

平成11年度厚生科学研究費補助金

(生活安全総合研究事業)

研究報告書

「居住環境における電磁界安全対策研究」

居住環境における電磁界安全対策研究

主任研究者 大久保千代次 国立公衆衛生院生理衛生学部長

研究要旨

電磁界の健康影響を把握するには、まず居住環境内でどの程度の電磁界曝露を受けているのか実態解明が必要となる。送電線からの電磁界は平等磁界であり、居住環境に対しては一定の磁界曝露をもたらすが、家電製品による不平等磁界で、家電製品の使用の有無および使用頻度に曝露量は依存すると共に、個々人の身長や挙動により、磁界曝露は大きく変動する。調査の結果、電気毛布やこたつの使用、電子レンジの使用が、磁界曝露量を押し上げる要因となっていること、テレビなどのブラウン管からの電界による誘導電流は三端子電源を接地することにより、70～80%低減されることが分かった。さらには波形が非正弦波的に変化する性質（トランジェント）に着目し、今後のトランジェント磁界評価を行うための研究レビューをし、検討を加えた。電磁界の安全性に関しては、疫学研究で注目される乳がんと電磁界曝露との関連を実験的に追究する目的で、乳がん増殖への影響評価モデルによるプロモーション作用について検討した結果、50Hz、3mT の4週間の磁界曝露条件下ではその作用が認められなかった。電磁界の健康影響に関する調査研究の世界的動向として、世界的に注目された米国が6年間に亘って実施したラピッド計画プロジェクトを終了し、国立環境衛生研究所長報告書が提出された。一方、ラピッド計画の活動や結果、所長報告書に対する米国科学アカデミーの評価が実施され、評価報告書が米国議会に提出された。そこで所長報告書と評価報告書を解説した。

分担研究者

伊坂 勝生 徳島大学工学部教授

多氣 昌生 都立大学大学院教授

中川 正祥 山梨県大月保健所長

牛山 明 国立公衆衛生院研究員

A. 研究目的

建築物内における超低周波電磁界の曝露状況を把握すると共に電磁界曝露とがん増殖との関連の有無を含めて、電磁界の健康影響を追究する。

B. 研究方法

研究班を目的に応じて3課題に分けて調査研究を行った。

第一の課題は、建築物内における 50Hz あるいは 60Hz の商用周波数を含む超低周波（300Hz 以下）の電磁界曝露状況の把握である。これを伊坂および多氣が担当した。居住環境における電磁界曝露評価を行うために、個人曝露量の測定を行った。その結果から個人曝露量を大きく押し上げる電気

こたつ、テレビモニターおよび電車などの乗り物を取り上げ、それらの発生する磁界の分布について考察した。また、高周波トランジェント電磁界に関する研究結果をレビューし、検討を加えた。

第二の課題は、電磁界安全性を評価として最も注目されているがんとの因果関係を実験的に明らかにすることである。そこで超低周波電磁界曝露とがん増殖作用の追究を、大久保および牛山が担当した。これまでに、マウス乳がん細胞をマウス皮膚透明窓へ移植し、その増殖過程に電磁界が如何なる影響を与えるかを2週間にわたって生体顕微鏡的に追究し、その関与を否定したので、今年度はその追究期間をさらに4週間に延長し、皮下での増殖影響評価を実施した。

第三の課題は、電磁界の健康影響に関する国際的な研究状況の把握にある。電磁界曝露の健康影響は世界各国の衛生行政機関にとって重大な環境衛生課題であり、アメリカ、イギリス、スウェーデンを中心に多くの報告が出されている。世界的な関心の広がりとともに先進諸国はこの問題に国家規模で取り組まざるを得なくなっているため、この問題に取り組んでいる各国および国際機関の主なものの紹介として、米国で1992年から行っていたラピッド計画が終了し国立環境衛生研究所長報告書が提出された。更に、ラピッド計画および所長報告書に対する米国科学アカデミーの評価が実施され、評価報告書が米国議会に提出されたので、所長報告書と評価報告書を解説した。報告書に関する調査は大久保、中川が担当した。

各課題についての研究方法の詳細は分担

研究報告書に記載した。

C. 研究結果

第一課題の電磁界曝露評価に関する研究について述べる。その結果、平均曝露磁界は、1mGであるが、冬場の電気こたつ使用により約2倍、電気毛布使用時では約9倍、新幹線に乗車すると約7倍に増加し、低磁界曝露環境内で生活する人にとって暖房器具や新幹線などの乗り物はかなり電磁界発生源となることが判明した。また、テレビモニターなどブラウン管からの電界測定を行った結果、ブラウン管からの電界による誘導電流は三端子電源を接地することにより、70~80%低減されることが分かった。更に、高周波トランジェント電磁界に関しては、トランジェント磁界の実測内容の検討には波形観察が必要であり、低周波領域の磁界成分にも十分留意しなければならないことが分かった。

第二課題の電磁界のがん増殖作用に関する研究について述べる。マウス乳がん由来の細胞株を培養し、この細胞塊を腹部皮下へ移植し、全身性に50 Hz、3 mTの条件で商用周波電磁界を継続的に4週間に亘り曝露して、非曝磁群とがん増殖の程度を比較した結果、両群には差が無く、電磁界のがん増殖作用は認められなかった。

第三の課題は、電磁界の健康影響に関する国際的な研究状況の把握である。今年度はラピッド計画終了を受けて国立環境衛生研究所長報告書と米国科学アカデミーによる所長報告書への評価報告書が議会に提出されたので、両報告書の概要と、特に関心の高い電磁界の発がん性評価に関する事項について翻訳し、解説を加えた。

所長報告書の結論は、「商用周波電磁界

曝露が何らかの健康リスクをもたらすという科学的証拠は弱い。最も強い証拠としては、小児白血病と職業上曝露された成人慢性リンパ球性白血病の2種類のがんとの関連性がある。個々の疫学研究からその関連性支持は弱いものの、複数の曝露測定で、曝露増加に伴って、僅かながらもリスク増加パターンは一貫している。関連性は、小児白血病よりも慢性リンパ球性白血病のほうが幾分弱い。

これに比して、動物実験や細胞などを用いた生物学的影響評価では、散発的に研究結果が報告されてきたが、商用周波電磁界曝露による発がんメカニズム研究と動物による毒性学的研究では、研究間に一貫性はない。特に、長期の電磁界曝露による実験動物において、白血病が増加する兆候は観察されていない。

ヒトの疫学結果と動物実験の結果との間の乖離は、商用周波電磁界の発がん性を説明する際、これを著しく複雑にしている。疫学データではヒトを対象としており、実生活での曝露レベルで、無視出来ない一貫性を示している。この評価は、増加リスクが低いことを考慮すれば、他の要因や誤差が原因ではないかと説得力を弱め低いるものの、商用周波電磁界曝露以外の一貫した説明も発見されていない。

一般的に、実験的研究は、その計画によって、原因と結果の間に何かありそうだというをはっきりと示すことができるが、疫学研究には、原因と結果の関係を立証する能力に重大な限界がある。実質的には、動物や人や細胞で行われたほとんどのメカニズムの研究における全ての実験的な証拠は、環境レベルの商用周波電磁界曝露と生

物学的作用や疾病の原因となる関連を支持できていない。動物や細胞による研究において、電磁界曝露による影響があるという一貫した肯定的な結果の欠如は、この関連が実際に商用周波電磁界が原因であるとの確信を弱めているものの、それが疫学結果の価値を完全に無視することにはならない。

国立環境衛生研究所は、疫学研究により、商用周波電磁界曝露と小児白血病の関連性を提起しているとの弱い科学的証拠から、商用周波電磁界曝露が完全に安全であると認めることはできないと結論づけている。同時に、積極的な規制の考慮を正当化するには不十分である。しかし、実質的には全ての米国人は電気を使っており、それ故に商用周波電磁界へ日常的に曝露されているので、曝露低減に向けた方法を、公衆と規制された社会の両方に教育することに重点を置き続けるような受動的な規制活動を正当化している。国立環境衛生研究所は、商用周波電磁界曝露によって他のがんやがん以外の健康被害については、根拠のあるリスクであるとは考えていない。

商用周波電磁界と人の相互作用は複雑で、今度も確実にひとびとの関心領域であり続けるであろう。ラピッド計画は、質が高く、仮説に基づいた研究の支援を通じて、首尾長く商用周波電磁界に関する科学的知見に貢献し、いくつかの疑問に回答したが、その他はそのままである。ラピッド計画によって得られた知見に基づき、今後商用周波電磁界の研究は、しっかりした仮説を基に白血病を含む基礎研究を保証する領域を設けて、継続すべきである。2つの分野、神経後退性疾患と心拍数変化に関連する心臓疾患に関する最近の研究は注目され、さら

なる研究が求められている。」であった。

米国科学アカデミーによる評価報告書の結論は、ラピッド計画の限界、工学研究計画への評価、科学研究計画(生物学)への評価、リスクコミュニケーションへの評価を行った上で、以下の推奨をしている。

ラピッド計画の結果は、電気の使用が、確認されていない重要な公衆健康障害を有するという議論を支持していない。細胞や動物への電力周波数磁界の影響に関する基礎研究は継続すべきである。しかし、特別な研究資金への働きかけは必要ない。従来の研究資金の構成から研究者らは資金を競争により獲得すべきである。もし、将来のこの分野に関する研究が、そのような構成から資金提供されるので有れば、研究は影響ありと報告されたものの再現研究か、良く定義された機構の仮説を試験するものに限るべきである。もし、慎重に実施されれば、それらの研究は結果が否定的であったとしても価値があるものになる。一般公衆に対し、研究結果を効率的に対話するための努力がなされるべきである。委員会は以下の推奨を行う。

- 1)電力周波数磁界のあり得る健康影響に焦点を当てた特別な研究プログラムには、これ以上資金提供を行わない。
- 2)しかしながら、もし、議会が電力周波数磁界の健康影響に関する焦点を絞った、かつ期間限定の更なる研究計画を保証すると決定するならば、委員会は、学術誌の査読を受け、かつ影響があることを科学的に見込みのある形で提言している研究の再現研究に重きを置くべきであると推奨する。そのような計画は、契約-資金の枠組みを用い、最終の完了報告、も

しくは査読論文公表の要求を研究最後に伴うこととするのが有益である。

- 3)委員会はこれ以上の工学的研究は、それが使用される見込みのある生物学影響が決定されない限り、資金提供されるべきでないとして推奨する。
- 4)国立環境衛生研究所は、ラピッド計画により結果が得られる今後の査読論文情報全てについて収集し、ウェブサイト定期的にそれら情報の集約報告を公表すべきである。
- 5)委員会は、電力周波数磁界の情報提供のために更なる資料が作成され、一般にわかりやすい形で書かれることを推奨する。ウェブサイトはもっと使用者が使いやすく作られるべきである。小冊子 EMF に関する QA は定期的に更新され、一般に入手できるようにすべきである。

D. 考察

居住環境の快適性や安全性を求める時、上下水道、電気、ガスなどのインフラ整備のみならず、カビ、ダニ、浮遊粉塵、酸化窒素、揮発性有機化合物など室内空気の生物学的化学的因子や、温湿度、照明、騒音などの物理的な環境因子を一定水準に保つ必要があるのは言うまでもないが、人々は居住環境やオフィスビルで、より快適性や便利を求めて、さまざまな家電製品やパソコンなどの事務用品が氾濫しており、今後ますます増加すると予想されている。しかし、これらの製品はそれぞれが局所的な電磁界発生源である。換言すれば、居住環境のアムニティは電気の使用によって一定水準に保たれている側面があり、人々は電磁界に曝されて生活していることになる。

一方、電磁界曝露とがんなどの健康影響との因果関係が、欧米の疫学研究によって指摘され、日本を含む先進諸国では、マスメディアを介して国民に漠然とした電磁界に対する不安が漂っている。

電磁界の安全性の検討と、その対策は今日の研究課題といえよう。今日の電磁界問題、特に磁界の結構問題は、1979年に米国のコロラド州において実施された疫学調査が、超低周波電磁界、特に超低周波磁界が人体の健康に影響を及ぼすのではないかという問題提起に始まる。その後、多くの研究が行われてきたが、未だはっきりした結論は得られていない。環境レベルで見られる弱い超低周波電磁界による生体影響に関する現在の状況を整理すれば、①疫学調査の結果は、電磁界発生源と近接した居住環境と小児白血病の罹病率のあいだにやや相関（相対危険率で1.5～2倍程度）があることを示唆している。②超低周波磁界に曝露したときの影響に関する動物実験の結果は、発がんとの関連を支持していない。③*in vitro*の生物学実験の結果は、健康への障害をもたらすような生体影響の存在を示していない。④一部の実験では生体機能への変化（健康に関わるかどうかは不明）の存在を示唆している。ただし、再現性が不十分であり影響の存在を結論づけることができない。

生物学的な研究から、電磁界が人間の健康に害を与える作用を持つことが、多くの実験が行われているにもかかわらず十分に示されないため、疫学調査に見られる相関は、何らかの交絡因子があるか、希な疾病で症例数が少ないことによる偶然によるものであり、疫学調査の結果が健康への障害

の証拠にはならないという解釈がある。この解釈は十分に妥当であるが、これまで実施された調査の多くで小児白血病と電磁界曝露の関連が示唆されていることを考えれば、見落としている要因がないかどうかを慎重に検討することが大切である。

これまでに行われている生物実験では、曝露する磁界を時間的に定常で空間的に均一な、周波数50/60Hzの純度の高い正弦波としてきた。しかし、実際に生活環境中に存在する電磁界は実験装置内の電磁界に比較し、時間的、空間的な変動が大きい。どのような違いがあり、それがどのような性質であるかという実態を把握することが重要な課題である。

本研究では、居住環境における電磁界曝露評価を行うために、個人曝露量の測定を行った。その結果から個人曝露量を大きく押し上げる電気こたつ、テレビモニターおよび電車などの乗り物を取り上げ、それらの発生する磁界の分布について考察した。また、高周波トランジェント電磁界に関する研究結果をレビューし、検討を加えた。その結果、平均曝露磁界は、1mGであるが、冬場の電気こたつ使用により約2倍、電気毛布使用時では約9倍、新幹線に乗車すると約7倍に増加し、低磁界曝露環境内で生活する人にとって暖房器具や新幹線などの乗り物はかなり電磁界発生源となることが判明した。また、テレビモニターなどブラウン管からの電界測定を行った結果、ブラウン管からの電界による誘導電流は三端子電源を接地することにより、70～80%低減されることが分かった。

更に、トランジェント磁界に関する主要研究結果のレビューでは、高周波トランジ

ェント電磁界が注目される理由は(1)存在しているにもかかわらず、今まで 50 または 60Hz ほどには測定されていない、(2)50 または 60Hz の電磁界と比較すると、波高値が同じでも人体誘導電流は格段に大きい、(3)疫学調査結果の中には肺ガンとの関係の可能性を示唆するものがある、(4)ワイヤコードとの関連性があるかも知れない、などが一般に挙げられている。

トランジェントの実態を明らかにするために、生活環境中の商用周波電源に起因するトランジェント磁界の波形の観察と、その頻度を明らかにするための装置が開発されている。3 軸のコイルから成る磁界センサ部および 3 軸の磁界強度に応じた電圧信号を取り出す電子回路部はホラデー社の HI-3627(帯域：2kHz)を改造したものが使われ、直交 3 軸の独立した時間波形をサンプリング周波数 5kHz でノート型コンピュータに収集できるように設計されている。その結果、交流波形の 1 周期毎にその実効値と最大値を比較し、非正弦波波形を検出することができる。

本測定では、一般家庭における滞在時間の比較的長いと思われる居間の、磁界発生源と見なすことができるテレビ受像器付近が測定点として選ばれている。測定結果によると、テレビ使用時の平均レベルは 250nT から 350nT 程度であり、1 周期内での実効値に対して数倍以上のピークの発生は 24 時間の測定で 2 回に過ぎなかった。このときのピーク値は、一回が 1.5 μ T 程度、他の一回は 2 μ T を超えるものであった。これらのピークは立ち上がりが急峻であるが、数 10 ミリ秒以上の比較的持続時間の長いものであった。

今後の研究として、高周波トランジェント電磁界を電界で検出する方法は、電界センサからの方が高周波応答を得るのが簡単であること、方向は一次元でよいこと、が挙げられている。周波数帯域については当初、50-20MHz が設計指針であったが、この帯域の選択理由は、電力系統の開閉に伴う過渡現象を意識したものであり、生体影響の文献調査に基づいているものの、明確ではない。

一方、2~200kHz の帯域を通過した磁界の波高値が 3.3nT を超えるかどうかを調べている研究例がある。この磁界の下限値は磁界波形の観察結果を参考にしてが決められている。高調波の影響を排除するために 2kHz 以下の成分を遮断している。周波数 200kHz は神経刺激作用の上限値と見なされている。

体内誘導電流の観点からは、居住環境において 100kHz までの範囲では磁界の 3 軸成分の観測が重要であると解析されている。但し、人体の身長方向の電界が存在する場合はこの電界成分を定量化しなければならないと指摘されている。

2kHz の帯域までの測定の一例では、トランジェント電磁界と分類できそうな、大きなピーク値をもった波形がそれほど頻繁に発生していないことが示されている。

トランジェントが注目される理由を 4 つ前述しているが、その内、項目(3)は現時点では取り下げられる結果となっており、項目(4)も 1 つの実験的試みでは否定されるに至っている。技術面の問題としては、(a)帯域を低くすれば、高周波成分が抑えられ、その結果、トランジェント磁界の特徴が失われ、一方、(b)帯域を広くとれば、高周波

成分を抽出することができるが、高周波機器からの信号も紛れ込む可能性が大きくなる、ことがあり、その上、3軸の磁界の他に電界も考える必要が出て来るとなると、技術的対応は極めて難しくなる。

ここで超低周波電磁界測定の現状を見ると、50Hz または 60Hz の電磁界、または 1,000Hz 程度までの高調波も含む電磁界の数値データの収集が行われているが、電磁界波形の観察はあまり行われていない。われわれはこのような波形観察（機器に流れる電流の広帯域変流器による観察も含む）を通して電力機器のスイッチングによるトランジェント電磁界の特性を考察しようとしている。このようにすることによって商用周波磁界、高調波磁界およびトランジェント磁界を総合的に把握すると共に、機械式および半導体式のスイッチングによる磁界波形の相違点なども明らかにしたい。

現在、“Transient” という言葉が磁界曝露に関連してしばしば使われている。これは一般には“Transient magnetic field” を意味するが、“Transient exposure to magnetic field” と解することも可能である。前者では高い周波数成分の磁界に注目が集まるが、後者では磁界の時間波形すべてが関係してくる。将来、動物実験の試験条件を検討するとき、このような点も考慮する必要がある。

前年度 50Hz、3 mT という強磁界環境で乳がんの増殖作用を経時的に微小循環レベルで乳がん組織の血管新生を定量的に評価した結果、非曝磁の対照群に比べて乳がん増殖には差が無く、電磁界の全身暴露による乳がん組織への増殖作用は認められなかった。皮膚透明窓による評価は、がん組

織の増殖による3次元的組織構築で2週間が限界であったので、今年度は、移植を腹部皮下に実施し、より長期的な追究を実施したが、4週間以上の追究は、動物福祉の観点から、断念した。移植後4週間までの電磁界曝露影響評価では、前年度と同様の結果を得ることができ、電磁界には乳がん増殖への影響は無いものと判断された。曝露条件は一般の居住環境で遭遇する $0.3 \mu\text{T}$ の1万倍の磁界強度であり、この結果だけで即断は出来ないものの、ある程度は電磁界の安全性を示唆する結果が得られたと思われる。

世界的に電磁界の安全性評価について各国で真剣な取り組み行われているが、昨年度報告したラピッド計画の作業部会は報告書を受けて、最終的な所長報告書が提出され、更には所長報告書に対する米国科学アカデミーによる評価報告書が相次いで議会に提出された。その中で世界的に非常に注目を浴びているは、送・配電線による商用周波数電磁界曝露と小児の急性白血病、および職業性電磁界曝露と慢性白血病との因果関係を、国際がん研究機関の判定基準に準じて、可能性あり(2b : possibility) とした作業部会報告書についてである。

所長報告書では、作業部会報告書の内容は肯定しつつも、電磁界の曝露が何らかの健康リスクを提起していることを示す科学的証拠は弱いとした。ただし、今後も電磁界曝露軽減や教育が必要であるとも言っている。科学的な安全宣言は行っていない。

評価報告書では、作業部会が、国際がん研究機関の判定基準を採用したことに難色を示すと共に、ラピッド計画の結果は、電

気の使用が公衆への健康障害があるという仮説を否定している。

平成 12 年 3 月末の段階では、米国議会がどのような決定をするか未定であるが、作業部会で電磁界による発がんの可能性を認めたその論拠、所長報告書がこれをどう判断し、米国科学アカデミーはどうかを評価したかを理解することは、今後の電磁界安全対策を立てる意味でも、報告書に記載された内容を翻訳し、その情報提供したことは有意義と考える。

E. 結論

家電製品の使用の有無および使用頻度と曝露量について調査した結果、電気毛布やこたつの使用、電子レンジの使用が、磁界曝露量を押し上げる要因となっていること、新幹線への乗車も同様の要因となること、テレビなどのブラウン管からの電界による誘導電流は三端子電源を接地することにより、70～80%低減されることが分かった。また、さらには波形が非正弦波的に変化する性質（トランジェント）に着目し、今後のトランジェント磁界評価を行うための研究レビューをし、検討を加えた。電磁界の安全性に関しては、疫学研究で注目される乳がんと電磁界曝露との関連を実験的に追究する目的で、乳がん増殖への影響評価モデルによるプロモーション作用について検討した結果、50Hz、3mT の 4 週間の磁界曝露条件下ではその作用が認められなかった。電磁界の健康影響に関する調査研究の世界的動向として、世界的に注目された米国が 6 年間に亘って実施したラピッド計画プロジェクトを終了し、国立環境衛生研究所長報告書が提出された。一方、ラピッド

計画の活動や結果、所長報告書に対する米国科学アカデミーの評価が実施され、評価報告書が米国議会に提出された。そこで所長報告書と評価報告書を解説したが、商用周波電磁界曝露による健康障害の可能性が低いと結論すると共に、更なる電磁界曝露の低減化も求めている。

厚生科学研究費補助金（生活安全総合研究事業）
分担研究報告書

電磁界暴露評価に関する研究

分担研究者 伊坂勝生 徳島大学工学部電気電子工学科教授
多氣昌生 都立大学大学院電気工学専攻教授

研究要旨

居住環境における電磁界暴露評価を行うために、個人曝露量の測定を行った。その結果から個人曝露量を大きく押し上げる電気こたつおよび電車などの乗り物を取り上げ、それらの発生する磁界の分布について考察した。また、高周波トランジェント電磁界に関する研究結果をレビューし、検討を加えた。

A. 研究目的

極低周波（ELF）電磁界の人体影響問題に関連して、電力設備周辺、居住環境および職場環境等における電磁界特性の解明が進んでいる。そして個人曝露量の測定結果も多く発表されている。

本研究の初年度（平成9年度）報告では、居住環境の広い空間の電界・磁界の発生源として送電線を取り上げ、日本および米国の送電線の用地幅を考慮に入れて、その電界・磁界特性の比較が行われた。さらに家庭内、地下ケーブルが埋設された歩道上、デパート内、電気鉄道車両内における不平等磁界特性が明らかにされた。

平成10年度報告ではトランジェントの実態を明らかにするために、生活環境中の商用周波電源に起因するトランジェント磁界の波形の観察と、その頻度を明らかにするための3軸のコイルから成る磁界センサ装置（帯域：2kHz、サンプリン

グレート：5kHz）が開発された。測定結果の一例によると、テレビ使用時の平均レベルは250nTから350nT程度であり、1周期内での実効値に対して数倍以上のピークの発生は24時間の測定で2回に過ぎなかった。これらのピークは立ち上がりが急峻であるが、数10ミリ秒以上の比較的持続時間の長いものであった。

本報告書では個人磁界曝露量の実測を通して、曝露量を押し上げる要因として暖房器具および乗り物（新幹線車両や在来線電車）などの磁界発生源を見出し、その磁界特性を明らかにする。これらの磁界は不平等特性を示すが、ブラウン管が使われているVDT（映像表示端末）およびテレビからの電界も極めて大きな不平等性を示すことを定量的に明らかにする。トランジェント磁界についてはこれまでの研究結果をレビューし、今後の研究について考察する。

なお、本報告書では磁束密度を単に磁

界と呼ぶ。また、電界強度を電界と呼ぶ。

B. 研究方法

2名の学生の個人曝露量に関する実験では EMDEX MATE を使用している。この測定器は周波数帯域 40~1,000Hz の 3 次元磁界曝露量計で、サンプリング時間は 0.5 秒である。測定終了後、計測時間、平均値および最大値などのデータが表示されるようになってきている。学生 A 君については電気式暖房器具の使用が始まる時期を含めて 1 ヶ月間の連続測定を行っている。データは 1 日毎に整理し、30 日間の曝露磁界の日変化を明らかにする。学生 B 君は①仕事、②大学での受講、③睡眠（電気毛布の使用）、④休日一日の休息、⑤大学における学生実験、⑥新幹線による出張、⑦飛行機による出張、の 7 つの行動パターンに分けた個人曝露量を明らかにするための実測を行っている。これらの実験を通して、曝露量を増加させる要因を見つける。

電気こたつからの磁界特性の測定には個人曝露量計 EMDEX II を使用する。こたつの上面、下面、その他その周辺における磁界をサーモスタットの動作前後に測定し、定常状態での磁界の変化を見る。また、トランジェント磁界の測定には帯域 10kHz の検出器を使用し、オシロスコープでその波形観察を行う。

家庭内の電界発生源の 1 つとしてブラウン管を使った VDT やテレビがある。実験は次の場合について、それぞれ人体モデルを接地および非接地の場合について行った。

(1) VDT 前面から 50cm の所に人体モ

デルを配置し、VDT の三端子電源を接地した時としない時

(2) テレビの画面から 160cm 及び 50cm の距離に人体モデルを配置した時

人体モデルの頸部の誘導電流は、その頸部を切断し、双方を電流計で短絡することにより測定可能となる。表面電界の測定においては、表面電界センサとして銅箔と導電性布で作られた半径 2cm のガード電極付円形電極を用い、ここに誘導される電流値から平均的な表面電界強度を求めた。測定箇所は額、後頭部及び頭頂部の 3 点である。測定結果の電流値は全て 60Hz 成分である。なお、実験に用いた VDT は Macintosh 製の LC520 型 (13in ディスプレイ)、テレビは NEC 製の 28in カラーテレビである。

乗り物における曝露磁界特性については前述の EMDEX II を胸部、腰部および足首に同時に固定し、曝露磁界に差がどうかを実験する。新幹線を実験の対象にするが、付随的に飛行機や電車（首都圏）でも同時測定を行う。

倫理面への配慮として、被験者の学生に対する調査に際して、個人情報外部に漏洩侵略が生じないように十分に考慮すると共に、調査によってプライバシー侵害が生じない事など、インフォームドコンセントを事前に実施した。

□

C. 研究結果と考察

1. 個人曝露量測定結果（その 1）

学生 A 君の個人磁界曝露量の実測結果を図 1 および 2 に整理している。図 1 および 2 はそれぞれ 30 日間の平均および最大曝露磁界の日変化を示している。使用

された磁界曝露量計は EMDEX MATE であり、腰部に取り付けられている。この学生は朝から夕方までコンビニエンスストアで働き、夕方 6 時から 9 時までは大学で講義に出席し、その後は大学近くの下宿で過ごす生活を 30 日間続けた。ただし、土・日曜日は夕方 6 時頃には家に帰るなど、この 30 日間は仕事と学業ともに規則正しい生活を送っている。下宿の周辺および通勤・通学路の周りには 6.6kV 配電線があるが、送電線はない。

EMDEX II により測定された曝露磁界の日内時間変化の一例を図 3 に示す。正午頃より曝露磁界が大きくなっているが、これは弁当の電子レンジによる加熱の仕事が始まることに起因している。毎日の個人曝露量はほぼ同じであったが、実測を始めて 20 日目に電気こたつを使うようになると、若干大きくなり、平均曝露磁界は約 $0.1 \mu\text{T}(1\text{mG})$ から約 $0.2 \mu\text{T}(2\text{mG})$ に増加した (図 1 参照)。一方、最大曝露磁界は毎日、ほぼ $10 \mu\text{T}(100\text{mG})$ 程度であり、平均値の約 50 から 100 倍の強度になっている。なお、図 2 を見ると、実測 7 日目に最大曝露磁界が $60 \mu\text{T}(600\text{mG})$ を超えているが、これは携帯電話による磁界曝露量計の誤動作の誘発に起因している。EMDEX II よりも EMDEX MATE の方が誤動作の度合いが大きいことが分かった。

2. 個人曝露量測定結果 (その 2)

学生 B 君自身による個人曝露実測の結果のまとめを表 1 に示す。この学生は大手スーパーに生鮮野菜部門の担当として勤務し、夕方 6 時から 9 時までは大学で

講義に出席した。なお、下宿の周辺には 6.6kV 配電線があるが、送電線はない。

本測定においては 7 つの行動パターン、すなわち①仕事、②大学での受講、③睡眠 (電気毛布の使用)、④休日一日の休息、⑤大学における学生実験、⑥新幹線による出張、⑦飛行機による出張、の曝露量がそれぞれ計測され、その時間平均値が計算されている (表 1 参照)。使用された磁界曝露量計は EMDEX MATE で、腰部に取り付けられた。行動パターン①の仕事では、入店と同時に曝露量の計測を開始し、出店と同時に曝露量計のデータをパソコンに転送し、データを解析した。データの収集方法は他の行動パターンについても同様である。

表 1 を見ると、次のことが分かる。行動パターン①の仕事では $0.1 \mu\text{T}(1\text{mG})$ 以下の平均曝露磁界となっており、職場は低磁界曝露環境である。大学における②受講および⑤実験においても平均曝露磁界は同じように小さい。行動パターン①、②および⑤における最大曝露磁界はおおよそ平均値の 10~20 倍となっている。新幹線に乗ると、工作中よりも時間平均で約 8 倍の曝露を受けている。飛行機に乗ると、この値は約 2 倍となり、また、電気毛布に包まって睡眠をとると、約 9 倍になる。下宿において休日の昼間に休息をとると、平均曝露磁界は $0.02 \mu\text{T}(0.2\text{mG})$ となっている。

低磁界曝露環境内で生活する人にとって暖房器具や新幹線等の乗り物はかなり大きな磁界発生源となることが分かった。

□

表1 各行動パターンによる平均磁界

□

および最大磁界 (単位: μT)

行動パターン	平均値	最大値
①仕事	0.09	2.03
②受講	0.07	0.93
③睡眠	0.80	5.17
④休息	0.02	0.71
⑤実験	0.09	1.21
⑥新幹線乗車	0.69	16.90
⑦飛行機搭乗	0.20	1.29

3. 電気こたつからの磁界特性

供試電気こたつはファンを有する交流100V-600Wのサーモスタット温度制御式のものである。磁界分布の測定にはEMDEX IIを用いた。

図4にこたつの上面(81cm x 81cm)における磁界分布を示す。中心部が $40\mu\text{T}$ 程度の高磁界になっているが、これはこの周辺にループ状の電熱線が配線され、ファン駆動用モータが存在しているためである。上面における磁界はほぼ $1\sim 40\mu\text{T}$ の範囲に入っている。一方、足を入れる場所であるこたつの下面(81cm x 56cm)ではその上面と比べて磁界は低くなっており、最大でも $1\mu\text{T}$ 程度である(図5参照)。下面における磁界はほぼ $0.1\sim 1\mu\text{T}$ の範囲に入っている。以上の実験結果から、電気こたつでは高磁界は局所的に存在しており、磁界分布は極めて強い不平等性を呈していることが分かった。

供試電気こたつは温度コントロールのためにサーモスタットが動作するようになっており、その動作瞬時に過渡電流が流れ、トランジェント磁界が発生する。磁界波形の一例を図6に示す。このような

トランジェント磁界については考察で詳述する。

本実験ではヒータ電流が遮断される時、磁界が増加する領域と、逆に低減する領域が存在することが分かった。このような現象は各方向成分毎にフェイザ解析を行うことによって説明することができる。

4. ブラウン管からの電界の測定

人体モデルを用いてVDTおよびテレビの放出電界による頸部(首)の誘導電流と頭部の体表面電界の測定結果を述べる。

図7に頸部の誘導電流の測定結果を示す。VDTからの電界による誘導電流は三端子電源を接地することにより、人体モデルが接地の時は84%、非接地の時は74%ほど低減されている。すなわち、VDTの接地は人体誘導電流の低減に大きな効果がある。テレビからの誘導電流は、人体モデルとテレビまでの距離を160cmから50cmにすることにより倍増され、人体モデルが接地の時は約8倍、非接地の時は約10倍になっている。また、どの場合も誘導電流は人体モデルを接地した時の方が大きく、約1.4~2.4倍程度となった。非接地VDTからの頭部表面電界の測定結果を図8に示す。表面電界は後頭部よりも額の方が大きくなり、人体モデルが接地の時は3.1倍、非接地の時は18倍となっている。また、人体モデルは接地した方が発生する電界は大きく、額、頭頂部および後頭部でそれぞれ1.8倍、3.9倍および10.4倍となった。その他の表面電界の測定でも、これと類似の結果が得られた。

次に、測定された頸部の電流と同じ値

の電流を誘導する一様電界を計算すると、数 V/m となるが、テレビからの距離が 50cm の時のみ約 30V/m と大きくなることが分かった。

5. 乗り物における曝露磁界特性

新幹線乗車時の測定結果をそれぞれ表 2 に示す。各部位における不平等性を調べるため平均値の差の検定を有意水準 5%で行った。その結果、新幹線の座席では胸部と腰部のそれらで有意差はなく、足部とそれらには有意差があることが分かった。これは新幹線車両の床下にある電動機等が大きな磁界発生源になっていると考えられる。

表 2 新幹線乗車時の磁界曝露量

	新幹線		
	胸部	腰部	足部
測定回数	8	8	7
平均値 (μ T)	0.14 ~3.20	0.14 ~3.26	0.17 ~6.30
最大値 (μ T)	1.92 ~18.20	2.01 ~16.90	3.17 ~30.40

□

表 2 より平均値もしくは最大値の幅が各部位とも非常に大きい事が分かる。このことは電車の種類、乗車位置などによって磁界曝露量が大きく異なるためであると考えられる。

次に各部位（胸部、腰部、足部）での磁界の平均値の相関関係を解析した。腰部と胸部、足部と腰部、足部と胸部のそれぞれの相関図を図 9、10 および 11 に示す。これら 3 組の相関係数を求め、有意水準 5%で検定を行った。その結果、それ

ぞれの関係には正の相関があることが認められた。なお、飛行機や電車でのデータも収集し、同様の解析を行っているが、飛行機では、胸部と腰部および胸部と足部では相関がないが、腰部と足部では相関があることが明らかになった。電車では、新幹線の場合と同様に各部位とも相関があるという結果を得た。

D. トランジェント磁界に関する主要研究結果のレビューおよび考察

高周波トランジェント電磁界が注目される理由は(1)存在しているにもかかわらず、今まで 50 または 60Hz ほどには測定されていない、(2)50 または 60Hz の電磁界と比較すると、波高値が同じでも人体誘導電流は格段に大きい、(3)疫学調査結果の中には肺ガンとの関係の可能性を示唆するものがある、(4)ワイヤコードとの関連性があるかも知れない、などが一般に挙げられている。

以下に、これまでの国内外の研究をレビューし、今後の研究の方向について考察する。

1. ポジトロン (Positron) の性能検査

Armstrong 等によってトランジェント電磁界と肺ガンの関係はカナダケベック州とフランスの電力会社作業員のケースコントロール研究により明らかにされている[1]。その後、Savitz 等によっても同様の関係が否定されていない[2]。Armstrong 等は当初、200V/m、10-15MHz の帯域の IREQ メータと少し帯域の広い 5-20MHz の Positron モデル 378101 のメータを用意したが、結局、多少感度の良

い Positron メータを曝露調査に供している。このメータは高周波トランジェント電磁界の他に 60Hz の電界と磁界のデータを収集することができるように設計されたものである[3]。

最近、Positron の性能検査結果が発表されている[4]。動作チェックされた内容は以下の通りである。

(1) 電子回路のチェック

トランジェント電界検出回路の入力段には L と C から構成されるハイパスフィルタがあるが、これらの部品の定数から遮断周波数を計算すると、約 200kHz となる。入力段には周波数帯域が 5~20MHz のバンドパスフィルタに相当する回路はなく、数 100kHz~数 100MHz の入力信号は全て比較回路に入っていくことになる。

(2) 平行平板電極法によるチェック

正極性の入力変化のみに応答する。すなわち、1つのスイッチングトランジスタのベース-エミッタ間に入力信号が入るようになっているために時間変化が正のトランジェント電界に応答する。12.5MHz の正弦波をもつバースト信号の継続時間が 2,4,10 μ S の場合、150V/m 以上の振幅でカウンタが動作する。また、立上りの遅い単極性のトランジェント電界の場合はスイッチングトランジスタが 1 μ S も動作しないので、その波高値が大きくてもカウンタは働かない。

(3) 電流注入法によるチェック

12.5MHz の正弦波をもつバースト信号（継続時間：1 μ S）には応答しない。カウンタ動作に必要なバースト信号の振幅はその内部にある正弦波の周波数に依存する。カウンタを確実に動作させるた

めには入力信号の立上り速度が十分に大きくなければならない。

(4) 屋外使用におけるチェック

ハイドロケベック電力会社で使用されているトランシーバ（138.4MHz、2W）を 5 秒間動作させると、0.5~1m の範囲内にある Positron は約 5 秒間のカウンタ動作が確認された。両者の距離が 5m を超えると、Positron の出力は 0 であった。高磁界曝露グループに分類される作業員はトランシーバや携帯電話が装備されている作業車を使っており、電力設備からのトランジェント磁界の計測ではなく、通信設備からの電波を計測していた可能性が高い。

(5) TEMセルによるチェック

Positron は 8MHz 以下の周波数では 300V/m までの電界に対して応答しない。8-50MHz では 26.3~300V/m に対して、50MHz 以上では 98V/m 以下に対して、計測データが定まらない。トランシーバに関係する 130MHz の周波数では 2.8V/m を超えると、変動の少ないデータが得られる。

(6) 電力作業環境におけるチェック

文献[1]で高磁界曝露グループに分類された職種を 5 つ選び出し、それらの作業環境において 135~145 MHz 帯と 20~600MHz 帯の受信装置を持ち込み、トランジェント電磁界の計測を行った。その計測結果と Positron によるデータとの比較が行われた。合計で 261 回の無線交信が記録され、その内の 45 件は仕事に関連し、他の 216 件の無線交信はタクシー、警察、救急車からのものであった。Positron は 45 件の内、23 件を記録し、216 件の内、

唯の 17 件のみの記録に終わっている。同時に 49 回の開閉操作が行われ、その内、Positron は 4 回ほど補足している。このように Positron は目的通りの計測を行っていないことが裏づけられた。

その他にも、14MHz、145MHz、300MHz で回路に共振が発生することが紹介されている [5]。この問題は商品化の過程で数 100MHz の信号に応答するように設計変更されたときに付随的にもたらされたものであると説明されている。

2. ワイヤコードとの関連性

トランジェント電磁界とワイヤコードの関連性を究明するために米国の 156 軒の住宅において 24 時間またはそれ以上の時間にわたってトランジェント磁界の発生頻度が調べられている [5]。この研究で使用されたトランジェントカウンタの仕様は下記の通りである。

- ・磁界センサ：直交 3 軸コイル式磁界センサ
- ・磁界の合成：それぞれの磁界は積分・増幅され、絶対値回路に入力される。その出力は加算され、しきい値と比較される。
- ・しきい値：3.3nT(下限値)／33nT(上限値)
- ・周波数帯域：2～200kHz
- ・計測時間：20 秒間毎

しきい値は今までに行われた住宅における磁界波形観察結果に基づいて決められている。3.3nT の磁界は住宅における典型的な強度と考えられている。周波数応

答については汎用演算増幅器の使用を可能にするため、および電流による神経細胞刺激能力が 200kHz を超えると、急激に低下するという知見に基づいて 200kHz を決定している。また、60Hz およびその高調波磁界の影響を排除するために遮断周波数を 2kHz に設定している。

通常の E L F 磁界測定器では直交 3 軸のそれぞれの磁界の 2 乗の和の平方根を合成磁界としているが、ここでは 200kHz の磁界測定を可能にするために磁界の各成分の絶対値の和を測定対象としている。156 軒の住宅での実測の結果、VHCC よりも OLCC のワイヤコードの家屋において、トランジェント磁界の発生が盛んであった。すなわち、小児ガンの発生とワイヤコードの VHCC との関連性の証明を補強することはできなかった。

なお、トランジェント磁界測定器は現在、米国 Enertech 社から市販されているが、上記の実測に用いられた測定器の仕様とは、周波数帯域 (2～180kHz)、しきい値 (上限値：50nT／下限値：5nT)、および計測時間 (10 秒) の点で異なる。

3. 高周波電磁界による体内誘導電流

周波数 100Hz～100kHz の電界・磁界と人体モデル (楕円体) とのカップリング現象を解析し、トランジェント電磁界の影響について討論した論文がある [6]。主な結論は次の通りである。

(1) 非接地の成人と子供の体内に誘導される電界の大きさで比較すると、25～2,000V/m の電界と 1 μ T の磁界は同等である。電界の向きが人体の身長方向、すなわち垂直方向のときは 25kV/m の電界

が、水平方向のときは $2,000\text{V/m}$ の電界がそれぞれ $1\mu\text{T}$ の磁界と同じ作用をもつ。

(2) 平等電磁界と不平等電磁界における体内誘導電流の大きさの違いを考察すると、磁界発生源が接近していない状態では 2 倍以下になっている。

(3) 米国の居住環境におけるトランジェント電界と磁界の典型値 (平均的な peak-to-peak 値) はそれぞれ 2V/m および $0.02\mu\text{T}$ である。この値を参考にする、体内誘導電界の大きさは平均的には磁界による方が大きい。しかしながら、電界が人体の身長方向のときはこの関係が逆転する。したがって、トランジェントの実測に際しては 3 次元磁界の他に人体の身長方向 (直立の場合は垂直方向、横臥の場合は水平方向) の電界も加える必要がある。

(4) 米国における居住環境の 60Hz 電界および磁界はそれぞれ $1\text{--}20\text{V/m}$ および $0.01\text{--}0.2\mu\text{T}$ である。体内誘導電界に関しては一般に磁界の影響の方が大きい、電界の向きが身長方向と一致すると、電界の影響は磁界の影響と同じ程度になる。

4. 波形観察

トランジェントの実態を明らかにするために、生活環境中の商用周波電源に起因するトランジェント磁界の波形の観察と、その頻度を明らかにするための装置が開発されている [7]。3 軸のコイルから成る磁界センサ部および 3 軸の磁界強度に応じた電圧信号を取り出す電子回路部はホラデー社の HI-3627 (帯域: 2kHz) を改造したものが使われ、直交 3 軸の独立した時間波形をサンプリング周波数 5kHz

でノート型コンピュータに収集できるように設計されている。その結果、交流波形の 1 周期毎にその実効値と最大値を比較し、非正弦波波形を検出することができる。

本測定では、一般家庭における滞在時間の比較的長いと思われる居間の、磁界発生源と見なすことができるテレビ受像器付近が測定点として選ばれている。測定結果によると、テレビ使用時の平均レベルは 250nT から 350nT 程度であり、1 周期内での実効値に対して数倍以上のピークの発生は 24 時間の測定で 2 回に過ぎなかった。このときのピーク値は、一回が $1.5\mu\text{T}$ 程度、他の一回は $2\mu\text{T}$ を超えるものであった。これらのピークは立ち上がり急峻であるが、数 10 ミリ秒以上の比較的持続時間の長いものであった。

5. 今後の研究

高周波トランジェント電磁界を電界で検出する方法は、電界センサからの方が高周波応答を得るのが簡単であること、方向は一次元でよいこと、が挙げられている。周波数帯域については当初、 $50\text{--}20\text{MHz}$ が設計指針であったが、この帯域の選択理由は、電力系統の開閉に伴う過渡現象を意識したものであり、生体影響の文献調査に基づいているものの、明確ではない。

一方、 $2\text{--}200\text{kHz}$ の帯域を通過した磁界の波高値が 3.3nT を超えるかどうかを調べている研究例がある。この磁界の下限値は磁界波形の観察結果を参考にして決められている。高調波の影響を排除するために 2kHz 以下の成分を遮断してい

る。周波数 200kHz は神経刺激作用の上限値と見なされている。

体内誘導電流の観点からは、居住環境において 100kHz までの範囲では磁界の 3 軸成分の観測が重要であると解析されている。但し、人体の身長方向の電界が存在する場合はこの電界成分を定量化しなければならないと指摘されている。

2kHz の帯域までの測定の一例では、トランジェント電磁界と分類できそうな、大きなピーク値をもった波形がそれほど頻繁に発生していないことが示されている。

本章の始めにトランジェントが注目される理由を 4 つ挙げているが、その内、項目(3)は現時点では取り下げられる結果となっており、項目(4)も 1 つの実験的試みでは否定されるに至っている。技術面の問題としては、(a)帯域を低くすれば、高周波成分が抑えられ、その結果、トランジェント磁界の特徴が失われ、一方、(b)帯域を広くとれば、高周波成分を抽出することができるが、高周波機器からの信号も紛れ込む可能性が大きくなる、ことがあり、その上、3 軸の磁界の他に電界も考える必要が出て来るとなると、技術的対応は極めて難しくなる。

ここで ELF 電磁界測定の見ると、50 または 60Hz の電磁界、または 1,000Hz 程度までの高調波も含む電磁界の数値データの収集が行われているが、電磁界波形の観察はあまり行われていない。われわれはこのような波形観察（機器に流れる電流の広帯域変流器による観察も含む）を通して電力機器のスイッチングによるトランジェント電磁界の特性を考察

しようとしている。このようにすることによって商用周波磁界、高調波磁界およびトランジェント磁界を総合的に把握すると共に、機械式および半導体式のスイッチングによる磁界波形の相違点なども明らかにしたい。

現在、“Transient” という言葉が磁界曝露に関連してしばしば使われている。これは一般には“Transient magnetic field”を意味するが、“Transient exposure to magnetic field”と解することも可能である。前者では高い周波数成分の磁界に注目が集まるが、後者では磁界の時間波形すべてが関係してくる。将来、動物実験の試験条件を検討するとき、このような点も考慮する必要がある。

E. 結論

過去 3 年間の研究により次の点を明らかにした。

- (1) わが国と米国における送電線からの電界・磁界特性の相違点について送電線用地幅を考慮に入れて明らかにした。
- (2) 日常生活空間における磁界分布の測定を行い、その不平等性について検討を行った。
- (3) トランジェント磁界の実測を行い、帯域が 2kHz の磁界測定器を使った場合の波高値や峻度を観察した。
- (4) 個人磁界曝露量実測を行い、曝露量を押し上げる磁界発生源としての新幹線車両、在来線車両および飛行機について実験データを収集した。
- (5) ブラウン管を有する装置に接地を取ると、その放出電界は 70~80% 程度低減する。

(6) トランジェント磁界の実測内容の検討には波形観察が必要であり、低周波領域の磁界成分にも十分留意しなければならない。

参考文献

[1] B. Armstrong et al.: Association between exposure to pulsed electromagnetic fields and cancer in electrical utilities workers from Quebec, Canada and France, *Am J of Epidemiology*, 140: 805-820, 1994.

[2] D. A. Savitz et al.: Lung cancer in relation to employment in the electrical utility industry and exposure to magnetic fields, *Occup Environ Med* 54: 396-402, 1997.

[3] O. Heroux: A dosimeter for assessment of exposures to ELF fields,

Bioelectromagnetics 12: 241-257, 1991.

[4] P. S. Maruvada et al.: An investigation to identify possible sources of electromagnetic field transients responsible for exposures to reported in recent epidemiological studies, *IEEE Trans. Power Delivery*, 15:266-271, 2000.

[5] W. T. Kaune et al.: Rate of occurrence of transient magnetic field events in U.S. residences, *Bioelectromagnetics* 21:197-213, 2000.

[6] W. T. Kaune et al.: Comparison of coupling of humans to electric and magnetic fields with frequencies between 100Hz and 100kHz, *Bioelectromagnetics* 18: 67-76, 1997.

[7] 多氣、伊坂：電磁界曝露評価に関する研究(分担研究)、平成10年度厚生科学研究費補助金・研究報告書

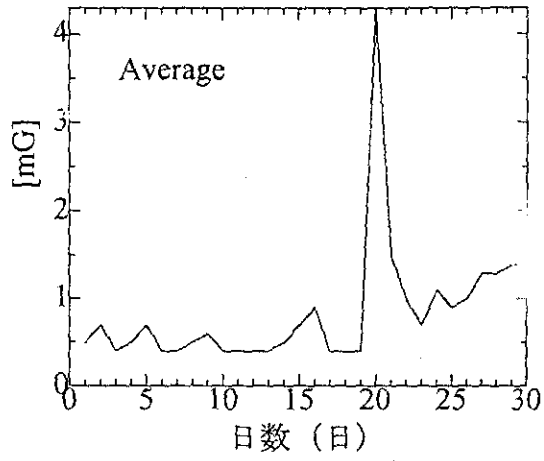


図1 30日の平均値の変化
(サンプリング周期 0.5sec)

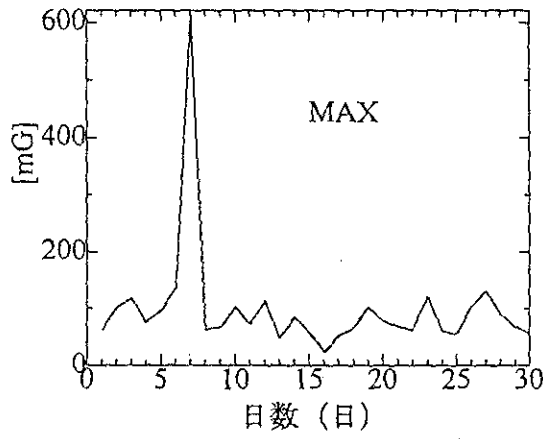


図2 30日の最大値の変化
(サンプリング周期 0.5sec)

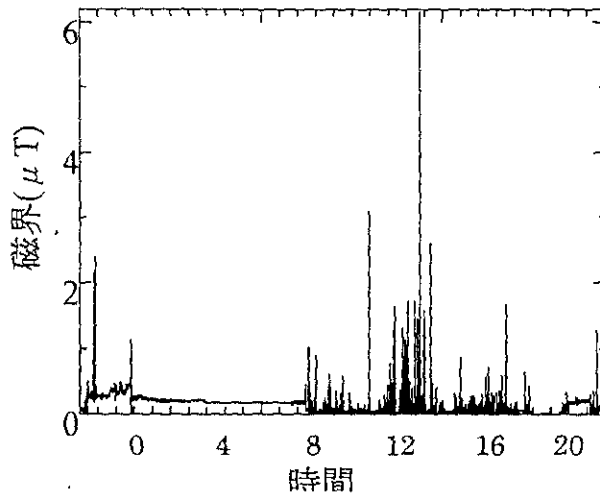


図3 1日の暴露磁界の変化
(サンプリング周期 3sec)