

図 3

そしてそれぞれの周波数成分の積分値 (0.5Hz から 3Hz までの間の面積) をネットワークオシレーションの強さの指標とするものである。

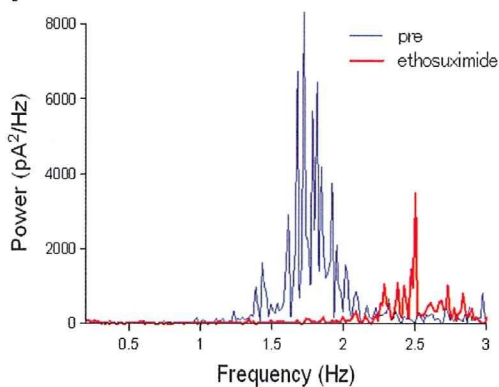


図 4

対照群と曝露群につき記録全例に対し (すなわちネットワークオシレーションの有無にかかわらず) このようにして得られた積分値 (Power) の平均値を集計した結果が図 5 である。コントロール群はスライス数 8 (ラット数 3)、磁界曝露群はスライス 8 例 (ラット 4 匹) であり、有意差がないことが明らかである ($p = 0.88$)。

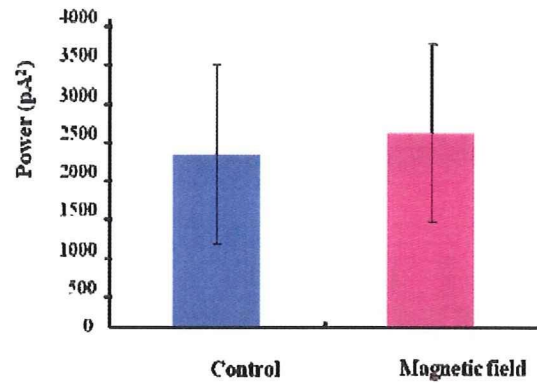


図 5

3) 慢性定常磁界曝露の効果

次に 1 週齢から 14 日間 50Hz・40 μ T の均一磁界を連続的に曝露した条件での比較検討を行った。まずは対照群動物標本からの記録を以下に示す。

Control, chronic

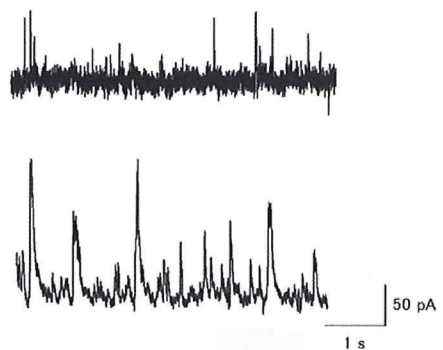


図 6 : コントロール群

この例でも、抑制性神経回路オシレーションが顕著でない例 (上段) と、比較的明らかに出現している例 (下段) の両者が観察されている (図 6)。

そして以下に 2 週間の慢性曝露例を示す (図 7)。

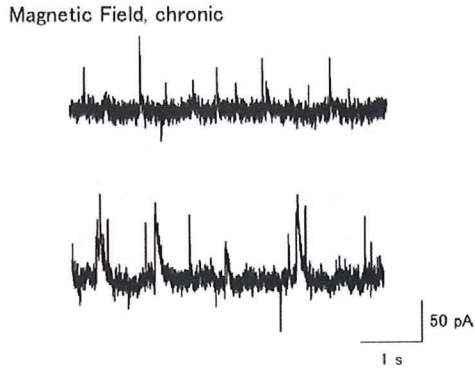


図7：慢性磁界曝露群

やはり、一部に抑制性神経回路オシレーションが見られたがこの例では大きさが小さい傾向が見られた。

これらに関し、オシレーション強度を波数密度解析により集計した結果を下に示す(図8)。コントロール群はスライス数(ラット数3)、磁界曝露群はスライス例(ラット3匹)であり、有意差がないことが明らかである ($p = 0.82$)。

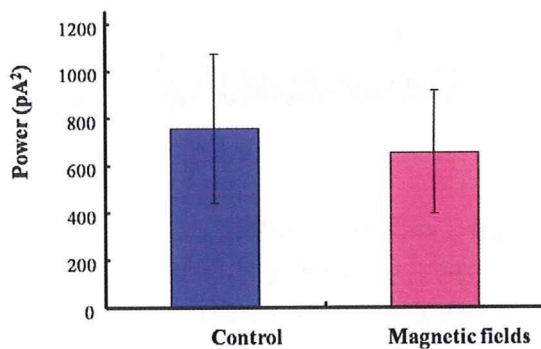


図8

これらの結果でも両群において有意差はなかった。

さらに顕著な抑制性神経回路オシレーションが発現した記録例につき、それらの特

徴を精査し、4群(急性・慢性、対照群・曝露群)について比較したものが以下のグラフである。(n = Acute Control:8, Acute MF:8, Chronic Control:14, Chronic MF:14)

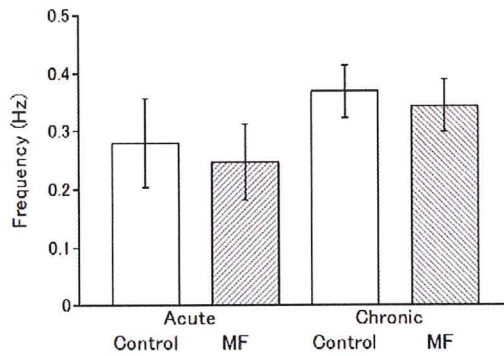


図9：オシレーション発生時の周波数

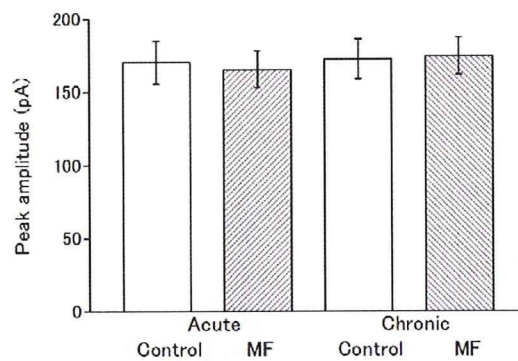


図10：最大振幅

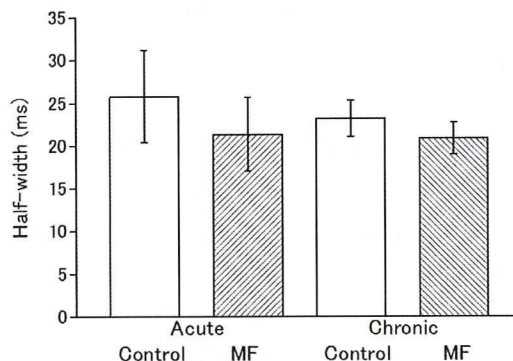


図11：時間幅

これらに見られるように、各リズム現象の

内容においても磁界曝露による有意な影響は見られなかった。もしも磁界のような脳全体を取り巻く物理環境が精神現象に影響を与えるとすれば、それは単に個別の神経細胞や受容体蛋白に作用するだけでなく、何万もの構成成分からなる複雑なネットワークに全体的に働きかける総合的効果と考えるのがきわめて自然である。その点、今回のような実験系は他に例をみない鋭敏かつ定量性に優れたユニークな指標を提供したものと考えられる。

本研究では磁界曝露は扁桃体神経回路におけるシステム活動に顕著な影響をもたらさなかった。今後さらに、1) 曝露条件を時間・強度ともに変える、2) 動物の生育環境にストレスなど複合的影響を加える、3) 曝露開始の日(週) 齢を広範に設定する、4) これまでに抑制性神経回路オシレーションを調節することが知られているドーパミンの修飾作用に対する磁界の影響検討を加味する、等の発展を加えることが期待される。

考察

今回は急性および慢性的の2種類の均一磁界曝露条件を設定し、扁桃体シナプス伝達の統御機能に対する影響を検討した。その結果、いずれの条件でも磁界曝露群において対照群との差は見られず、磁界曝露の影響があるとは言えないという結論を得た。

今回の検討課題の指標として用いた、扁桃体ニューロンで得られる抑制性神経回路オシレーション活動は、近年我々の研究グループが精力的に解析を進めている極めてユニークな神経活動である。その本態はGABAニューロンが錐体ニューロンに対してもたらず抑制性神経伝達であるが、非常に巨大なサイズと1Hz前後での周期的なリズム性に特徴がある。このリズム活動は最

終的な実体として抑制性伝達であるので、GABAの拮抗薬によって消失するのは当然であるが、興奮性神経伝達物質であるグルタミン酸の拮抗薬によっても消失する。すなわち単純にGABAニューロンそのものが自発的なオシレーション活動を発しているのではなく、神経回路の複雑なインタラクションの結果一定のリズムが発生し、なおかつかなりの数の集団的ニューロン群の協調した同期的活動を出現させていると言える。この点が他に例を見ないユニークな現象であると言える。その意義についてはまだ推測の域を出ないが、扁桃体が辺縁系神経核の中でも情動発現において中心的な位置を占め、また海馬等との緊密な線維連絡から考えられるように、このような神経回路が発生するリズムは「情動的覚醒時に記憶が長期に固定される」現象を支えるメカニズムである、との期待が持たれている(Pare, 2004)。

2. 妊娠マウスへの影響(久保田、郭、深津)

生殖系への影響を明らかにするため、ICR mice(妊娠マウス)(コントロール3匹、曝露群3匹)を低周波磁界(50Hz, 40 μ T)に16日間曝露し、胎児の生死、奇形の有無および母獣への影響で評価した。実験は2回実施した。その結果を表1に示す(久保田分担研究報告書を参照)。

1回目の実験では、コントロールでは、34匹の胎児で、死亡0匹、奇形も見られなかった。低周波磁界曝露群35匹の胎児中3匹の胎児死亡が見られたが、コントロールとの比較(χ 二乗検定)で有意差はなかった($p>0.05$)。奇形も見られなかった。2回目の実験では、コントロールでは、45匹の胎児で、死亡2匹、奇形は見られなかった。低周波磁界曝露群で45匹の胎児中

1匹の胎児死亡が見られたが、コントロールとの比較（ χ^2 二乗検定）で有意差はなかった（ $p>0.05$ ）。奇形も見られなかった。母獣に下痢は見られず、行動異常も見られなかった。ただし、行動異常の有無は、観察のみでなく、Y字型迷路を用いる等で、空間認識能力に影響がないかを、今後検討する必要がある。

以上のように、低周波磁界に曝露した妊娠マウス（母獣）及び胎児には影響はなかった。なお、低周波磁界に曝露した妊娠マウスとコントロール妊娠マウスの主要臓器（脳、肺、心臓、腎臓、肝臓）のタンパク質の発現を解析しているが、まだ解析途中であり、まとめた結果を22年度に報告する。

考察として、コントロール群および磁界曝露群の胎児に死亡例が見られたが、文献(9)にも記載されているように、自然の胎児死亡率の範囲内であり、問題はないと考えられる。

表1 低周波磁界曝露の妊娠マウスへの影響

1回目

	低周波磁界 (匹)			コントロール (匹)		
	n1	n2	n3	n1	n2	n3
生存(正常)	13	13	9	15	14	5
胎児死亡	着床期	0	0	0	0	0
	成長期	2	0	1	0	0
奇形	0	0	0	0	0	0

2回目

	低周波磁界 (匹)			コントロール (匹)		
	n1	n2	n3	n1	n2	n3
生存(正常)	16	15	14	17	15	13
胎児死亡	着床期	1	0	0	0	0
	成長期	0	0	0	1	1
奇形	0	0	0	0	0	0

3 精子への影響 (奥野、久保田、深津、郭)

1. 体重、体脂肪、精巣重量における磁界曝露の影響

まず、形態的な異常が見られないかを見たが、特に異常は見られなかった。また、体重、体脂肪、精巣重量を測定した。図1に400 μ Tで15日間曝露した結果を示した。いずれもコントロール群と磁界曝露群との間に優位な差は見られず、磁界による影響は見られなかった。なお、400 μ Tの結果(図2)に示されるように、40 μ Tと400 μ Tの間にも有意差は見られなかった。ここで体脂肪としては、体脂肪の指標として広く用いられている精巣に付着している脂肪の重量である。

体脂肪を量った意義は、体脂肪は脂肪細胞の肥大に関連し、そして精子形成にも関与するといわれているレプチン (Brash, I. A. et al., 1996; Tena-Sempere, M & Barreiro, M. L., 2002) はこの脂肪細胞から分泌されるからである。磁界曝露群の方が多少脂肪量が多いように見えるが、測定数(n)が小さいため、有意差はなかった。今後データを蓄積する必要がある。脂肪量に有意な差が見られないことはレプチン分泌量にも差がないであろうことを予想させた。

2. 磁界曝露によるストレス

磁界曝露がマウスにどれほどのストレスを与えるかを検討した。ストレスホルモンであるコルチコステロンを磁界曝露直後、8日目、14日目に測定した。マウスは非常にストレスを感じやすい。血液採取による方法では採取の過程そのものがストレスを与え、ホルモン量を変化させる可能性がある。そこで糞からの測定を試みた

(Touma, C. et al., 2003)。糞はおよそ10時間前の血中ホルモン量を反映しているといわれている。

図3はその結果である。測定数(N)が少ないことと絶対値としてのばらつきが大きいため、測定数をさらに増やす必要があるが、40 μ Tと400 μ Tのいずれにおいても0日目にストレスが多くかかっているが、日を追って減少し、14日目ではほとんど無くなっていることが分かった。これは曝露のためのケージが小さいため、そこに入れた直後に高いストレスが生じたと考えられる。磁界曝露の前に、実験ケージに入れ、数日の馴致期間をとることが考えられるが、今回の実験では精子形成に関わる影響を見るために離乳直後からの2週間という期間に重点をおいた。この点に関しては見当の余地がある。しかし、14日目の値では40 μ Tと400 μ Tともほとんど同じ値であり、且つコントロールともほとんど差がなかったため、磁界曝露の影響はないといえるであろう。

3. 精子の密度と運動性に対する磁界の影響

精子形成における磁界の影響を調べた。オスICRマウスでは、生後5~6週間で精巣上部尾部に精子が出現する。そこで離乳(3週齢)後2週間の間連続的に磁界に曝露し、精子形成における影響を調べた。マウスで射出精子を得ることは難しいため、運動能を獲得した成熟精子が現れる精巣上部尾部を曝露2週間後(5週齢)に摘出し、そこから出来る限り精子を搾り出して一定量の希釈液に希釈してその密度を量ることとした。この方法では運動性の悪い精子も多量に混入してくるため、一般の精子調整法に比べると

運動率はかなり悪くなる。

図4は得られた精子密度で、 $40\mu\text{T}$ では全く影響がなかった。また $400\mu\text{T}$ ではむしろ磁界曝露の方が高い値を示したが、これはコントロール群にほとんど無精子の個体がいたためである。5週齢は精子が出現するクリティカルな時期なので、今後はもう少し曝露期間を伸ばし、普通の条件ではほぼ確実に精子が出現する時期まで曝露を行うことを計画している。

次に精巣上体尾部に出現している精子の運動率を調べた。上述したように、今回の方法では見かけの運動率が悪くなる傾向にある。遊泳運動をしている精子と頭部や尾部の一部をガラス上に付着させているために遊泳は指定ないが、鞭毛を運動させている精子を運動精子としてカウントした。図5にその結果を示した。 $40\mu\text{T}$ ではコントロールとの差は全く見られなかった。また、 $400\mu\text{T}$ ではコントロール群が非常に悪かった。これは図4で明らかなように、精子密度が少なく、精子形成が少し遅れていることを示している。この点からも、もう少し実験期間を長くして、正常飼育でほぼ100%精子が出現する時期に調べた方が良いと考えられる。しかし図5の結果は、少なくとも今回の磁界曝露は精子形成に影響を与えないといえるであろう。

本研究と比較されるのはKimらの実験(Kim, Y. W., et al., 2009)であろう。彼らはマウスを用いて、16週連続で14又は $200\mu\text{T}$ の60Hz電磁界に曝露した結果、精巣における精原細胞のアポトーシスが有意に増加したと報告している。今回の実験でもより長期間の曝露によって影響が出てくる可能性は否定出来ない。

長期間の実験は今後必要となるであろう。今回の実験と違う高周波電磁界に関しては、Ynaら(Yan, J. G., et al., 2007)の報告がある。そして高周波(1.9 GHz)の曝露で精子形成に影響はないと報告している。

一方、ヒトにおいてはIorioら(Iorio, R., et al., 2007)が50Hz 5mT曝露実験を行っているが、はっきりした影響は見られていない。また、最近ではDe-Kunら(De-Kun et al., 2010)のボランティアの協力による研究報告がある。そこでは3ヶ月間、50-1000Hzの磁界に曝露された場合、 $160\mu\text{T}$ (1.6 mG)以上を浴びていると精子の異常が生じるリスクが2倍以上になるというものである。

以上のように、精子形成及び精子機能に関しては本研究を含めて明確な影響は見られていないといえるであろう。しかし本研究は2週間曝露であり、より長期間の曝露実験、さらには世代を超えた曝露実験を検討すべきであろう。

4. 食欲・生殖関連ホルモンの検討

視床下部で働くNPY(Neuropeptide Y)は食欲促進作用を持つと同時にゴナドトロピン分泌の抑制作用を持つ(McShane, T. M. et al., 1992)。NPYは様々なホルモンによって調節されるが、レプチンはそのひとつである。レプチンはNPY分泌を抑える働きがあり、負に調節していると言える。またインスリンはレプチン分泌を促進させる働きを持つ。これらはいずれも長期的に食欲や生殖を調節している。そこで本研究においてはゴナドトロピン分泌の上流にあるこの制御系として、レプチンとインスリンの分泌における磁界の影響を調べた。

図 6 は血中レプチン濃度に対する磁界の作用を調べた結果である。コントロール群と 40 μ T 曝露群および 400 μ T 曝露群において、有意な差は見られなかった。40 μ T 群および 400 μ T 群の絶対値に差が生じているのは、実験時期の違い、サンプル数が少ないためのばらつきによるものであると考えられる。今後サンプル数を増やす必要がある。しかし、40 μ T 曝露群および 400 μ T 曝露群ともに曝露群の値が大きくなっていることは、図 1. B、図 2. B のコントロール群に対する曝露群の脂肪増加と関連があるかもしれない。しかしこれらの違いについても有意な差が明らかにあるとは言えないので、やはり実験を積み重ねる必要がある。さらにレプチンの増加はゴナドトロピン上昇をもたらす可能性があるため、生殖器形成と精子形成を早める可能性がある。これは図 5. に示されるように、本実験の程度の磁界曝露群ではコントロール群より高い運動率を示す傾向を持つこと、少なくとも精子の活性には悪影響を及ぼしていないということをサポートするものである。

また、インスリンについても図 7 に示すように、磁界曝露の影響は見られなかった。すなわち、40 μ T 曝露および 400 μ T 曝露で、絶対値の大きな違いが見られたが、それぞれコントロール群との差は見られなかった。40 μ T 曝露および 400 μ T 曝露実験は、実験実施時期が異なるで何らかの測定誤差が生じた可能性があり、原因については検討中である。

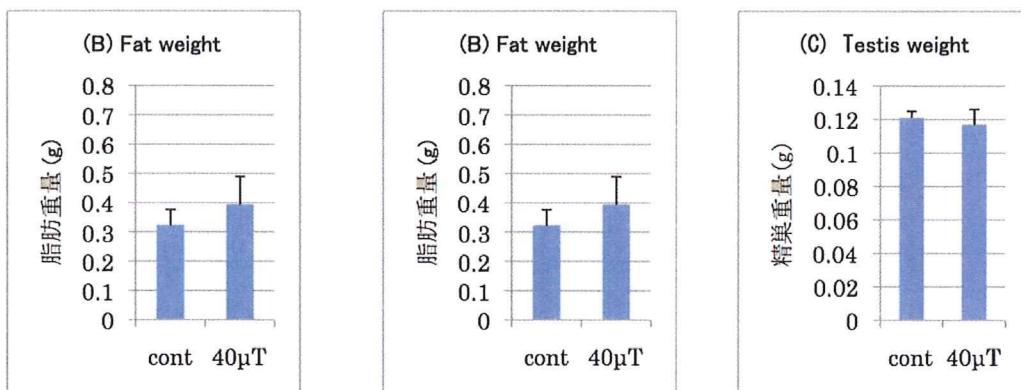


図1 体重 (A)、体脂肪重量 (B)、精巣重量 (C) における $40\mu\text{T}$ 磁界曝露の効果。コントロール群と曝露群に有意な差はなかった。(N=4)

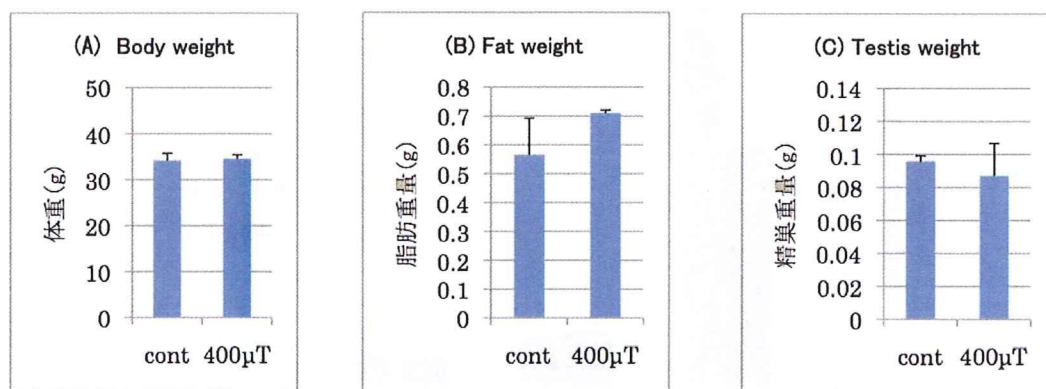
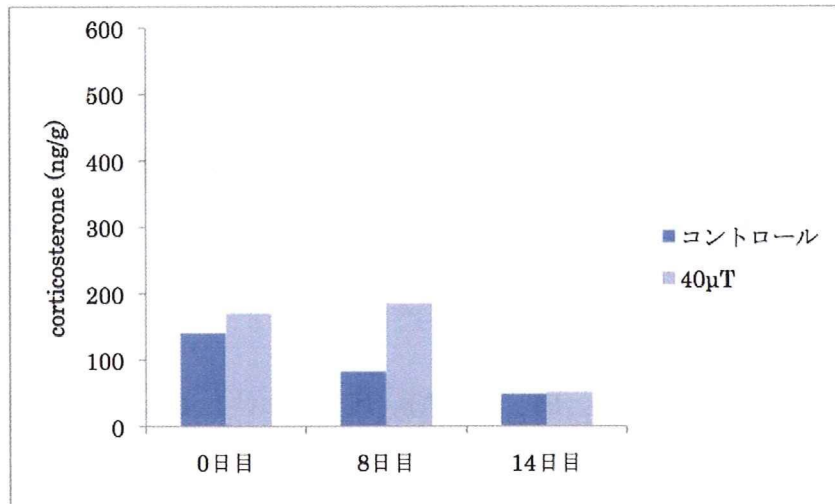


図2 体重 (A)、体脂肪重量 (B)、精巣重量 (C) における $400\mu\text{T}$ 磁界曝露の効果。コントロール群と曝露群に有意な差はなかった。(N=4)

(A)



(B)

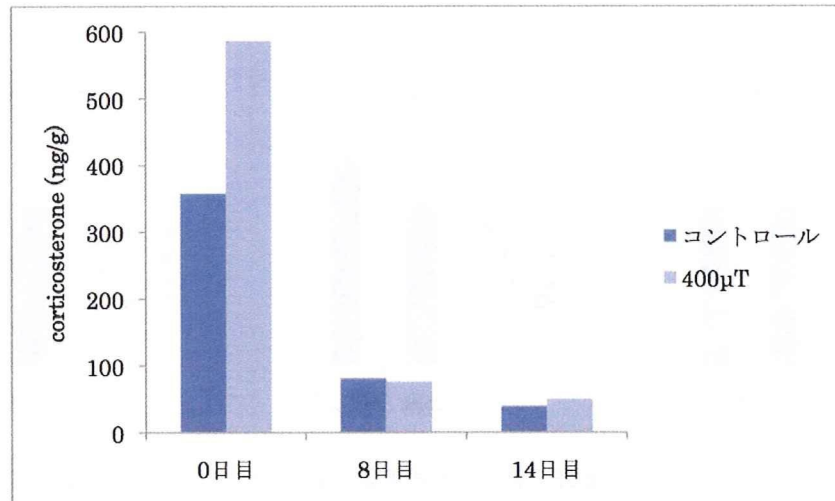


図 3. コルチコステロンに対する磁界曝露の影響。(A)は $40\mu\text{T}$ 、(B)は $400\mu\text{T}$ に曝露したものの。それぞれがコントロールと対に示されている。絶対値に差はあるものの、コントロール群と曝露群の間には有意な差はない。0日目の値が高いのは狭い実験ケージに移動したためと考えられる。コントロール群と曝露群に有意な差はなかった。(4匹の糞の合計から求めた値)

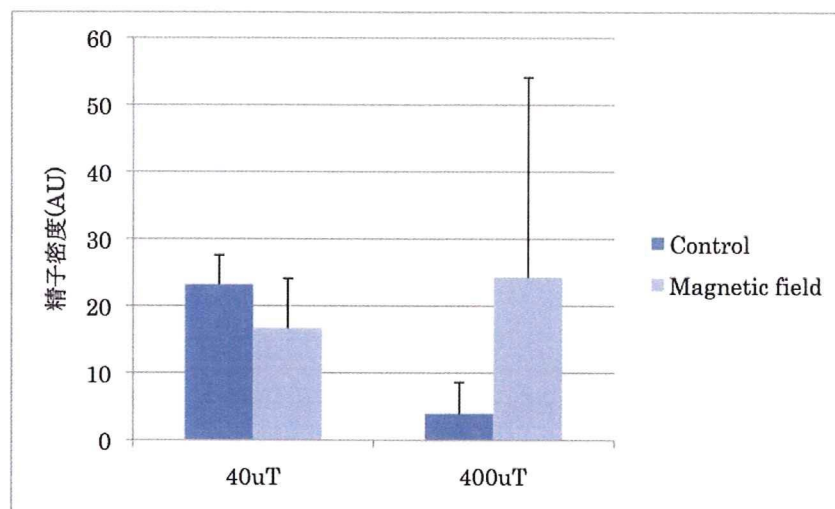


図 4. 5 週齢の精巣上体に出現した精子の密度。単位は相対的なものである。コントロール群と曝露群に有意な差はなかった。(N=4)

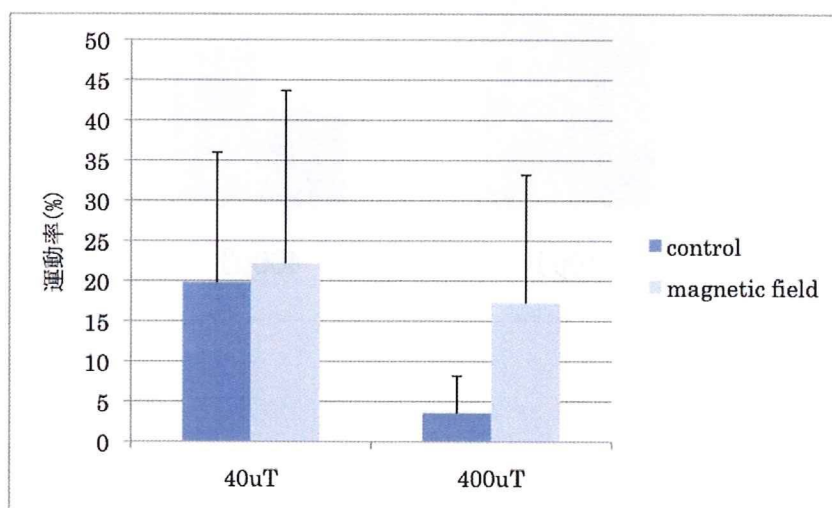


図 5. 5 週齢の精巣上体に出現した精子の運動率。通常の運動率測定値に比較して非常に低いが、これは精子密度を調べるために精巣上体尾部を強く押して絞り出したためである。コントロール群と曝露群に有意な差はなかった。(N=4)

図 6. 5 週齢オスマウスの血中レプチンに対する磁界の影響。N=4

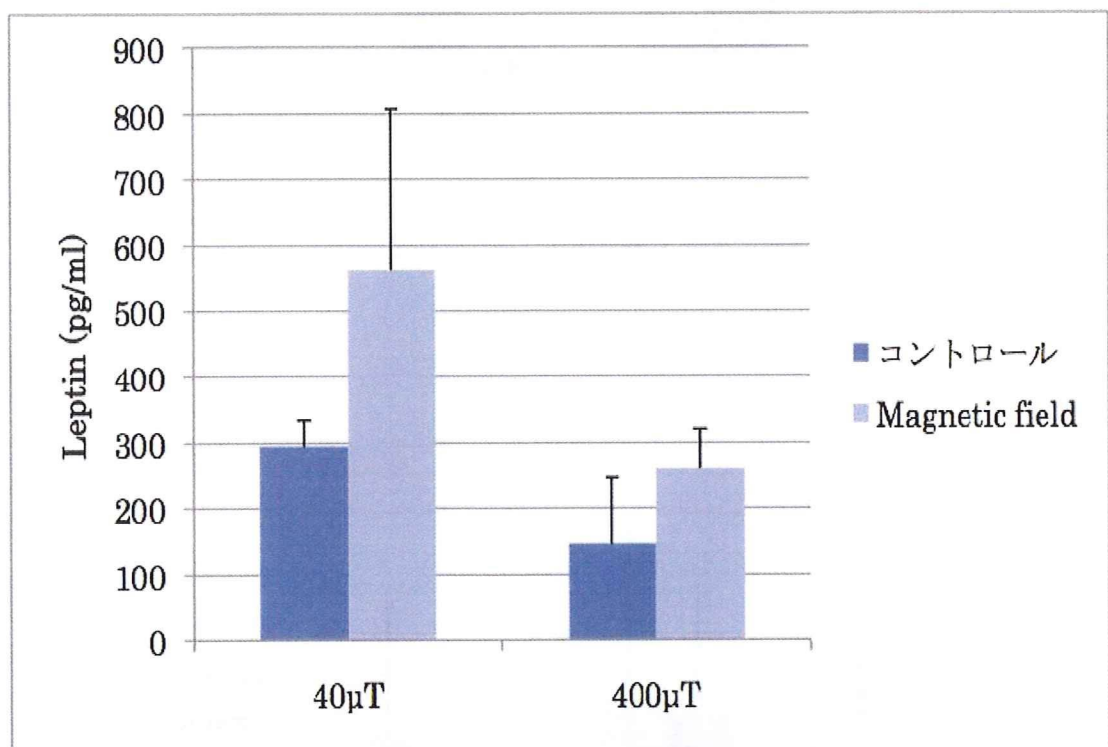
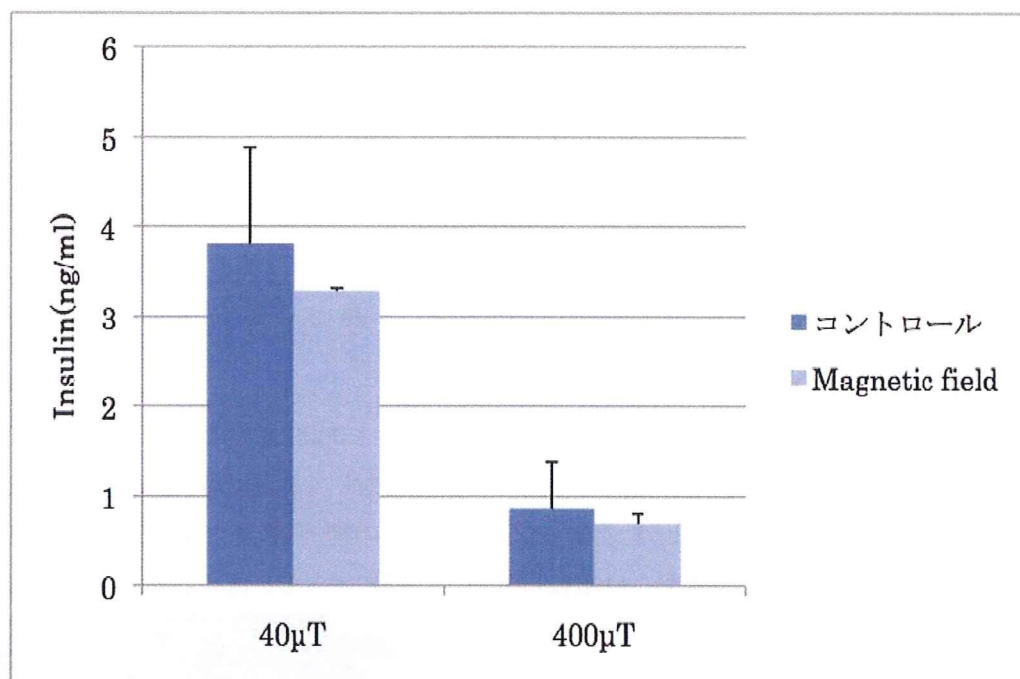


図 7. 5 週齢オスマウスの血中インスリンに対する磁界の影響
N=4



変動磁場の誘導による磁場分布の変調 結果と考察(深津)

1. 外部交番磁場の分布計測

計算に先立って磁場の空間分布の直接計測をおこなった。グレーティングは直径約1mmで約10mmの等間隔で配置されている。不均一磁場を発生用に20mm径の鉄心コアをもつテスト用の小型交流(電)磁石を用意し、磁界の局所分布計測を行った。アナログ信号発生器をもちいて周波数50Hzの正弦波的振動磁場を発生させた。コア直上の最大磁場振幅(実効値)の実測値は120 μ Tである。地磁気として既存値45 μ T(35° 41' N, 139° 46' E)を用いた。磁場検出には検出能1 μ T、ダイナミックレンジ \pm 300 μ Tのチップ埋め込み型磁気抵抗センサ(TDS01V)を用いた。

その結果、図2に示すようにグレーティングの有無に依存せず磁界の分布は同じであることがわかった。左方向への一様シフトは機械部品の影響で生じており誘導の影響ではない(図3)。

この結果は、ある意味当然である。実際、図3のようにグレーティングの内部ループどうしで電流はキャンセルするので反磁性電流は最も外側のループ(全長780mm)のみを流れるからである。

尚、SUSグレーティングには側板があるが(図3)、これは磁界に垂直に配置されて

いるため誘導の影響が無視できるとした。比較のためアルミ(ジュラルミンともに透磁

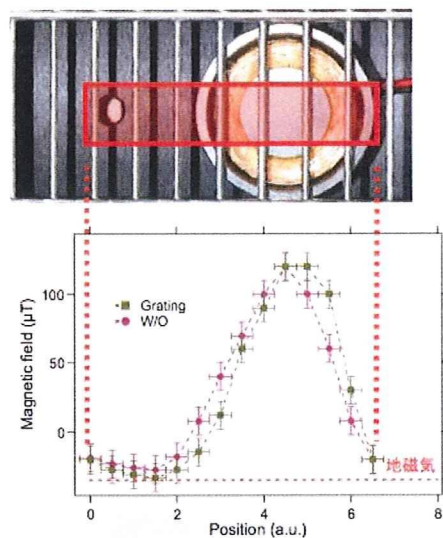


図 2. 磁場分布のラインプロファイル

率1.00002)製のパンチングメタルプレートに対して同様の測定を行ったところパンチ孔の径や密度が変化しても計測される磁場にほとんど変化はなかった(<0.1%)。

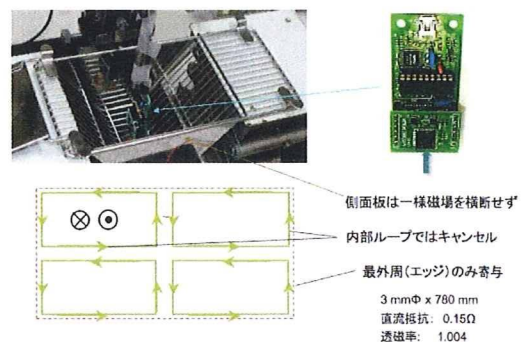


図 3. 磁場計測の配置とループ

このように実測される範囲ではグレーティング挿入によって磁場分布には影響が生じないと結論される。

2. 誘導電流・磁場の数値計算

次に、この実験結果をサポートする目的でグレーティング外周の誘導の数値計算を行った。

コイルの環状電流が時間変化すると

$$\mathbf{H}_R = \frac{c\mu_0}{4\pi} \frac{1}{R^2} \left(\dot{\mathbf{P}} \times \frac{\mathbf{R}}{R} \right) + \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{R} \left(\ddot{\mathbf{P}} \times \frac{\mathbf{R}}{R} \right)$$

にしたがって振動磁場が発生する(図4)。第1項はクーロン場で第2項がいわゆる電磁波の磁場成分に相当する。分極 \mathbf{P} の時間微分の階数から

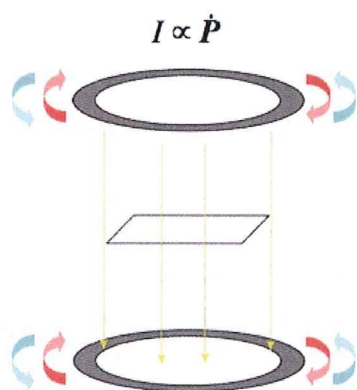


図4. 環状電流の作る磁場.

後者が振動数の2乗、前者が1乗に比例するから商用周波数(50 Hz)かつ磁石の近傍では前者が支配的となる。進行電磁波

の解析では有限差分時間ドメイン(FDTD)

$$\frac{(B_{n+1} - aI_{n+1}) - (B_n - aI_n)}{\Delta t} = RI_{n+1}$$

法が有力な計算法であるが、今回のようなガウス場では Biot-Savart 則にしたがって直接磁場を計算するほうが簡単である。

計算手順は以下のとおりである。

- ① 振幅 $40 \mu\text{T}$ @ 50 Hz の一様に分布した sinusoidal 磁界を計算。
- ② 磁場中に挿入した長方形コイル (270mm × 120mm) の誘導起電力と誘導磁場を計算。
- ③ 外場と誘導磁場の線形和を求める。

空間分布についてはコイル断面(2次元平面)をメッシュ分割し(図5)、差分方程式を逐次繰り返し法で解いた。ここで B_n, I_n はそれぞれ n 回目の繰り返しにおける磁場と誘導電流の値である。この方程式は Faraday の法則そのものであるが、誘導(反磁性)電流によって反磁場が生じる効果を Maxwell-Ampere 則 aI_n として差分法に有利な形式で組み込んである。

繰り返し法の1サイクルでは、

- (1) コイル面内の各セルに外部磁界を代入
- (2) コイルに流れる誘導電流を更新
- (3) 誘導電流による磁場の影響を各セルに加算
- (4) コイル内の磁束を算出を計算した。

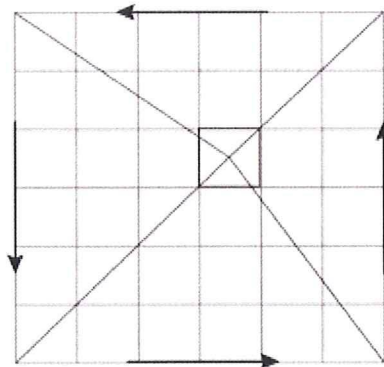


図 5. コイル領域のメッシュ

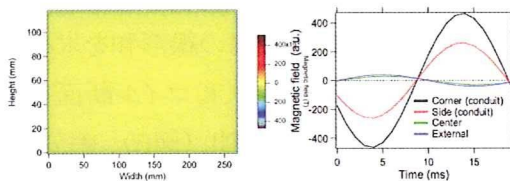


図 6. 長方形コイルの誘導磁場

振幅 $40 \mu\text{T}$ 、周波数 50 Hz の交番磁場中に置かれたコイル ($270 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 、抵抗 0.15Ω) が発生する誘導磁界の周期的時間変化 (20 ms) が図 6 である。エッジ付近に磁場の増強された領域 ($\approx 400 \mu\text{T}$: 外部印加磁場の 10 倍強) が見えるが、これは積分の特異性が除去できないせいで発生する効果であり、自己エネルギーに含まれるべきものである。実際、実験ではこのような発散性の磁場分布の異常は観測されていない。これは点電荷の原点でポテンシャルが発散するのと同じ性質のも

のである。

この特異性をのぞけば、コイルの導体部分から 30 mm より内側の領域では外部印加磁場からのずれが $1 \mu\text{T}$ 以下のほぼ無視できる変動しか生じないという結果が得られた。

3. 誘導電流による Joule 損失と熱輻射

グレーティングの外周を流れる誘導電流の損失を求める。 3 mm 径 $\times 780 \text{ mm}$ 長の SUS304 バーが密度 8.03 g/cm^3 、比熱 0.5 J/gK 、直列抵抗 0.15Ω をもつとして上限の電流振幅を仮想的に 1 A (100 倍の過大評価) だとしてもコイルの温度上昇はたかだか

$$\Delta T = 0.15 \Omega \times (0.707 \text{ A})^2 \div \{8.03 \text{ g/cm}^3 \times 78 \text{ cm} \times \pi \times 0.15^2 \text{ cm}^2 \times 0.5 \text{ J/gK}\} \approx 0.003^\circ \text{ C}$$

室温 25°C からの温度上昇で発生する正味の輻射の増加分は空気への熱伝導を無視して

$$\Delta S = \sigma(T + \Delta T)^4 - \sigma T^4 \approx 4\sigma T^3 \Delta T$$

であり、その増加率

$$\frac{\Delta S}{S} = 4 \frac{\Delta T}{T} = 4 \frac{0.003}{298} \leq 4 \times 10^{-5}$$

は極めて小さく (100 ppm 以下) その影響は無視できる。

以上の一連の結果からグレーティング挿入による誘導電流・磁場の効果はとても小さく、実験結果には影響しな可能性が高

いと判断できる。

したがって誘導磁場対策はとくに必要ないが、 $R \rightarrow \infty$ とすることで電流がゼロとなり、誘導の効果を完全に排除できる。このため n にはコイルをカットする、あるいは非磁性誘電体(アクリル、ガラス)とグレーティングを交換することが有効であることが予想される。実際、代表者のグループではグレーティングをアクリル材に変更して実験を継続することとなった。

4. 今後の展望

現状のヘルムホルツコイルは、一度磁場分布を校正しておけば、一様な正弦波の変動磁場が再現される筈であるが、リアルタイムに磁界を常時モニタすることが望ましい。このためには、実験装置系に擾乱を与えることなくマルチポイントで同時リアルモニタが可能な方法を開発する必要がある。そこで次年度では、磁気光学効果をベースとする磁界モニタ法を検討する。この際、単一光子計測と現在、開発中のゴースト非局所相関計測法を応用する。

E. 結論

文献調査1の結論

本分担研究では、2007～2009年に発表された動物実験・細胞実験に関する論文を考察した。

超低周波領域の動物実験においては、発

がん性、ならびにプロモーター作用に関してこれまでの研究と同様、ネガティブな結果が見られた。一方、DNA損傷、行動影響などに関しては、一部の論文で影響が見られているが、類似した研究の結果を考慮すると必ずしも一貫した結果が得られているとはいえないと考えられた。細胞実験では遺伝毒性・タンパク発現・遺伝子発現・細胞機能に関して、電磁界曝露による変化があるという論文も見られたが、実験に用いた磁束密度が高く、生活環境の磁束密度で健康影響が生じる可能性はないと考えられた。一方で、高磁束密度を使って影響ありと結論されている研究結果のいくつかは、今後の医療応用につながる可能性もあり将来の展開が期待される。

一方、携帯電話で使用している周波数帯の高周波電磁界の研究について、動物実験では、がん、遺伝毒性、発生毒性、遺伝子発現、タンパク発現、行動学的評価等においては影響が見られない発表が多くみられた。細胞実験では、多くの論文でネガティブな結果が報告されているが、遺伝子発現、細胞のアポトーシスなどに関して一部の論文では曝露による変化があるという報告も見られた。しかしながらこれらの実験が SAR の強い条件で行っていることを考えると熱による影響を観察している可能性もあ

り、これらについては詳細な検討が必要であると考えられる。

文献調査 2 の結論

今回の文献調査および磁界影響のメカニズムの考察からは、日常生活で経験する電磁界での健康障害への明らかなリスクは認められなかった。但し、生体側の要因として、心臓ペースングへの影響は十分検討される必要がある。また、酵素反応に対する磁界効果の影響については研究継続が必要と考えられる。さらに、電磁界の生体影響について個人差が認められる可能性が報告され、今後の検討課題と考える。電磁界を用いた臨床応用は、MRI などすでに臨床には必須となっているが、そのメカニズムは不明なことが多く安全な利用についての研究継続が重要である。

細胞レベルの実験の結論

1 低周波磁界 (50Hz, 40 μ T) の細胞増殖への影響
種々の培養細胞、IMR32 (ヒト神経芽細胞)、LC540 (ラット精巣腫瘍細胞)、CPAE (ウシ血管内皮細胞)、HMY-1 (ヒト黒色腫細胞) E10 (ヒト中皮腫細胞)、LK2 (ヒト肺癌細胞) を低周波磁界 (50Hz, 40 μ T) に 1、2、4、8、16、24 時間曝露し、細胞死あるいは細胞増殖への影響を解

析した結果、顕著な影響は見られなかった。

2 低周波磁界の活性酸素発生への影響
種々の培養細胞へ、低周波磁界 (50Hz, 40 μ T) に 15 分間曝露し、細胞外へ放出された過酸化水素発生を解析した。LC540、HMY-1、E10、LK2、U937 のいずれの細胞においても、低周波磁界の過酸化水素発生への影響はなかった。

動物実験レベルの実験の結論

1. 電気生理学的実験

ラット生体を低周波均一磁界 (50Hz \cdot 40 μ T) に曝露し、これらの動物から作成した扁桃体を含む脳スライス標本を用いて、扁桃体基底外側核ニューロンで観察される抑制性神経回路オシレーションの状態を電気生理学的に評価した。

急性磁界曝露群 (1 時間) では、GABA を伝達物質としリズム性をもって発する抑制性シナプス伝達バーストの強度には変化が見られなかった。また同様に慢性的磁界曝露群 (2 週間) でも対照群との有意な差は見られなかった。

2. 低周波磁界の生殖系への影響
生殖系への影響を明らかにするため、

ICR mice (妊娠マウス) (コントロール 3 匹、曝露群 3 匹) を低周波磁界 (50Hz, 40 μ T) に 16 日間曝露し、胎児の生死、奇形の有無および母獣への影響で評価した。実験は 2 回実施した。その結果、コントロール群と磁界曝露群の間に、胎児死亡の率で有意の差は見られなかった。両群ともに胎児に奇形は見られなかった。母獣には、下痢は見られず、行動異常も見られなかった。以上のように、低周波磁界 (50Hz, 40 μ T) に曝露した妊娠マウス及び胎児には影響はなかった。

3. 低周波磁界の精子への影響

低周波交流磁界のマウスのオス生殖機能に対する影響を調べた。オスの生殖機能が発現する 5 週齢を目安として、3 週齢から 5 週齢までの期間連続的に 40 μ T および 400 μ T に曝露させた。その結果、体脂肪に、曝露による多少の増加傾向が見られるものの、体重、精巣重量などに影響は見られなかった。体脂肪増加についても量依存的な結果が得られてはいない。また精子密度、精子運動性についても影響は見られなかった。内分泌系に関しては、狭矮なケージを用いざるを得ないという実験系の

制約から飼育初期にストレスの亢進が見られたが、それは 2 週間後にはほぼ解消され、また、いずれの時期においても、コントロール群と比べて曝露群に有意な差は見られなかった。生殖調節の上流で関連するレプチンとインスリンについても磁界曝露による影響は顕著には見られなかった。ただしレプチンに関しては増加傾向があり、体脂肪の上昇と関係がある可能性があり、より詳しく調べる必要がある。しかし、レプチン増加は生殖機能をむしろ促進させる働きがあると推測されるので、磁界曝露が悪影響を与える可能性は低いであろう。

変動磁場の誘導による磁場分布

グレーティング挿入による誘導電流・磁場の効果はとても小さく、実験結果には影響しない可能性が高いと判断できる。したがって、誘導磁界対策はとくに必要ないが、 $R \rightarrow \infty$ とすることで電流がゼロとなり、誘導の効果を完全に排除できる。このため n にはコイルをカットする、あるいは非磁性誘電体 (アクリル、ガラス) とグレーティングを交換することが有効であることが予想される。

参考文献

文献調査 1 の参考文献

1. WHO, *Extremely Low Frequency Fields*, in *Environmental Health Criteria Monograph No.238*. 2007, World Health Organization Geneva, Switzerland.
2. Chung, M.K., et al., *Lack of a co-promotion effect of 60 Hz rotating magnetic fields on N-ethyl-N-nitrosourea induced neurogenic tumors in F344 rats*. *Bioelectromagnetics*, 2008. **29**(7): p. 539-48.
3. Negishi, T., et al., *Lack of promotion effects of 50 Hz magnetic fields on 7,12-dimethylbenz(a)anthracene-induced malignant lymphoma/lymphatic leukemia in mice*. *Bioelectromagnetics*, 2008. **29**(1): p. 29-38.
4. Fedrowitz, M. and W. Loscher, *Exposure of Fischer 344 rats to a weak power frequency magnetic field facilitates mammary tumorigenesis in the DMBA model of breast cancer*. *Carcinogenesis*, 2008. **29**(1): p. 186-93.
5. Yokus, B., et al., *Extremely low frequency magnetic fields cause oxidative DNA damage in rats*. *Int J Radiat Biol*, 2008. **84**(10): p. 789-95.
6. Erdal, N., S. Gurgul, and A. Celik, *Cytogenetic effects of extremely low frequency magnetic field on Wistar rat bone marrow*. *Mutat Res*, 2007. **630**(1-2): p. 69-77.
7. Erdal, N., et al., *Effects of long-term exposure of extremely low frequency magnetic field on oxidative/nitrosative stress in rat liver*. *J Radiat Res (Tokyo)*, 2008. **49**(2): p. 181-7.
8. Manikonda, P.K., et al., *Influence of extremely low frequency magnetic fields on Ca²⁺ signaling and NMDA receptor functions in rat hippocampus*. *Neurosci Lett*, 2007. **413**(2): p. 145-9.
9. Fu, Y., et al., *Long-term exposure to extremely low-frequency magnetic fields impairs spatial recognition memory in mice*. *Clin Exp Pharmacol Physiol*, 2008. **35**(7): p. 797-800.
10. Liu, T., et al., *Chronic exposure to low-intensity magnetic field improves acquisition and maintenance of memory*. *Neuroreport*, 2008. **19**(5): p. 549-52.
11. Burda, H., et al., *Extremely low-frequency electromagnetic fields disrupt magnetic alignment of ruminants*. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2009. **106**(14): p. 5708-13.
12. Yao, K., et al., *Absence of effect of power-frequency magnetic fields exposure on mouse embryonic lens development*. *Bioelectromagnetics*, 2007. **28**(8): p. 628-35.