

静止磁場が免疫系器官に及ぼす影響に関する基礎的研究

細川友秀¹⁾, 森本容子²⁾, 谷岡直子¹⁾, 沢田誠二¹⁾

Studies on effects of static magnetic field on the immune system

Tomohide HOSOKAWA, Yoko MORIMOTO, Naoko TANIOKA, Seiji SAWADA

抄録：我々を取りまく環境には様々な人工的磁場があり、我々は意識的にも無意識的にもそれらの磁場にさらされている。“環境に増加しつつある磁場が、我々の体にどんな影響を与えるのか”という素朴な疑問から本研究を行い、研究に参加した学生が本研究を行うことで、環境問題について身近な問題と結びつけ考察を深めことができるように意図した。すなわち、重要な生体防御システムである免疫系への磁場の影響を調べるため、マウスを200～300ガウスの静止磁場に2～7日間曝露し、胸腺と脾臓の細胞構成の変動を調べた。脾臓では、CD8⁺のT細胞数が磁場曝露2日から4日にかけて対照群より一時的に少なくなる傾向がみられ、7日間の曝露でその差は解消した。胸腺内のThy.1⁺CD4⁺CD8⁺細胞数は、7日間の曝露で磁場群の方が多くなった。これらの結果から、体全体ではほとんど影響がないと思われるような磁場によって、一時的に免疫系の細胞構成が影響を受けることが示された。

キーワード：静止磁場，免疫系，T細胞，生活環境，環境教育

Abstract

A growing number of electric instruments generate various kinds of magnetic field in our citizen life. Is our health affected by such artificial magnetic field? The present studies started from the ingenuous question and were conducted with intent to join them to the environmental education.

A static magnetic field was generated by a pair of Helmholtz coils each of which was connected to a DC power rectified from the 60-Hz commercial 100-V AC power. The coils were placed in parallel each other and one diameter of the coils apart. Each DC power supplied 8.0A direct current to the coil, generating a static magnetic field up to 3.4×10^{-2} T (340G) between the two coils. Inbred mice held in a breeding cage were placed between the two coils and exposed to the static magnetic field ranged from 1.5×10^{-2} to 3.4×10^{-2} T for 2 to 7 days. Immediately after the exposure, the mice together with non-exposed controlled mice were weighed and killed to remove thymus and spleen. The exposed mice had thymuses of less weight and smaller number of CD8⁺ spleen T cells than the controlled mice at 2nd and 4th days of exposure. However, these differences disap-

1) 京都教育大学, 2) 滋賀県立甲西高等学校

peared at 7th day of exposure. The thymuses of the exposed mice at 7th day contained significantly larger number of CD4,CD8-double-positive immature T cells than those of the controlled mice. These results indicate that the static magnetic field reduces certain T cells in number transiently and the reduction is restored by 7th day of exposure. The restoration of the reduced spleen T cell population may have relation to the fact that the exposed mice have larger number of thymic immature double-positive T cells than the controlled mice at 7th day of exposure. Further studies using various kinds of magnetic field will bring more important information about biological effects of magnetic field.

Key Words: static magnetic field, immune system, T cell, our citizen life, environmental education

I. はじめに

地球は大きな磁石であり、自ら発生する磁場に取り囲まれているため宇宙線や太陽からの荷電粒子から保護されてきた。生命は地球磁場で保護された環境で発生し、その影響の下で進化してきた。いくつかの動物は地磁気を感知し方向感覚に利用していると考えられるが、地磁気の強さは0.5 ガウス (5×10^{-5} テスラ) 程度で弱く、地磁気が人間の生理機能に及ぼす影響は知られていない。しかし、最近では多くの電気機器が普及し、また、磁石を使った簡単な健康器具や強い磁場を利用した医療用のNMR-CT装置が普及し、人間が強い磁場に曝される機会は非常に多くなっている。これらの地球磁場に比べてはるかに強い人工の磁場が、人間の生理機能にどのような影響をどの程度及ぼすのか評価する必要があるだろう。

これまでに、十から数十ヘルツの周波数の電磁場が人間や動物の培養細胞の増殖反応に及ぼす影響についていくつかの研究が行われた。そして、そのような電磁場が細胞の増殖反応を促進するという結果が報告されている^{1)~3)}。我々は、強い静止磁場に癌細胞を曝露すると、癌細胞の増殖機能が強く維持され、曝露後の癌の増殖と転移が著しく促進されることを観察した^{4), 5)}。また、我々は、日常の生活環境にありふれた、60Hzの通常の交流電流により発生する低周波電磁場にマウスを曝露し、マウスの体内における癌の増殖と転移に及ぼす影響を調べ、通常の交流電磁場への曝露が癌の増殖と転移を促進する可能性を指摘した⁶⁾。これらの研究結果から、様々な磁場が人間の生理機能に有益な、または、有害な影響を与えることがありうると考えられる。

本研究では、我々の体を微生物などの侵入から防御し、体の恒常性を維持するうえで重要な役割を果たしている免疫系に注目し、磁場が免疫器官の細胞構成に及ぼす影響を調べた。免疫系は感染によってだけでなく、ストレスによって大きな影響を受けるので、磁場の影響を免疫系の変化によって捉えるためには、感染、ストレスなどの環境要因をコントロールして実験する必要がある。そこで、本学の環境教育実践センターの小動物飼育室で、比較的清潔な飼育環境で飼育したマウスを実験動物として使用した。また、電場と切り離して磁場のみの影響を評価するために、ヘルムホルツコイルに直流電流を通電して静止磁場を発生させた。その静止磁場内に一定時間マウスを保持して磁場に曝露し、マウスの胸腺と脾臓の細胞構成の変動を調べた。

II. 材 料 と 方 法

マウス：SPF環境で生産された、近交系 C57BL/6CrSlc の 5 ～ 6 週齢雄マウスを日本エスエルシー株式会社（浜松，静岡）より購入し，本学環境教育実践センターで 1 ～ 2 週間飼育して実験に使用した。

磁場の発生と磁場への曝露：100V，60Hzの交流電流を整流してヘルムホルツコイルに通電して磁場を発生させた。ヘルムホルツコイルは，直径2.15mmの銅線を内径20cmの円周に外径30cmまで厚さ5cm高さ6cmに巻いて作ったもので，本学の理学科の松井先生からお借りしたものをを用いた。同じ仕様のコイルを2つ，コイルの中心部で20cm離して平行に置き，それぞれのコイルに直流電源を接続して，2つのコイルに発生する磁力線の方向がそろうように配置した。それぞれのコイルに流れる電流は8Aであり，ガウスメーター（GK-600P，島津製作所，京都）で測定した磁場強度は，2つのコイルの間にできる，底面の直径30cm，高さ20cmの円柱状の空間内で 1.5×10^{-2} から 3.4×10^{-2} T（テスラ）（150～340G（ガウス））であった。マウスは，2つのコイルの間にできた空間に，プラスチックのマウス用ケージ（底面で L；21cm，W；15cm，H；14cm）を挟み，その中に入れて磁場に曝露した。マウスはエサと水を自由に摂取でき，ケージ内を自由に動き回れるようにした。対照群のマウスは，同じ部屋の中でコイルから十分離れた同じ仕様のプラスチックケージ内に入れ，エサと水を自由に摂取させ行動を自由にした。

胸腺と脾臓の細胞浮遊液の調製：マウスを磁場に曝露した後，脱血死させ，胸腺と脾臓を摘出した。各個体の臓器から別々に，細胞浮遊液をすでに報告した方法⁷⁾で調整した。

蛍光抗体による細胞の染色とフローサイトメトリーによる細胞構成の解析：胸腺と脾臓からそれぞれ細胞懸濁液を調製し，2%牛胎児血清（FCS）を含むリン酸緩衝液（PBS）にて 1×10^7 /ml とし，その 100 μ l にフルオレッセンイソチオシアネート（FITC）標識抗マウス Thy.1,2 抗体（明治ヘルスサイエンス社，小田原，神奈川）のみ，あるいは，フィコエリスリン（PE）標識抗マウス CD4 抗体（rat IgG2b, clone GK-1.5, Becton Dickinson Immunocytometry System, Mountain View, California, USA）と FITC 標識抗マウス CD8 抗体（rat IgG2a, clone 53-6.7, Becton Dickinson Immunocytometry System），あるいは，FITC 標識抗マウスイムノグロブリン（IgM + IgG）抗体（Cappel, Durham, North Carolina, USA）を適当量加えてよく懸濁し，遮光して氷上に20分静置した。各細胞懸濁液に2% FCS-PBS 1mlを加え遠心して洗浄し，細胞ベレットを再度 1mlの2% FCS-PBSに懸濁して，フローサイトメーター（FACScan, Becton Dickinson Immunocytometry System）にて蛍光抗体による染色の程度を測定し，Consort 30/Lysis ソフトにて解析した。

統計学的検定：実験群と対照群の各測定値の差の検定は，Student's *t*-testにより行い， $P < 0.05$ で有意差ありと判定した。

III. 結 果

(1) 体重に及ぼす磁場曝露の影響

マウス10匹を5匹ずつ2群に分け，ヘルムホルツコイルの磁場内または磁場外の対照環境下に4日間，あるいは7日間置いて体重を測定した。表1に示すように，磁場群と対照群の間には体重の差は認められなかった。

表1 マウスの体重に及ぼす磁場曝露の影響

グループ	磁場曝露の期間	
	4日間	7日間
対照群	24.0±0.3	23.8±0.5
磁場群	23.5±0.2	23.3±0.3

1群5匹のマウスの体重の平均と標準誤差を示す。

(2) 胸腺と脾臓の重量に及ぼす磁場曝露の影響

1群5匹で2群のマウスをそれぞれ磁場内と対照環境下に、2日間、4日間、あるいは、7日間置いて、各々のマウスから胸腺と脾臓を取り、重量を測定した。結果を図1と図2に示す。胸腺の重量は、4日間の磁場曝露の後では、磁場群で対照群より有意に少なかったが、2日間と7日間の曝露後では両者に差はなかった(図1)。脾臓の重量は、調べたどの時点でも磁場群と対照群の間に有意差はなかった(図2)。

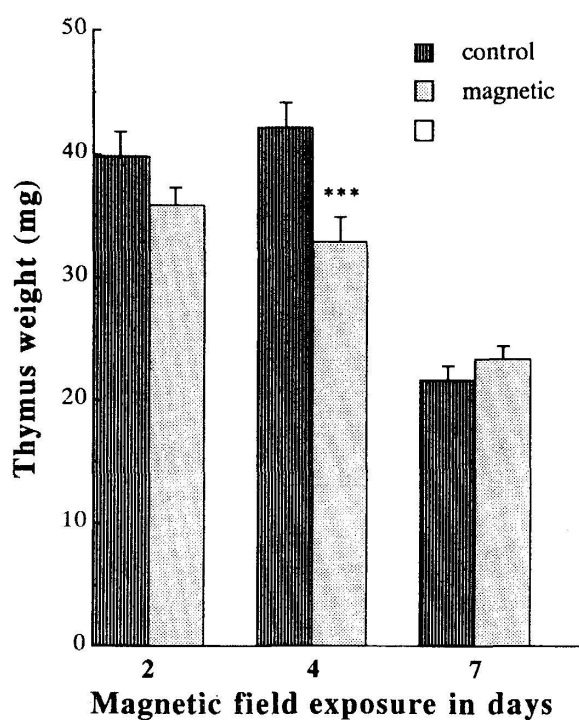


図1 胸腺重量に及ぼす磁場曝露の影響

***磁場群と対照群は危険率 $P < 0.01$ で有意差がある

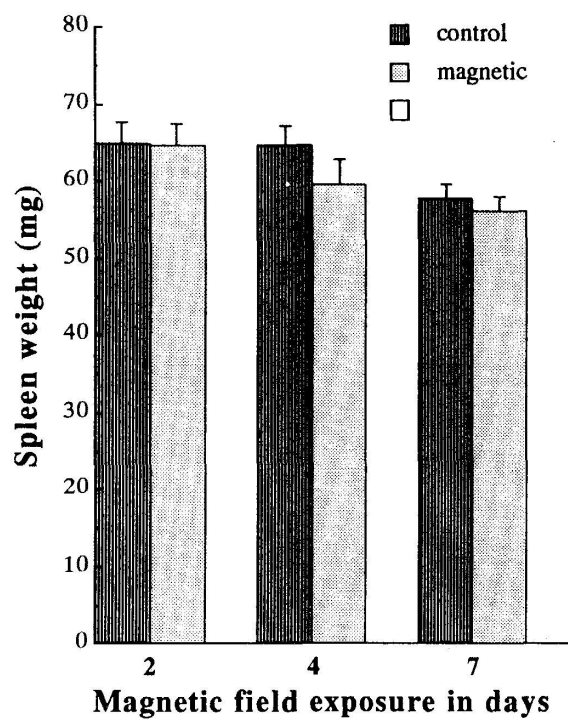


図2 脾臓重量に及ぼす磁場曝露の影響

(3) 胸腺の細胞構成に及ぼす磁場曝露の影響

上記(2)の実験の各々のマウスの胸腺から細胞を得て、Thy.1⁺細胞とCD4⁺CD8⁺細胞の数を測定した。結果を図3と図4に示す。2日間の磁場曝露後と4日間の磁場曝露後の胸腺では、Thy.1⁺細胞とCD4⁺CD8⁺細胞のどちらの数も磁場群と対照群の間に有意差はなかったが、7日間の磁場曝露後では、Thy.1⁺細胞とCD4⁺CD8⁺細胞のどちらの数も磁場群で対照群よりも有意に多かった。

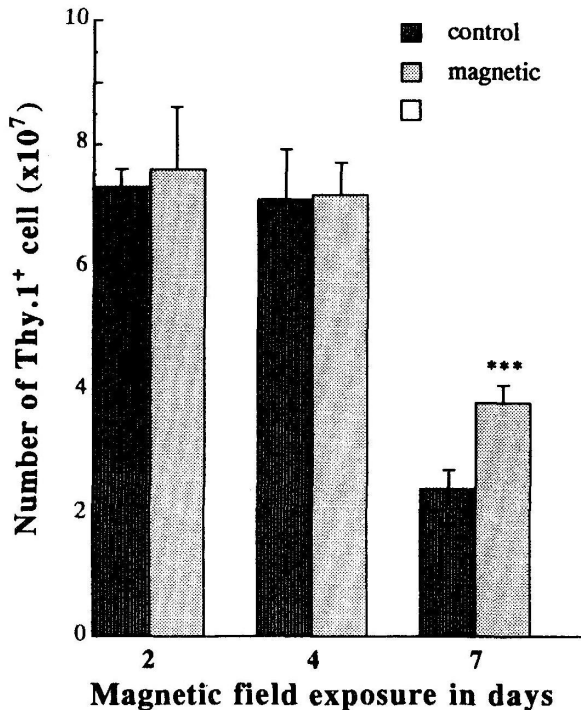


図3 胸腺のThy.1陽性細胞数に及ぼす磁場曝露の影響

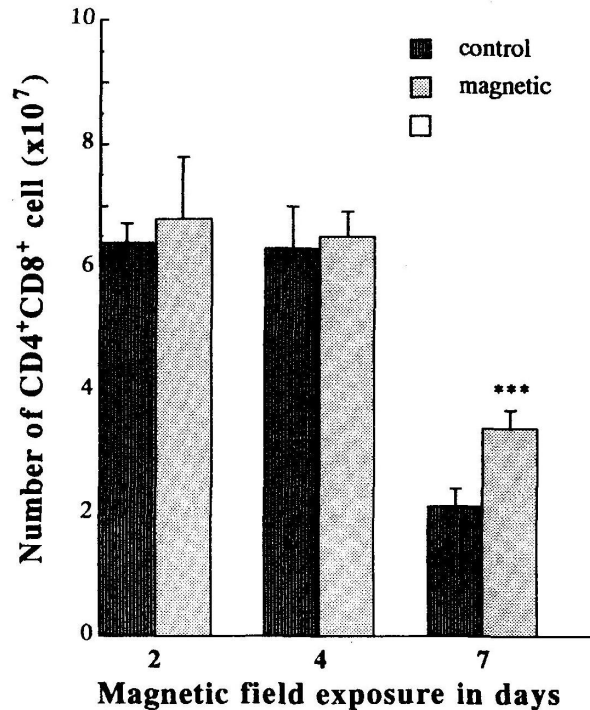


図4 胸腺のCD4CD8共陽性細胞数に及ぼす磁場曝露の影響

***磁場群と対照群は危険率 $P < 0.01$ で有意差がある

***磁場群と対照群は危険率 $P < 0.01$ で有意差がある

(4) 脾臓の細胞構成に及ぼす磁場曝露の影響

上記(2)の実験の各々のマウスの脾臓から細胞を得て、Thy.1⁺細胞、イムノグロブリン陽性(Ig⁺)細胞、CD4⁺細胞とCD8⁺細胞の数を測定した。Ig⁺細胞とCD4⁺細胞の数は、調べたどの時点でも磁場群と対照群の間に有意差はなかった(データ省略)。Thy.1⁺細胞の数は、2日間の磁場曝露後と4日間の磁場曝露後では磁場群で少ない傾向があり、特に4日間の曝露後では有意に少なく、7日間の曝露後にはその差は見られなくなった(図5)。CD8⁺細胞の数は、2日間の磁場曝露後と4日間の磁場曝露後では磁場群で有意に少なく、7日間の曝露後にはその差は見られなくなった(図6)。

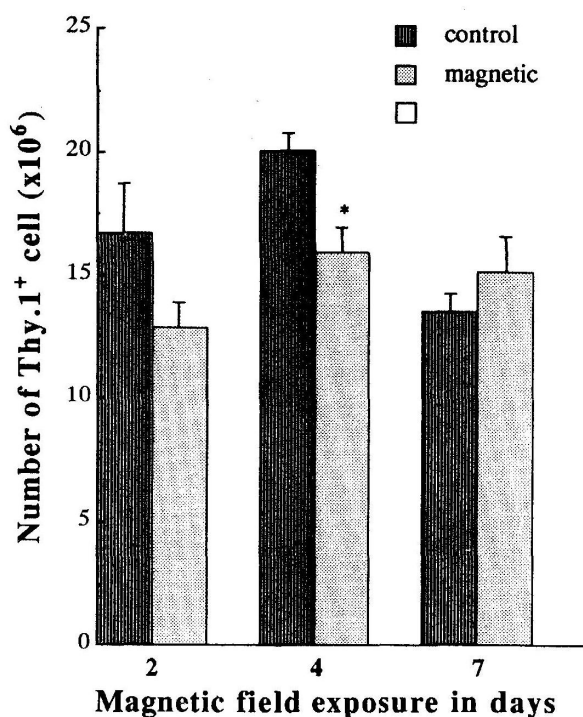


図5 脾臓のThy.1陽性細胞数に及ぼす
磁場曝露の影響

*磁場群と対照群は危険率 $P < 0.05$ で有意差がある

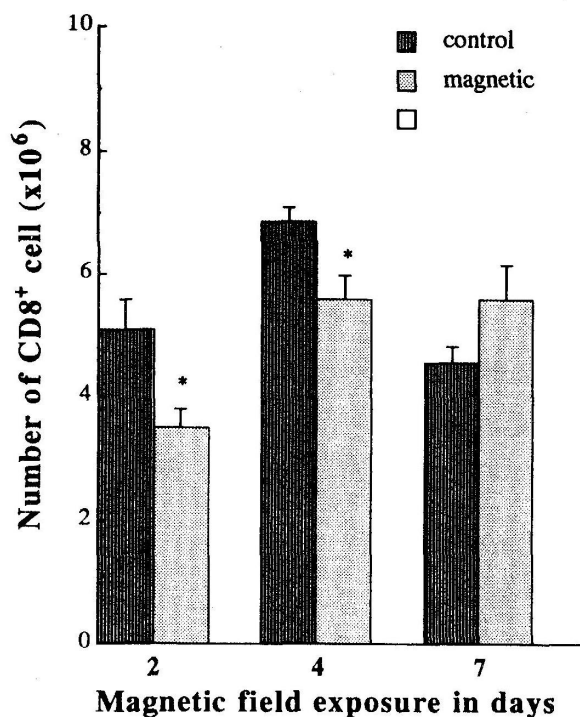


図6 脾臓のCD8陽性細胞数に及ぼす
磁場曝露の影響

*磁場群と対照群は危険率 $P < 0.05$ で有意差がある

IV. 考 察

マウスを磁場内に4日間あるいは7日間置いた場合、磁場曝露群と対照群とで体重の差はなかったため、今回用いた200~300 Gauss程度の静止磁場への1週間程度の曝露では体全体への影響は少ないと考えられる。また、免疫系の器官の中でも重要な胸腺と脾臓の重量への影響をみると、脾臓重量への影響はなかったが、免疫系全体を調節するT細胞の分化・成熟の場である胸腺の重量が、磁場曝露の比較的初期に有意に減少することが注目される。このことは、次ぎに議論する磁場曝露群の脾臓でのT細胞、特にCD8⁺細胞の減少が同時期に見られることと関連があると思われる。

胸腺重量は7日間の曝露後には磁場群と対照群で差がないので、比較的短期間の磁場曝露で見られる胸腺重量の減少傾向は一時的なものであり、両者の差は磁場曝露が継続中でも解消すると考えられる。これは、胸腺の主要な構成細胞である未熟なT細胞(Thy.1⁺でかつCD4⁺CD8⁺の細胞)数が7日間の磁場曝露後に磁場群で対照群を有意に上回ることと整合性がある。脾臓では、B細胞(Ig⁺細胞)は磁場曝露の影響を受けないのに対して、比較的短期間の磁場曝露でT細胞のうち特にCD8⁺細胞が有意に減少する。CD8⁺細胞は免疫反応を抑制的に制御する機能をもつため、比較的短期間の磁場曝露は免疫反応を高める効果をもつかもしれない。我々は、今回のような静止磁場ではないが、交流電磁場に、免疫したマウスを曝露すると、免疫後1週間前後の抗体産生反応が増強される傾向があることを観察している⁶⁾。磁場曝露によるCD8⁺細胞数の減少は一時的であり、胸腺重量と同様に、磁場曝露が継続中でも7日間の磁場曝露後には磁場群と対照群の差は解消する。あるいは、今回の静止磁場の強さの程度では免疫系の恒常性維持機能がうまく働いて、このような回復がみられるのかもしれない。

今回の結果は、体全体ではほとんど影響がないと思われるような磁場によっても、一時的にせよ免疫系の細胞構成が影響を受けることを示している。もっと強い磁場への曝露、さらに長期間の曝露、また、電場と磁場の周期的な変動を伴う低周波電磁場への曝露の影響について、今回の研究と同様の基礎的検討が重要な情報をもたらすと考えられる。

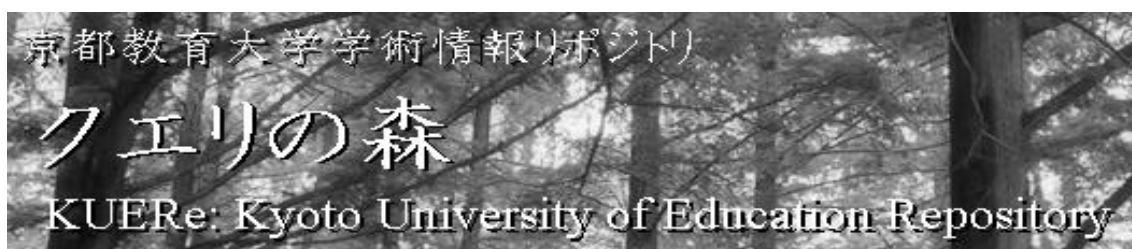
文明の進歩によって、人間をとりまく環境は大きく変化し、直接的にも間接的にも我々の健康に少なくない影響を与えている。本研究では、現代の文明社会にありふれた様々な電気製品、医療機器、研究機器から発生する電磁場（特に磁場）を、そのような人為的な環境要因の一例としてとらえ、それが重要な生体防御システムである免疫系に直接的に与える影響を調べた。また、このような問題意識から出発した研究を行うことを通じて、日常生活に密接した生きた環境教育につなげることができるのではないかと考える。

謝 辞

本研究を行うために必須であった、ヘルムホルツコイルを快く使用させていただきました松井先生に深く感謝いたします。

文 献

- 1) Cantini, M., Cossarizza, A., Bersani, F., Cadossi, R., Ceccherelli, G., Tenconi, R., Gatti, C. and Franceschi, C. (1986) Enhancing effect of low frequency pulsed electromagnetic fields on lectin-induced human lymphocyte proliferation. *J. Bioelect.*, 5: 91-104.
- 2) Cossarizza, A., Monti, D., Bersani, F., Cantrini, M., Cadossi, R., Sacchi, A. and Franceschi, C. (1989) Extremely low frequency pulsed electromagnetic fields increase cell proliferation in lymphocytes from young and aged subjects. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 160: 692-698.
- 3) Cossarizza, A., Monti, D., Scarfi, M. R., Zannotti, M., Cadossi, R. and Franceschi, C. (1991) Exposure to low frequency pulsed electromagnetic fields increases mitogen-induced lymphocyte proliferation in Down's syndrome. *Aging*, 3: 241-246.
- 4) 谷岡直子, 細川友秀. (1993) 磁場曝露された B16 メラノーマ細胞の増殖能力及び肺転移能力. *日本免疫学会総会・学術集会記録*, 23: 489.
- 5) 細川友秀, 谷岡直子, 沢田誠二. (1994) 静止強磁場に曝露された腫瘍細胞の増殖機能に関する研究. *京都教育大学紀要 Ser. B*, 85: 31-37.
- 6) 細川友秀, 宮村美由紀, 橋本 哲, 沢田誠二. (1994) 低周波電磁場に曝露されたマウスの免疫機能に関する研究. *京都教育大学紀要 Ser. B*, 85: 39-48.
- 7) 細川友秀. (1994) 簡易化動物細胞培養を組み入れた生命科学学生実験の試み. *京都教育大学環境教育研究年報*, 2: 65-72.



この文献は、国立情報学研究所において電子化されたものを、本学でテキスト加工したものです。

