 (%) | 68 | 72 | 71 | 67 | 0 |
| 乳頭腫 (%) | 67 | 70 | 70 | 66 | 0 |
| 扁平上皮癌 (%) | 3 | 4 | 2 | 3 | 0 |
| 角化棘細胞腫 (%) | 2 | 1 | 3 | 0 | 0 |

性の乳頭腫であり、これらの発生・成長に磁界曝露の影響はみられず、これらが悪化する兆候もみられなかった⁽⁵⁷⁾。

皮膚腫瘍の発生・成長に対する磁界曝露のプロモーター効果に関する影響については、これまでにスウェーデン⁽⁵⁸⁾、カナダ⁽⁵⁹⁾、米国⁽⁶⁰⁾においても行われており、我々の結果と同様に、磁界の影響はないとしている。

以上の結果から、皮膚腫瘍の発生・成長に関しても、極低周波磁界にプロモーター効果がないことが明らかとなった。

2 - 11 まとめと今後の課題

これまで一部の疫学調査が示唆している健康影響に科学的根拠があるのであれば、実験動物に極低周波磁界を曝露することにより、それを示唆するような生物学的変化が観察されるはずであり、細胞・分子レベルあるいは生体防御、生体調節機能などの生理学的諸機能のどこかに、磁界が直接影響を与えるはずである、という研究仮説の基に、当所は、培養細胞や実験動物を用いた磁界曝露実験を実施してきた。本章で紹介した様々な生物学的研究で得られた結果を集約すると表2-11-1のようになる。

細胞・分子レベルの研究では、14mTという強力な磁界環境下で、細胞内情報伝達に関わっているチロシンキナーゼのリン酸化反応の増加が観測されたが、その十分の一の1.4mTでは、その現象は引き起こされず、その他の細胞内カルシウムイオン濃度や、大腸菌、酵母菌の遺伝子発現には磁界の影響を見出せなかった。

生体防御機能については免疫機能を対象として細胞レ

ベルあるいは動物曝露実験を実施したが、免疫機能発現の上流に位置するマクロファージの機能や、免疫担当細胞間での情報伝達に重要なサイトカインの産生量には時折り影響を示唆するようなデータもみられたが、繰り返した実験では再現されず、しかも、磁界の強さにも依存していなかった。また、中枢神経系ホルモンの分泌では、ラットを用いた実験で回転円磁界という特殊な磁界の曝露でメラトニンの分泌が抑制される現象が観察されたが、楕円磁界や直線磁界での変化は観察されず、性ホルモンの一つであるテストステロンの分泌にも影響は認められなかった。以上のように、様々な曝露実験を行っていたが、磁界の生物影響を説明できるような一貫性のあるデータは得られなかった。

また、霊長類であるヒヒを用いた社会・学習行動といった中枢神経系に関する研究、実証的研究として実施したラットなどのげっし類を用いた生殖、腫瘍に関する研究では、極低周波磁界がこれらの生体指標に影響を与え

表2-11-1 当所における商用周波磁界の生物影響研究結果のまとめ

| 研究分野 | 研究内容 | 対 象 | 供試材料 | 磁界強度、特性 | 結 果 |
|-------------|------|-----------------|------------|-----------------|--------------------------|
| 細胞・分子レベル | 情報伝達 | 細胞内カルシウムイオン濃度 | ラット脾臓、胸腺細胞 | 0.1～5mT、垂直 | 影響なし |
| | | チロシンキナーゼのリン酸化反応 | 小脳顆粒細胞 | 1.4、14mT、円 | 14mT増加 1.4mTなし |
| | 遺伝子 | 熱刺激タンパク質発現 | 大腸菌 | 14mT、円 | 影響なし |
| | | mRNA発現 | 酵 母 | 300mT、垂直 | 影響なし |
| | | タンパク質発現 | | | 影響なし |
| | | 変異原性、助変異原性 | 大腸菌 | 14mT、円 | 影響なし |
| サルモネラ菌 | 影響なし | | | | |
| 生体防御・調節系レベル | 免 疫 | 食食、分泌機能 | マウスマクロファージ | 1～14mT、円、垂直 | 影響なし |
| | | サイトカイン | マウス | 1～350μT、円、水平 | 影響なし |
| | 内分泌 | メラトニン | ラット | 1～350μT、円、水平、楕円 | 円磁界でやや抑制 楕円、水平磁界で影響なし |
| | | | ヒビ | 50～100μT、水平 | 影響なし |
| | | テストステロン | ラット | 1～350μT、水平 | 影響なし |
| 疫病/障害 | 中枢神経 | 社会・学習行動 | ヒビ | 50～100μT、水平 | 影響なし |
| | 生 殖 | 妊娠障害、胎児奇形 | ラット | 7～350μT、円 | 影響なし |
| | | | ハムスター | 7～350μT、円 | 影響なし |
| | 腫 瘍 | 発がん性 乳腺腫瘍促進 | ラット | 7～350μT、円 | 影響なし |
| | | | | 7～350μT、水平 | 影響なし |

るという何らの科学的証拠も得ることができなかった。これらの結果は、米国RAPID計画の中で実施された研究結果と同様であった。

しかし、学術的に全てが解明された訳ではなく、前述のように、生物学的には説明できない実験結果や、再現性は全くないものの、統計的に有意な差を示すデータも

混在する。これらを明らかにするため、学術的な研究により、より信頼性の高い知見を得る努力が必要である。

また、一部の疫学調査で示唆されている様々な種類の腫瘍（例えば、脳腫瘍、白血病）の促進効果に関しても動物実験を実施し、疫学調査結果と生物学的知見の乖離の解明が求められている。