

## 直流磁界による小動物心拍への影響

池田 哲夫\*

### The Heartbeat Variations of the Loaches under Stationary Magnetic Fields

Tetsuo IKEDA\*

#### 1. はじめに

技術の発展に伴い、大電流を用いる装置や強磁場マグネット、超伝導マグネットなどの応用機器が開発されている。その結果、特定の職業に従事する職業人だけでなく、今後は磁場を扱うことを職業とする人以外の一般の人々にも曝磁する人が増加することが考えられる。具体的な例としては、核融合炉、エネルギー貯蔵用磁石、医学における核磁気共鳴画像診断装置などがある。このような強磁場応用技術の安全基準は、施設・装置毎に定められており、国際的にもほぼ一致しているが、完全に同一ではない。いずれの場合にも、「科学的根拠は不十分であるが、現在の知見を元に仮に安全基準を定めており、信頼できる新しい研究結果が得られた場合には、より妥当な基準に変更する」とされている。磁場の人体に対する短期、長期、継世代的影響については、必ずしも科学的に確立した結果が得られているとは言い難く、今後の実験結果に待つところが大きい。永久磁石工場等で働く人々を対象として健康調査を行った結果、不定愁訴が報告されているが、不定愁訴の定量的な評価は難しいところである。

我々は自然に存在している電磁環境から人工的に作り出された電磁環境まで、意識するとしなないに関わらず曝されている。家庭用のシェーバーでは最大1 mT程度、磁気健康品では最大0.18 T程度である。これらの磁場に対する影響については、地磁気の影響の問題を考慮し、古くから疫学的研究が行われてきた[1-8]。この問題に対する関心が高まったのは、磁気浮上列車の実現などを契機としている。この結果、多くの研究機関で調査・研究が進められている。

従来の研究結果としては、必ずしも一致した結論ではないが、

- (1) 閾値以下では、影響は現れない。
- (2) 閾値は生体の種類や器官によって異なる値をとる。
- (3) 生体影響は必ずしも磁束密度に比例しない。
- (4) 後遺症は長期に及ぶこともある。
- (5) 幼児期には影響を受けやすい。

このようにまとめることができる。

心拍数に対する磁場の影響についても多くの研究があり、特に家兎については心臓に対する磁場の印加方向によって心拍数が増減する結果が得られている[9-11]。他には肝臓への実験や心臓への実験も報告されているが、結果は必ずしも同一ではない。

#### 2. 本研究の目的

従来、電磁波が生体に影響を及ぼすのはその強度が主要因であるとされてきた。そこで、本実験は磁場の影響の閾値を明確にすることを目的として始めた。そのために、

- (1) 生活環境にはほとんど存在しないT(テスラ)オーダーの強磁場の影響を論ずるものである。(実際の環境に存在するような磁界強度では、閾値を明確にできないと考えた。)
- (2) 実験対象は泥鰌と金魚である。
- (3) 心拍数および心拍波形によって影響を評価している。

このような強磁場を用いることは、生活環境を模擬するものではないが、影響を明確にすることから、意義のあることと考える。その結果、磁場影響は磁界強度だけでなく、曝磁時間の関数となり、繰り返しの曝磁の影響も存在する可能性があることを結論としている。従来、曝磁時間および繰り返しによる蓄積効果は無いとされており、またあったとしても影響の主要因ではないとされてきた。電磁波の影響は一過性であり、蓄積効果や継世代的影響は無いとされている。

\* 名古屋工業大学名誉教授  
Emeritus Professor, Nagoya Institute of Technology

### 3. 実験方法

#### 3.1 実験動物

実験にはいわゆる泥鰌を用いた。泥鰌は7～8 cm 程度の大きさであり、健康状態には注意している。各実験のサンプル数は数匹から十数匹とした。雌雄の区別はしていない。

また、泥鰌の実験が泥鰌に特有な現象であるのか、あるいは普遍性を持つのかを確かめる実験として、同様な実験を金魚に対しても行った。用いた金魚はもっとも安価な和金である。

#### 3.2 磁場発生装置

磁場発生装置は三種類用いている。実験に用いることのできる装置の時間帯や磁界強度によって、使い分けた。

- (1) (株)日本高密度研究所製 2700 型  
最大磁場 1.66 T
- (2) UEOL GSX 製 超伝導磁場発生装置  
最大磁場 5.7 T
- (3) 日本磁気工業(株)製 EMD-8 型  
最大磁場 1.8 T

である。

#### 3.3 曝磁実験

泥鰌は 13.6 mm の試験管内に 1 匹ずつ入れて、頭を下にした状態で曝磁した。試験管内には、直径 5 mm のビニールパイプを引き込み、空気を送り込んでいる。この試験管を数本まとめて磁極間に設置した。実験中に泥鰌が暴れることはほとんど無く、長時間の実験にもかかわらず、落ち着いた状態で実験を行うことができた。磁場方向に対する泥鰌の向きは固定されていない。場合によって、背中から腹の方向や、その逆、あるいは左右の方向から印加されている。対照群に対しても、まったく同様な試験管内に泥鰌を挿入し、同一時間放置している。温度、照度は実験群と同じ状態に保っている。

金魚の曝磁実験は小型の名刺入れのようなケースを作成し、その状態で曝磁した。この空間に空気を還流させているが、磁界の存在している場所の中から出ないようにしてあり、泳ぎ回することはできない。後に述べるが、金魚にとってはストレスがたまる状態であったと推論される。

#### 3.4 心拍数の測定システム

曝磁した泥鰌を内径 7 mm の円筒状のプラスチック容器内に入れ固定する。泥鰌の心臓の左右から、直径 2 mm 長さ 10 mm の円筒状真鍮の電極を押し付け、電位差を検出した。検出した電位差は入力抵抗 10 M $\Omega$ 、利得 60 dB、通過帯域 1.5 Hz の増幅器（自作）で増幅後、オシロスコープ（岩崎通信機製 SS-5710 型）で波形を監視すると同時にペンレコーダ（理化電気製 R-30 型）で記録した。後の実験では、デジタルオシロスコープで波形処理をしている。また、電源からの雑音（60 Hz）の回り込みには十分に注意し、システム全体をシールド箱に入れている。（図 1、図 2）

心拍測定中に泥鰌が鰓呼吸をした場合は、筋電位パルスが検出されるが、この波形は心拍波形とは全く異なり、振幅も大きいので、誤計測することは無い。

金魚の体外から測定される心拍電位は非常に小さく、また、金魚の体表面のインピーダンスが高いので、増幅器の

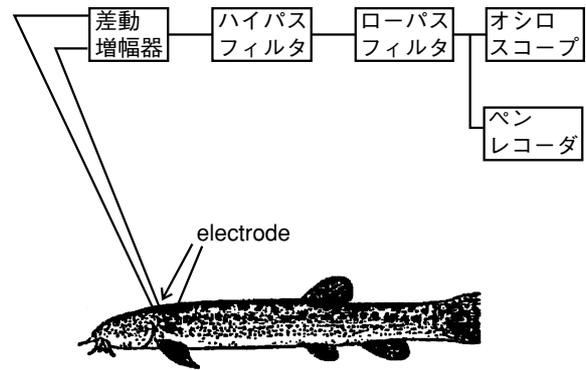


図 1 心拍波形記録系

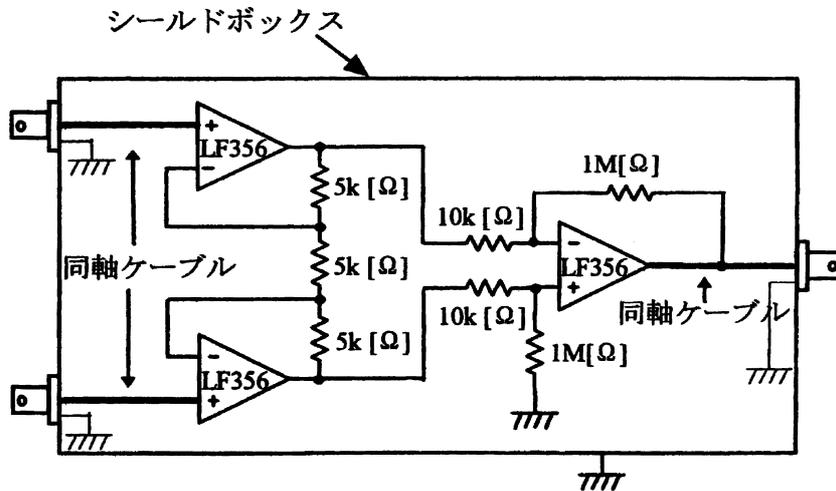


図 2 増幅回路

入力インピーダンスには特に注意を払った。増幅器の利得は 100 dB とした。

### 3・5 磁場以外の影響を及ぼす要因

曝磁中の泥鰻は頭部を下にした姿勢で長時間放置される。通常ではありえない姿勢であるから、ストレスが加わることが考えられるが、心拍数から観測した結果では、特にその傾向は見出されなかった。つまり、6 匹の泥鰻を 6 h 拘束した結果、次のような結論を得た。拘束前の心拍数が 25.4 回 /min、標準偏差 1.4 であるのに対し、拘束後の心拍数が 25.1 回 /min、標準偏差 1.1 である。拘束後の泥鰻は動作や反応がやや鈍い感じであるが、その動作も数十 min 後には回復した。ただし、金魚では拘束の影響が現れた。

次に泥鰻を拘束している試験管内の水の pH と水温の変化の測定を行った。曝磁前は pH7.65、水温 19.5℃であり、泥鰻を入れておいた試験管で磁場 1.5 T を 8 h の曝磁後では、pH7.42、水温 23.0℃であった。対照群では、pH7.47、水温 22.0℃であった。ただし、室温は 21.7℃であった。この結果から、pH および水温の変化が特にストレスの高まる要因とは考えにくい。

## 4. 実験結果

### 4・1 泥鰻の心拍数と曝磁量

最初に、曝磁後の心拍数に対する影響を求めた。観測された心拍波形の一例を図 3 に示す。1.5 Hz の低域通過フィルタで雑音を除去したために、波形の高域成分が失われて

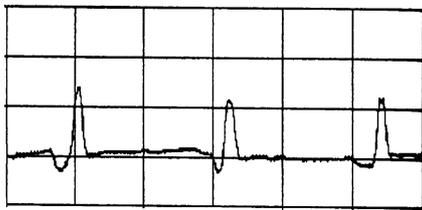


図 3 心拍波形の一例 (ペンレコーダによる。0.5V/div. 1s/div.)

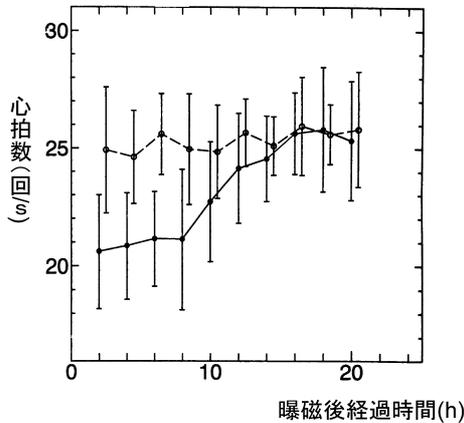


図 4 曝磁後の心拍数の変化  
1.8 T・6 h 曝磁、標本数 18 の平均。○：対照群、●：曝磁群。

いるが、心拍数の処理には問題が無い。

曝磁後の心拍数の変化の様子を図 4 に示す。泥鰻の心拍数は対照群では 25 回 /min であるが、曝磁直後はいずれの場合 (曝磁時間、磁束密度のどのような条件でも) も約 20 回 /min に低下する。その後、心拍数は徐々に回復し、やがて平常の値に戻る。

曝磁時間を一定 (6 h) とし、印加する磁束密度を 1 ~ 1.8 T まで変化させた場合の曝磁後の心拍数の回復時間を図 5 に示す。この結果、印加した磁束密度が大きくなれば、回復時間が長くなることで影響の程度が示されている。

次に、印加した磁束密度を一定 (1.5 T) とし、曝磁時間を 2 ~ 6 h まで変化させた場合の曝磁後の心拍数の回復時間を図 6 に示す。この結果、印加した時間が長くなると、回復時間が長くなることで、影響の程度が示されている。従来、曝磁時間は生体影響に重要なパラメータとされないと言われてきたが、この結果は磁束密度と同程度の影響を与えることを示している。

図 5、図 6 の結果から、曝磁磁束密度と印加時間が同様の影響を示すことから、曝磁の影響を曝磁量 (磁束密度×曝磁時間、T・h) としてまとめた結果を図 7 に示す。この結果、心拍数の回復時間がほぼ直線的に曝磁量に比例していることが示された。この関係を直線で近似すれば、次のように表される。

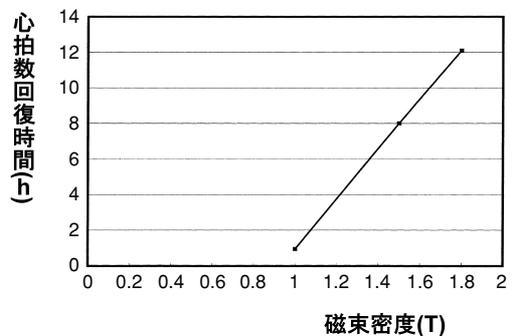


図 5 曝磁後の心拍数の変化  
曝磁時間一定 (6 h)、標本数 18 の平均。

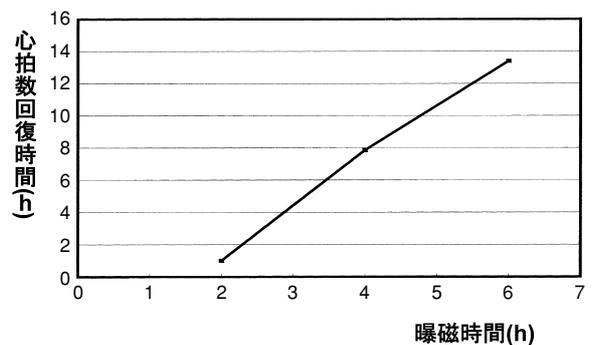


図 6 曝磁後の心拍数の変化  
磁束密度一定 (1.5 T)、標本数 18 の平均。

$$t_0 = 1.8 \{Bt - 3.5\}$$

ただし、 $t_0$ ：曝磁の影響の残る時間(h)

$B$ ：印加した磁束密度 (T, テスラ)

$t$ ：曝磁時間(h)

$Bt_0 = 3.5 (T \cdot h)$ ：泥鰻に対する閾値

ただし、この近似式は  $Bt$  が大きい場合であって、 $Bt_0 = 3.5$  近傍およびそれ以下の値では、現象を正しく表現していない。当然、閾値近傍では、裾を引いている。磁束密度、曝磁時間それぞれに関する閾値は実験量不足で必ずしもはっきりしていない。

#### 4・2 繰り返し曝磁の影響

磁界の生体影響は、曝磁時間が主要な要因でないことと、同時に曝磁の影響は生体に蓄積されないとされてきた。5.2 T の磁束密度により、次のように実験を行った。3 h, 6 h の曝磁による心拍数の回復時間はそれぞれ約 24 h, 47 h である。次に 3 h, 2 回に分けて曝磁した。曝磁する実験の時間間隔を 12 h, 6 h とした。この結果は、連続した曝磁時間 6 h より影響は短く、曝磁時間 3 h より影響は大きくなった。つまり、曝磁は蓄積されていることに

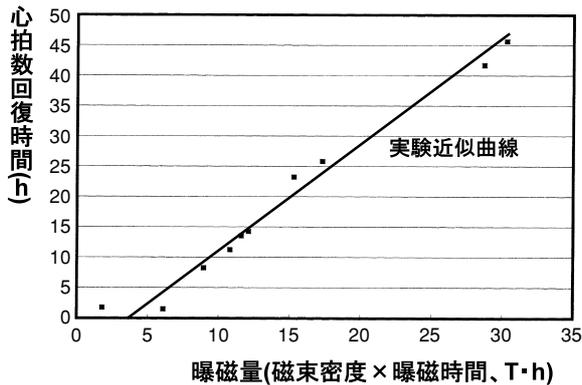


図7 曝磁量としての評価  
磁束密度：1～5.7 T.

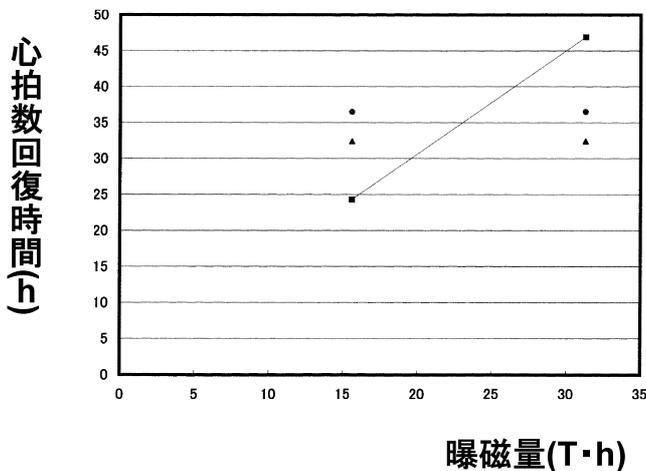


図8 繰り返し曝磁の心拍数回復時間への影響  
磁束密度：5.2 T, 合計曝磁時間：6 h, ■：5.2 T, 1回曝磁, ▲：12 h 間隔, 2回, ● 6 h 間隔, 2回.

なる。曝磁間隔をパラメータとした影響を図9に示す。この結果、影響はかなり長時間に及ぶものと推論される。生体の磁場影響が蓄積されることは、新しい知見といえるが、蓄積影響を定量化するためには、実験量が不足している。

#### 4・3 金魚に対する曝磁の影響

泥鰻に対する磁場影響が泥鰻に対する特有の現象であるか、あるいは他の動物に対しても普遍的に成立するのかを確かめる意味で、金魚に対しても同様な実験を行った。実験に用いた金魚はいわゆる和金である。

金魚は金魚が丁度入る大きさの小型の名刺入れの形状の箱に水と一緒にに入れて、磁場の中に挿入した。箱の中には、ビニールパイプで空気を還流している。金魚は対照群として拘束しただけで、心拍数が低下した。金魚の平常の心拍数は、33.5～34.5回/min程度である。拘束により、心拍数は31回/min程度に減少し、その影響は30 min程度継続した。曝磁後の心拍数の変化を図10に示す。図10は曝磁時間を一定として、印加する磁束密度を変化させている。この結果を曝磁量としてまとめたものが、図11である。

この結果、心拍数の回復時間がほぼ直線的に曝磁量に比例していることが示された。拘束による心拍の低下が31

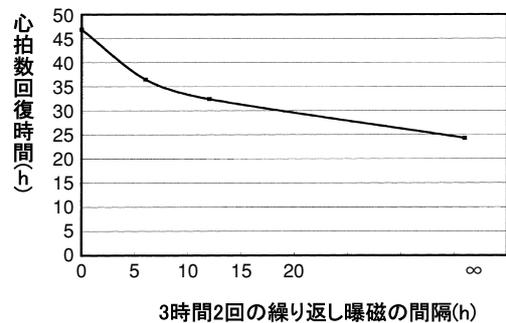


図9 繰り返し曝磁の時間間隔の影響

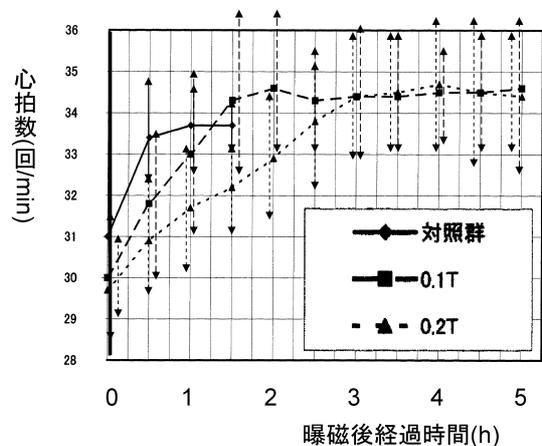


図10 金魚に対する曝磁後の心拍数の変化  
曝磁時間一定 (1 h), 磁束密度 (0.1, 0.2 T), 標本数 10 の平均.

回/min で継続時間が 30 min, 曝磁による心拍の低下が 30 回/min で, 継続時間が 1.5 h ないし 3 h である. この関係を泥鰌の場合と同じような式で表現するには, 実験量が少なく, 近似することは困難であるが, 同様な近似が行えるであろうと推論される. 金魚に対する閾値は泥鰌と同じ値とはならず, 動物の種類による差があるものと考えられ

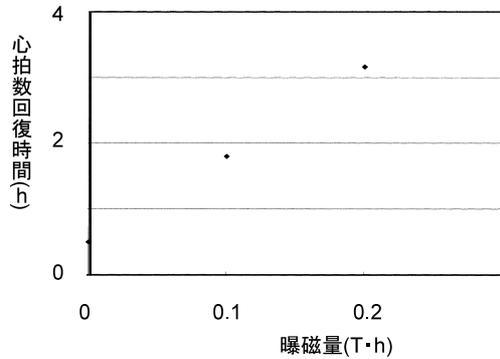


図 11 金魚に対する曝磁量の評価

る.

#### 4.4 泥鰌の曝磁後の心拍波形の変化

次に, 心拍の波形に注目した曝磁の影響を論ずる. 泥鰌の対照群の心拍波形をデジタルオシロスコープで観測した. 雑音を除去する目的で, 40 回の平均加算を行っている (図 12). 次に, 曝磁後の心拍波形を同様な処理を行い, 波形の中心を合わせて, 時間変化の様子を図 13 に示す. この結果, 曝磁直後は心拍波形の振幅が小さくなり, 幅が広がっていることが観測された.

この波形の変化を表現するために, R 波形 (主波形) の振幅, 幅, 面積の曝磁後の変化の様子を求めた. 図 14 に R 波形の振幅, 幅, 面積の定義を示す. この結果を図 15 にまとめてある. 曝磁後, 振幅は減少し, 幅は増加する. しかし, R 波形の面積はほぼ一定である.

### 5. 考察と結論

電磁環境の生体に与える影響については, 種々論じられ, 多くの実験がなされているが, そのデータは必ずしも

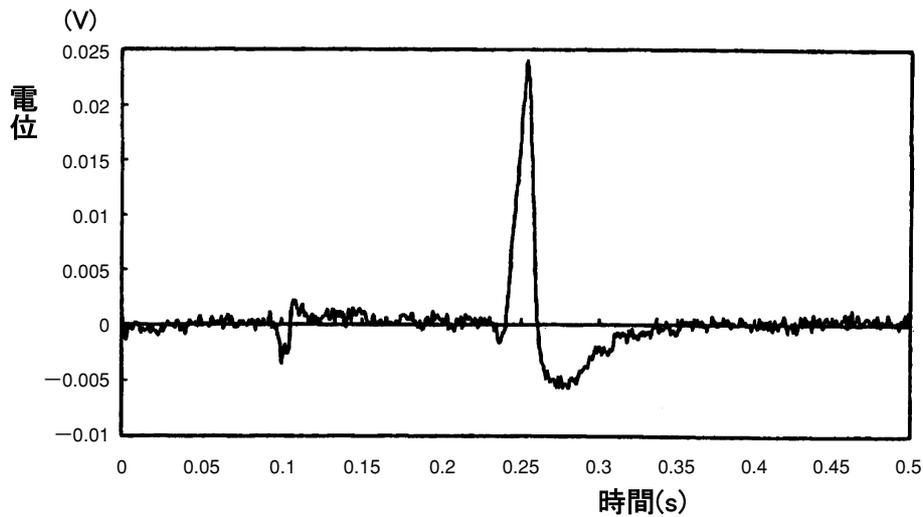


図 12 対照群の心拍波形 (デジタルオシロスコープで平均化)

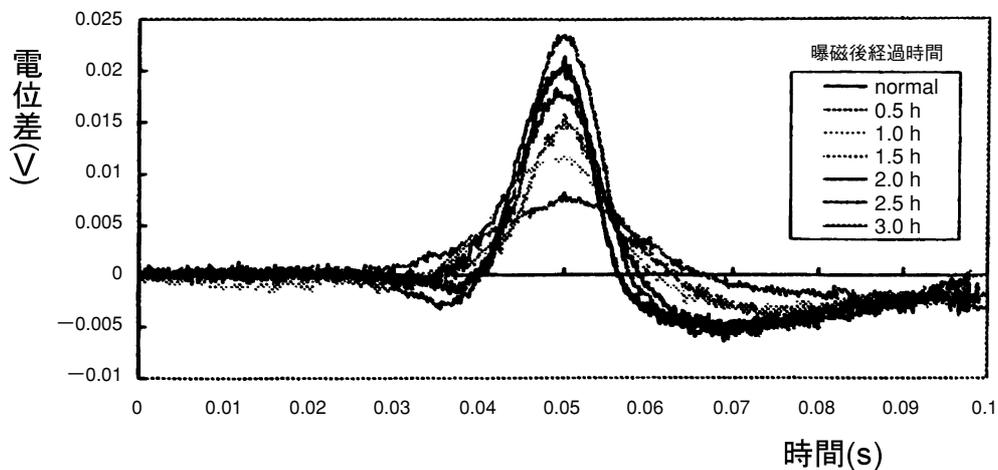


図 13 曝磁後の心拍波形の変化  
1 T·2 h 曝磁, デジタルオシロスコープにより平均化操作 (40 回).

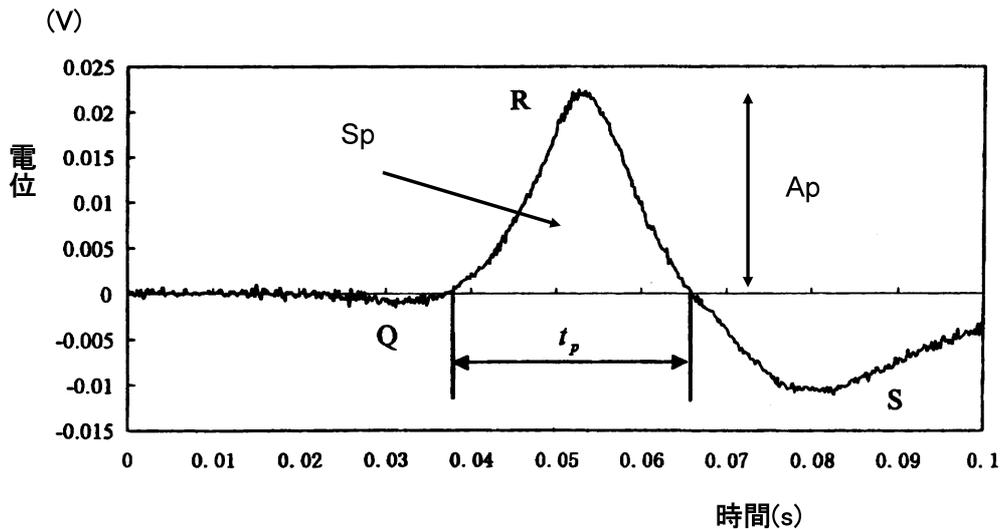
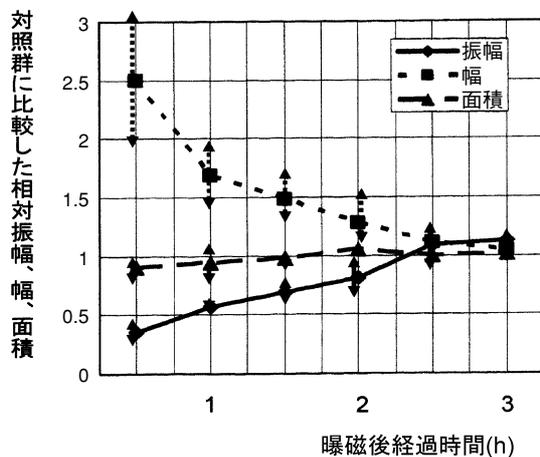


図 14 心拍波形の評価部分の定義

図 15 心拍波形の変化  
1 T·2 h 曝磁後の経過.

はっきりとした一定方向を示しているわけではない。

本論文で述べた結果は、定常強磁場に対する泥鰌と金魚の心拍数と心拍波形への影響を実験的に求めたものである。

- (1) 心拍数への曝磁の影響は、磁束密度（磁界強度）、曝磁時間ともに閾値が存在し、閾値以上の値に対しては、影響がはっきりと現れることが確かめられた。この実験では、磁界の方向が泥鰌では胴に対して横方向というだけで、心臓や肺、脳に対して一定方向ではない。金魚に対しては体側方向からである。左右の識別はしていない。最大磁場は 5.7 T までである。これ以上の磁界は曝磁装置の都合で得られなかった。
- (2) 心拍数への影響は、磁束密度×曝磁時間として表現される。磁束密度と曝磁時間は同様な影響を持つことが示された。この実験結果は、磁場に関しても曝磁総量（dose）として評価できる可能性を

示している。

- (3) 心拍波形への影響は、振幅、幅への影響として現れているが、面積にはほとんど影響が無い。これは、心室の脱分極に要する時間とその同期性の問題と考えられる。この結果、血流量にはほとんど影響が無いが、血圧が低下しているのではないかと推論される。しかし、この動物の血圧測定を行うことはできなかった。

これらの実験事実が、哺乳類一般にも現れるのか、などの問題は全く行われていない。今後の更なる実験が期待される場所である。

本実験で用いた磁界強度は閾値を明確にするために、非常に強いものであり、通常的生活環境に存在するものではなく、直ちに我々の生活で問題にしなければならないことではない。

磁場影響が曝磁総量で示されるものであれば、今後の実験の積み重ねにより、安全基準策定の基礎的な参考資料となれば幸いである。

**謝辞** 本研究に関して、計画段階から終始ご指導いただいた、近畿大学医学部名誉教授秩父志行先生に対して心からお礼を申し上げます。また、強磁場発生装置を本来の実験の時間を割いて利用させて頂いた、名古屋大学工学研究科松井正顕教授、名古屋大学医学部石垣武男教授に厚くお礼を申し上げます。また、本実験を実際に計画し、測定した研究室の学生、中田晶子君、鈴木直哉君、若山倫英君、豊田隆則君、その他の学生にお礼申し上げます。さらに、実験の準備等に種々ご配慮くださった石原準一郎助手に感謝します。

## 文 献

1. 志賀 健, 宮本博司, 上野照剛: 磁場の生体への影響. てらべ

- いあ, 東京, 1991.
2. 前田 坦: 生物は磁気を感じるか, 講談社, 東京, 1985.
  3. 高橋不二雄: 磁気と生物, 学会出版センター, 東京, 1988.
  4. 上野照剛: 生体と磁気. BME. **2** (10): 643-650, 1988.
  5. 松本 是: 生命情報工学. 裳華房, 東京, 1990, pp. 181-XXX.
  6. 上野照剛: 生体磁気研究の今後の課題. 電気学会医用・生体工学研究会, MBE-90-37, 1990.
  7. 岡井 治: 静磁場による人体反応. 電気学会マグネティック研究会, MGA-87-17, 1987.
  8. 斉藤正男: 電磁界の生体作用に関する研究方法・知見の体系的整理・評価と今後の研究方針の検討, 文部省科学研究費, 研究成果報告書, 1980.
  9. 志賀 健, 宮本博司, 上野照剛: 磁場の生体への影響. てらはいあ, 東京, 1991, pp. 109.
  10. Togawa T, Okai O, Oshima M: Observation of blood flow E.M.F. in externally applied strong magnetic field by surface electrodes. Med Biol Eng. **5**: 169-170, 1967.

11. Gaffey CT, Tenforde TS: Alterations in the rat electrocardiogram induced by stationary magnetic fields. Bioelectromagnetics. **2**: 357-370, 1981.

---

池田 哲夫 (イケダ テツオ)

昭和 41 年東北大学大学院工学研究科修了。同年同大学工学部助手。昭和 48 年名古屋工業大学助教授。昭和 52 年同教授。平成 13 年同定年退職。平成 16 年核融合科学研究所客員教授。現在に至る。現在、電波環境協議会会長。専門分野: 通信工学, 特に回路網理論, 環境電磁工学。



所属学会: 電子情報通信学会, 日本建築学会, IEEE.