

総括研究報告書

居住環境アメニティ研究「電磁界安全対策調査研究」

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 近年健康問題との関連から関心を集め始めている非正弦波的な成分であるトランジェントの居住環境内での実態調査を行うための計測器を開発し、その測定例をしめした。その結果、トランジェントに相当する明らかな大きなピークの発生は 24 時間で 2 回に過ぎず、それ程頻繁には発生する可能性は低かった。今年度の予備的調査を踏まえ、次年度には本格的調査を実施したい。商用周波数電磁界曝露による乳がん組織増殖への影響を経時的に評価できる担がんモデル作成し、50 Hz、3 mT の条件で乳がん増殖への影響を追究した結果、電磁界曝露による影響は認められなかった。商用周波数電磁界の健康影響は、各国政府にとっても重大な行政課題であり、注目されている。今年度出された米国ラピッド計画のワーキンググループ報告書の内、特に関心を集めている白血病について翻訳し、解説を加えた。

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

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。

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。

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。米国が 1992 年から行っていたラピッド計画の報告書に関する調査は中川が担当した。

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。

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。

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。居住環境では、商用周波数のみならず、電源のオンオフに起因する大きなピークをもつ非正弦波 (トランジェント) が、健康影響の関連から注目を集めはじめているものの、その詳細には不明な点が多い。そこでトランジェントの実態兆

歳を目的として、3軸方向の測定が可能な機器開発に着手し、これに成功した。そこで、一般家庭内におけるトランジェントの発生実態の事例調査を行った。その結果、大きなピークを有するトランジェントは24時間中2回に過ぎず、その発生頻度は高くないことが示唆された。

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、これを蛍光色素でラベルした後に、マウス背側皮膚透明窓内へ移植したがん細胞が、がん微小循環網を構築し、経時的に増殖する過程を定量的に把握することができた。この担がんモデルを対象に、全身性に50 Hz、3 mTの条件で商用周波数を継続的に2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。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・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、今年度は米国のラピッド計画が今年度最終年を迎え、ワーキンググループ報告書が提出されたので、特に関心を集めている白血病について翻訳し、解説を加えた。

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、その対策は今日的な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、昨年度に空間的な変動に注目した測定法の検討を実施した。そこで、今年度は、時間的な変動、特に波形が非正弦波的に変化する性質に着目した実態調査を行うための測定システムを開発し、実際に一般家庭内での測定事例を紹介した。

その結果、2kHz までの帯域で見した場合

に、テレビ使用時の平均レベルは 2.5mG から 3.5mG 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。

これまで、トランジェント波形の影響を示唆した疫学調査として、アームストロングによるカナダの電力設備作業員におけるパルス界の曝露と肺がんの関連性を示唆した研究報告が知られているが、その中でトランジェント波形の多くが作業員の使うトランシーバや携帯電話による電波をカウントしたものであり、信頼できるデータではないと指摘している。本調査では、電力設備作業員でなく、一般居住環境でのトランジェント電磁界に着目したものであるが、2kHz までの帯域では、トランジェント電磁界と分類できそうな、大きなピーク値を持った波形がそれほど頻繁に発生していないことが示唆された。

トランジェント電磁界に対する問題提起は、低周波磁界の疫学調査と生物実験結果の不一致(前者が影響の可能性を示唆しているのに対して、後者で影響の存在が確認できない)と、上記のパルス電磁界についての疫学調査結果から推測されたものである。低周波電磁界の健康影響を与える要因の候補として、「トランジェント」ということばが頻繁に使われていても、実際に居住環境の中にどのような「トランジェント電磁界」が存在するかが明確にされていなかった。ここでの測定結果は、まだ予備的段階ではあるが、その実態の一部を示したものと見える。次年度にさらに調査を進め、トランジェント電磁界の実態を明らかにする必要がある。

電磁界曝露による発がんのイニシエーシ

オンやプロモーション作用に関する研究報告は数多くあるが、がん増殖作用の有無についての検討は極めて少ない。そこでプログレッション作用についての検討は今後の電磁界安全対策を立案する際に重要な影響を与えられると思われる。今回 50 Hz、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プログレッション作用は認められなかった。今年度の曝露条件は一般の居住環境で遭遇する 0.3 μ 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。今年度はマウス由来の乳がん細胞を移植して、電磁界のプログレッション作用を検討したが、次年度は、ヒト乳がん細胞を特殊なマウスに移植して、これを評価したい。

前述のとおり、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、昨年度報告した世界保健機関が実施している国際電磁界プロジェクトと平衡して、現在最も注目されている電磁界プロジェクトに米国のラピッド計画がある。今年度そのワーキンググループは報告書（原案）を提出した。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)とした点にある。平成 11 年 3 月末の段階では、米国議会へ提出される最終報告がど

の様な内容になるか決定されていないが、原案で電磁界による発がんの可能性を認め、その論拠を理解することは、今後の電磁界安全対策を立てる意味でも、報告書原案に記載された内容を翻訳し、その情報提供することは有意義と考える。

E. 結論

電磁界の曝露量評価に関しては、居住環境内での時間的な電磁界変動、特に波形が非正弦波的に変化する性質（トランジェント）に着目した実態調査を行うための測定システムを開発し、実際に一般家庭内での測定事例を紹介した。電磁界の安全性に関しては、健康影響として注目される乳がん増殖への影響評価モデルによるプログレッション作用について検討した結果、電磁界に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、米国のラピッド計画ワーキンググループ報告書を紹介した。

分担研究報告書

超低周波電磁界のがん増殖作用に関する研究

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

分担研究者 牛山 明 国立公衆衛生院生理衛生学部研究員

研究要旨

ELF（超低周波数）電磁界が健康に及ぼす影響、特に、関連が深いと考えられる乳がんを対象にそのがんの増殖に伴う影響について担がん実験動物をもちいて研究を行った。本研究班においては昨年度までに、マウス背側皮膚窓（dorsal skinfold chamber; DSC）に乳がん細胞を移植した担がんモデル動物の作製と、超低周波電磁界の慢性曝露が可能な曝露装置の開発を行った。本年度は、担がんモデルに対して、周波数 50Hz、磁束密度 3mT の直線電磁界を 15 日間連続で曝露し、移植乳がんの増殖に対して及ぼす影響について調べ、乳がん増殖における電磁界のプロモーション作用について検討した。

A. 研究目的

送電線や各種電気機器からの電磁界が健康に及ぼす影響についての関心が高まり、そのリスク評価が求められている。一部の疫学研究においては、電磁界と乳がん、脳腫瘍、白血病との関連が指摘されており、その実験研究での検証が必要とされている。多くの動物実験の結果より、電磁界そのものにはがんのイニシエーション作用は存在しないことが確かめられており、近年ではがん増殖のプロモーター、補助プロモーター、あるいはプログレッサーとして働く可能性の有無について議論されている。しかしながら、その判断材料となる研究結果は現在のところまだ少ない。

そのため、本分担研究では、担がん動物モデルを作成し、移植したがん細胞の増殖などに対して電磁界が及ぼす影響について検討し、電磁界安全対策に資することを目標とする。方法としてはマウス背側皮膚窓（dorsal skinfold chamber; DSC）にがん細胞を移植し、がんの増殖・生長およびそれに伴う血管新生を形態学的、および生理学的に解析することとした。昨年度は、担がん動物の作製とがんの増殖過程について検討し、同時に慢性的曝露装置開発したが、本年度は担がんマウスに対して電磁界を亜慢性的に曝露しその影響を検討した。また、近年、in vitro の実験において、ELF 電磁界曝露によってヒト末梢血中の

単球から分泌されるサイトカインが変動するという報告があるため、血清中のサイトカインについて、曝露の影響を *in vivo* で調べた。

B. 研究方法

1. 実験動物

実験には、DSC 装着の手術時で8週齢の雄性 BALB/c マウス（東京実験動物）を用いた。がん細胞の移植の前日に、電磁界の影響を受けない素材（ジュラコン樹脂）で作られた背側皮膚窓をマウスの後背部に外科的に装着した。

DSC の装着手順は次の通りである。DSC は2枚のフレームと固定用ビス、観察窓用カバーガラス、カバーガラスの留め具から構成される。ペントバルビタール酸ナトリウムで麻酔したマウスの背側皮膚を除毛し、その皮膚をつまみ上げ、皮膚が適度に伸展した状態で中央に直径 11mm の観察窓のあるフレームをつまみ上げた皮膚の片側に装着する。フレームと接していない側の皮膚を直径 14mm 程度の円形に切り取り、切り取った円形窓から残った側の皮膚の血管網が観察できるようにする。その上にもう一枚のフレームを乗せ、皮膚をサンドイッチ状に挟むように重ねて、固定用ビスでフレームを固定する。最後に観察面にカバーガラスを乗せ、留め具で固定する。

以上の手術、及びその後の電磁界曝露を含む飼育はすべて室温 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ に保たれた SPF 区域で行い、食餌飲水は自由摂取とした。

2. 移植するがん細胞の調製

本研究では、マウス乳がん由来の細胞株である MMT060562 株（以下、MMT 細胞）を用いた。本細胞株はヒューマンサイエンス振興財団より入手した。本細胞は Estrogen に対して、非感受性であることが報告されている。通常 *in vitro* の培養系で継代が可能で、移植の際には 0.25 % trypsin 処理によって培養シャーレより剥離し、遠心処理により回収した。培養は、非必須アミノ酸含有基本培地（Hanks'塩；GIBCO BRL）に 10 % calf serum（GIBCO BRL）を添加したものをを用いて、CO₂ インキュベーター内で行った。本研究において移植に用いる細胞は、移植予定日の2日前に継代を行う際に、バイオコートコラーゲン IV カルチャーインサート（pore size 3.0 μm , 6well type, Becton Dickinson, USA）に1ウェルあたり、 4×10^4 cell を播いた。バイオコートコラーゲン IV は EHS マウス肉腫から抽出したコラーゲン IV を塗布してある PET（ポリテレフタル酸エチレン）の膜である。播種後、CO₂ インキュベータで培養を行い、マウス DSC への移植当日、顕微鏡下でコンフルエントな状態であることを確認した。

3. がん細胞の移植および増殖過程の観察

コンフルエントに達した、MMT 細胞を含むカルチャーインサートから、膜部分を切り出し、膜を 1 mm 角に切った。移植は、DSC のカバーガラスを慎重にはずし、1mm 角の膜を細胞の増殖している面を皮膚に接触するようにして、チェンバー中央においた。すべての個体に移植した後、磁界の曝露を行う曝

露群（担がん-曝露群：T E群）と行わない非曝露群（担がん-非曝露群：T C群）の2群に無作為に割り付け、曝露を開始した。また、対照としてがん細胞を移植しない健常群を用意し、それらも、健常-曝露群（H E群）、健常-非曝露群（H C群）にわけた。

DSC 内に移植した MMT 細胞は透明窓内で生着して、移植6日後にはがん組織に栄養を与えるための新生血管が観察され始める。さらに増殖した細胞は三次元的な広がりをはじめ、透過光での観察では、新生した微小血管を含む組織がはっきりと区別できる。

観察は、移植当日（0日；曝露開始日）、及び3、6、9、12、15日に行った。観察の際はアクリル製の筒状の保定具でマウスを覚醒下で保定し、正立顕微鏡（オリンパス BH2）を用いて透過光で観察を行った。透過光像は光量及び露光時間を一定にしてリバーサルフィルム Fujichrome(ISO400)で撮影した。現像したフィルムは、フィルムスキャナ（LS-30, ニコン）を通じて、パーソナルコンピュータ（Power Macintosh 7600/132）に600dpiの解像度で取り込み、画像処理ソフト NIH Image version 1.61 を用いてがん組織の定量化をおこなった。

定量化に当たっては、NIH Image 上で透過光観察による256階調で示される画像に対して、それぞれ二値化を行った。これにより、増殖した MMT 細胞の占める部分と血管は黒くなり、その他の皮膚組織は白く示され、がん組織の平面的な面積を算出することが可能となる。また、得られた結果については、two tailed t-test によって、検定を行った。

4. 曝露装置

電磁界曝露に当たっては、昨年度本研究費にて制作した、ホルムヘルツ型3軸コイル曝露装置を用いた。本研究における条件は、周波数50Hz、磁束密度3mTで3軸均等出力によって形成される直線磁界である。曝露は1日20時間とした。

4. 血液生化学的解析

採血は3mTの曝露を開始してから15日後のマウスから行った。なお曝露群、非曝露群ともにDSC内にがん細胞を移植していないものと移植したものの2通りのグループを用い、計4群から採血した。凝固後、高速冷却遠心機（クボタ）により遠心を行い血清画分を回収した。血清画分を用いて、血清中におけるインターロイキン-1 β （mIL-1 β ）、及び腫瘍壊死因子 TNF- α の定量を行った。定量には、mIL-1 β ELISA system キット及び、mTNF- α ELISA system キット（共に Amersham 社製）を用い、プロトコールはキットの指示に従った。また比色定量は、Multiscan MS（大日本製薬）を用いた。

C. 研究結果

1. がんの増殖

前項で述べた方法に従って、培養がん細胞をDSC中央に移植した。移植に用いた膜が透明であり、かつ細胞も単層に増殖しているため、移植直後はがん組織として同定することが不可能であったが、移植6日後程度から、

表 1 電磁界亜慢性曝露(50Hz,3mT,15days)に伴うがんの面積の変化

	Day9	Day12	Day15
control 群			
C1	5.43	8.11	15.14
C2	0.11	3.93	8.32
C3	6.25	11.07	15.97
C4	5.84	5.84	16.59
C5	1.29	5.13	8.54
C6	3.74	9.05	15.59
C7	7.73	13.65	16.17
C8	4.22	5.95	11.19
平均	4.33	7.84	13.44
偏差	2.57	3.29	3.52
曝露群			
E1	0.66	3.38	8.17
E2	0.52	4.03	8.54
E3	0.66	2.77	5.31
E4	1.55	4.97	8.84
E5	1.42	4.51	7.32
E6	1.18	3.88	10.43
E7	2.40	6.62	12.44
E8	0.16	5.03	8.01
E9	8.00	13.02	20.44
平均	1.84	5.36	9.94
偏差	2.41	3.08	4.40

単位 mm²

がん組織とそれに伴う血管新生が徐々に確認できるようになった。表 1 に移植 9 日以降のがん組織の増殖についての結果を示した。表中の数値は、画像処理の一連の手続きによって得られた DSC 内でがん細胞の占める面積である。またそれぞれの群に対しての平均値のグラフを図 1 に示した。この結果から、がん細胞は移植後 DSC 内に生着して増殖をしていることがわかる。また、図 1 に示すとおり、曝露群と非曝露群の間において移植してから同じ日数で比較した場合、統計的な差は

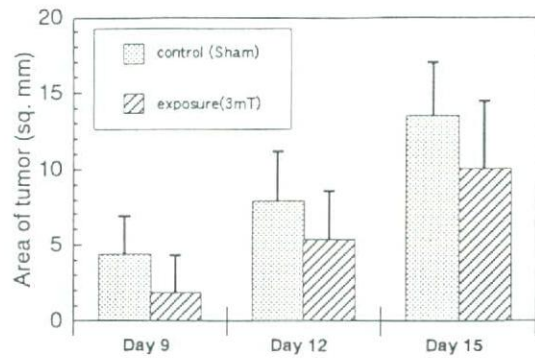


図 1 移植したがんの占める面積の経日的変化の群間比較

検出できなかった。しかしながら、それぞれの観察日では、曝露群よりも非曝露群において大きい面積を占める傾向にあった。

2. 血液生化学的解析

曝露を開始して 15 日後の血液より、血清を集め、IL-1 β 及び、TNF- α の定量を ELISA 法により行った。図 2 に IL-1 β についての結果を示した。群ごとに統計的な比較をすると、HC 群と TC 群、HE 群と TC 群の間で、有意な差が認められた。一方、TNF- α については、いずれも本研究に用いた ELISA キットの検出限界以下と思われる濃度であった。

D. 考察

本分担研究では、がん増殖過程における電磁界の影響を調べることを目的として、担がん動物を用いて、ELF 電磁界の影響について調べた。

多くの報告により、ELF 電磁界はがんのイニシエータにはならないと言われており、がんのプロモーターあるいは、プログレッサーとしての性質についての有無が検討されてい

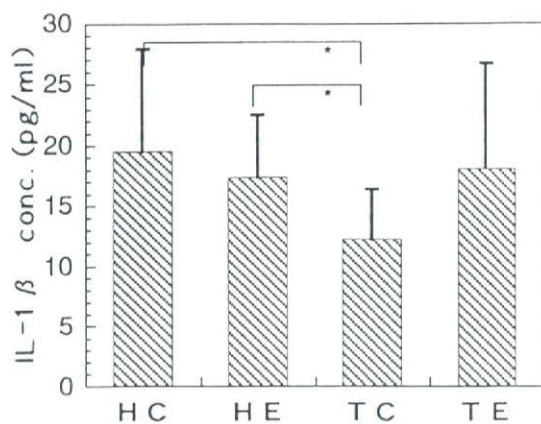


図2 電磁界亜慢性曝露(50Hz,3mT,15days)による血清中の IL-1 β 濃度の影響

図中HCは健常-非曝露群 (n=9)、HEは健常-曝露群 (n=10)、TCは担がん-非曝露群 (n=9)、TEは担がん-曝露群 (n=9)を示す。健常群はDSC装着のみで、がん細胞を移植していない群である。(* p<0.05)

る段階である。本研究においても、その可能性についての評価を行うべく、研究を進めた。昨年度の本研究において、我々は透明窓内で生着すること、約3週間の間で透明窓内で増殖を続けることなどを考慮して、マウス乳がん由来の MMT060562 細胞を選択した。しかしながらその際の移植方法として濃縮した粘度の高い細胞液をピペティングすることによって移植する方法を採用していたため、定量性に欠けるという短所が懸念があった。そのため本年度はさらに移植方法を改良して、より少ない数の細胞を定量的に移植するために、コラーゲンコートをしてある膜を用いた。この膜の上で細胞は単層のままコンフルエントに増殖し、この膜を同じ大きさに切断することでより定量性が良くなるものと期待された。図1に示したように膜の上で培養した細

胞を移植しても DSC 内で細胞は増殖することから、この方法でも移植は可能であった。

今回、50Hz、3mT という条件で、15日間の曝露を行ったが、曝露群と非曝露群との間で、がんの面積については統計的な有意差は存在しなかった。また、有意な差はないが、すべての観察日において曝露群の方ががんの面積が小さい傾向にあった。飼育環境、群の割り当てなどには問題はないが、今回の曝露については1回の実験であるので、この点については今後繰り返し実験する必要があると思われる。また、同じ観察日における群内の分散がやや大きい傾向にあることから、移植方法については、さらに改善する必要があると思われる。しかしながら、総合的に見て、曝露群と非曝露群の間にかん面積には大きな差はなく、かつ、研究に用いた磁束密度が 3mT という、日常生活レベルの数千倍であることを考えると、電磁界のプロモーターに関わる作用については、あったとしても小さいものと考えられる。

また、末梢血中単球を培養した際に強い電磁界を曝露すると、サイトカインレベルが変化するという報告があることから、本研究では in vivo において、同様の現象が見られるかどうかを検証した。その結果、IL-1 β 濃度においては、顕著な差は認められなかった。この点については、濃度に個体差があり、影響を検出できなかった可能性があるが、逆に言えば、影響は小さいとも考えられる。また、TNF- α については、血清中の濃度が低く、今回は検出限界以下であった。今後、高感度の検出法を検討したい。

本研究に用いた MMT 細胞は、乳がん由来にも関わらず、その性質としてエストロゲン受容体を持っていないことが知られている。したがって、今後はエストロゲン依存性の増殖を示す乳がん細胞との比較検討も重要であると思われる。

今回は MMT 細胞移植マウスについて、がん組織の面積を指標にその大きさを調べたが、さらに適切な蛍光色素を用いることで、新生血管内の血流速度や、白血球の粘着性、血管の物質透過性などを調べることが可能である。今後、これらの循環生理学的諸因子に対する電磁界の影響について検討が必要であろう。

E. 結論

本分担研究では、マウスの DSC 内乳がん細胞を移植した担がん動物に対して、周波数 50Hz、磁束密度 3 mT の直線磁界を 15 日間に

わたり曝露し、電磁界ががんの増殖に及ぼす影響について調べた。その結果、上記の条件では、曝露の有意な変化を見いださなかった。また、上記条件の曝露終了後、採取した血清について、IL-1 β の濃度を測定したが、曝露による濃度の上昇などは見られなかった。

F. 研究発表

1. 学会発表等

牛山 明、大久保千代次、マウス乳腺腫増殖過程に及ぼす商用周波数磁界曝露の影響。第 2 回電磁界の健康影響に関するワークショップ。国立がんセンター。1998.12

分担研究報告書

電磁界曝露評価に関する研究

分担研究者 多氣 昌生 東京都立大学大学院工学研究科電気工学専攻教授
伊坂 勝生 徳島大学工学部電気電子工学科教授

研究要旨：生活環境中での商用電力による磁界のうち、これまでデータの不足していた非正弦波成分の実態を調査する装置を開発し、その測定例を示した。

A. 研究目的

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問題提起を示して以来、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、以下のような認識が比較的広く受け入れられている(NRC, 1996, ICNIRP, 1998, NIEHS, 1998)。

- (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(NAS, 1996, 電気学会, 1998)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、昨年度に空間的な変動に注目した測定法の検討を実施した。そこで、今年度は、時間的な変動、特に波形が非正弦波的に変化する性質に着目した実態調査を行うための測定システムを開発し、測定事例を示す。

B. 研究方法

1. 磁界特性におけるトランジェント

従来の磁界強度モニタでは、スポットの磁束密度の大きさだけでなく、実効値の時間的な推移を長時間にわたり記録できるが、測定は速くても数秒程度の間隔で行われる。このため、電気系統の切り替えや機器の電源投入・切断にともなう急激な磁界波形の変化を記録することができなかつた。しかし、このような急激な変化（トランジェントと呼ばれる）の場合、時間的な変化が速いために誘導電界が大きくなることから熱雑音に埋もれることなく生体に作用を及ぼす可能性があるのではないかと指摘されている。

2. トランジェントの測定法

トランジェントを帯域数メガヘルツの急激な変化と定義し、そのようなイベントの生起数を計数するトランジェントカウンタと呼ばれる測定器が市販されている。このような機器は高い周波数成分をもつ電磁界の存在を簡易にモニタできる利点があるが、イベントの数だけ計数しても、その実態は明らかにならない。広帯域の電磁波は商用電源に起因するトランジェントだけでなく、静電気放電やさまざまな高周波利用機器、コンピュータなどの電子機器からも放射さ

れている。これらの静電気放電や高周波放射源からの電磁界の生体影響についてはすでに多くの研究があり、高周波領域の防護指針が別に作られている。また、疫学調査が白血病との関連を示唆している内容は、商用周波電源の配電形態や実測した商用周波磁界の強さの実測値ならびに計算値であって、商用周波と無関係な波源による電磁界を計数に加えることは適切でない。トランジェントの実態を明らかにするためには、単なるイベントの数だけでなく、どのような波形の磁界が生じているのかを具体的に知る必要がある。

そこで、本研究では、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測と、その頻度を明らかにするための装置を開発する。

トランジェントの周波数帯域については、明確な定義がない。前述のイベントカウンタの場合、数 MHz までの帯域を考慮しているようである。しかし、生体が大きなキャパシタンスをもつ組織で構成されること、高周波電磁界の生体影響についてのこれまでの知見、商用電力系統の持つ時定数が比較的大きいことを考慮すると、それほど高い周波数まで考える必要性に十分な根拠があるとはいえない。それよりも、帯域をある程度制限して波形の観測を行うことが実態把握には意味があると考えられる。そこで、本研究では波形観測を現実的な装置で行えることを考慮し、帯域を 2kHz までとし、デジタルデータとして波形データを記録することにした。また、正弦波の周期波形の乱れを評価するために、正弦波の 1 周期ごとの波形の特徴（ピーク値、自乗平均値）を 3 軸すべてについて 24 時間記録

できるようにした。

3. 測定システム

3.1 構成 (写真 1-2, 図 A)

開発した測定器は、3軸のコイルから成るセンサ部、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、信号をAD変換してコンピュータに取り込むインタフェース部、コンピュータ内でデータ処理を行うデジタル信号処理部から成る。また、記録したデータを解析するソフトウェアが別に作られている。

センサ部および電子回路部は既成の磁界測定器であるホラデー社の HI-3627 を改造して使用している。この系の測定帯域は 2kHz までであり、これより高い周波数は帯域フィルタで遮断される。ここで得られるデータは、2kHz の帯域の 3 軸の独立した磁界波形と 3 軸の 2 乗平均値 (すなわち磁束密度ベクトルの大きさ) である。これらの 4 つの信号が AD 変換器 (ラトック社、REX5054B) を介してデジタル信号としてノート型コンピュータに取り込まれる。このときのサンプリング周波数は 5kHz (60Hz を対象とするときは 6kHz) である。

3.2 記録データ

5kHz でサンプリングされた 3 軸の磁界波形から、100 データ毎にその最大値と 2 乗平均値の平方根を計算する。これらがデータとして記録される。すなわち、交流波形の 1 周期である 1/50 秒毎にその実効値と最大値が記録される。波形が正弦波であれば、両者の関係は最大値が実効値の 1.41 倍となる。正弦波でなければ、この比が異なる。特にトランジェント波形が見られれば、最大値が実効値より遙かに大きくなる

と考えられる。

トランジェントと思われる波形情報を記録するために、最大値と実効値の比較から、最大値の大きな部分の波形を 5kHz でサンプリングした 3 軸すべての波形を 5 つ記録する。

以上より、24 時間にわたり磁界を記録して得られるデータをまとめると次の通りである。

- (a) 24 時間の磁束密度の大きさ (時定数 1 秒)
- (b) 24 時間の磁束密度の x, y, z 成分の実効値 (1/50 秒毎)
- (c) 24 時間の磁束密度の x, y, z 成分の最大値 (1/50 秒毎)
- (d) トランジェントと見られる磁界波形 (3 軸) を 5 個所 (時間幅 1 秒間)

データを表示するためのビューアソフトを用いて、これらのデータを表示できる。

(a)、～(c) のデータについては、データ数が非常に多いので、1 時間毎に区切ってトレンドデータが表示される。このうちの任意の範囲を時間的に拡大して表示することができる。また、(d) のデータは、3 軸それぞれ波形として表示できる。表示方法に関しては、現在さらに改良を行っているところである。

C. 測定結果と考察

埼玉県所沢市の一般家庭 (戸建住宅) の居間のテレビの近くにセンサを置いて 24 時間の測定を実施した。大きな波形変動が見られた個所について 2 例を挙げる。

(1) 16時40分44秒から約2分間の
波形

図1は、この2分間の間の実効値の変化を表す。3Axis と表示した波形は3軸の2乗和の平方根で、磁束密度の大きさを表す(単位 nT)。テレビの付近であるため普通の環境より磁束密度が大きく、2.5~3.5mG 程度である(250~350nT)。時定数が大きいので変化はゆっくりである。X,Y,Z 方向の Avg と表示した波形は、各軸の1周期(20ms)毎の実効値である。但し、これらの大きさは相対値である。横軸の数值は開始時点からのデータ数 N で、 $0.02 \times N$ が経過時間である。約1分15秒(16時41分55秒)のところでは大きなピークが見られる。このピークは後に述べる Wave-2 にあたる。図2は、同じ波形の1周期毎の最大値である。

(2) 8時41分27秒から約1分間の波
形

図3はこの間の実効値の変化である。3Axis と表示した磁界の大きさと、各軸の磁束密度の実効値の相対値が示されている。途中まで 1.4mG 程度で磁界が小さかったが、約40秒経過後(8時41分59秒)に大きなピークを発生して、その後 2.5mG 程度でほぼ一定となる。このピークは、テレビのスイッチを入れたことに伴うトランジェントであり、テレビ使用時に周辺の磁界がやや大きくなることがわかる。図4は同じ時間帯の各周期の実効値である。大きなピークは 0.5 秒以上持続することがわかる。このトランジェント波形は後述の Wave-1 である。

(3) 大きなピークを記録したときの波形
本測定システムは、大きなピークを記録

した付近の波形データを5波形まで保存できる。これらを図5~9に示す。各波形のピークの記録された時間(波形データの開始時間)は以下の通りである。

Wave-1: 8時41分59秒77(上記(2)のデータのピーク)

Wave-2: 16時41分55秒67(上記(1)のデータのピーク)

Wave-3: 11時47分51秒19

Wave-4: 18時33分43秒34

Wave-5: 18時25分42秒47

波形から、大きなトランジェントは Wave-1 と Wave-2 であり、これら以外にははっきりしたピークを持たない。すなわち、測定帯域である 2kHz までの周波数では、Wave-1 や Wave-2 のような大きなピークはそれほど頻繁に生じていない。また、波形が正弦波とはかなり異なるが、これはブラウン管周辺の磁界が鋸歯状波的に変化することによるためと考えられる。

本測定例では一般家屋において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のできるテレビ受像器付近を測定点に選んだ。その結果 2kHz までの帯域で見た場合に、テレビ使用時の平均レベルは 2.5mG から 3.5mG 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、1回が 15mG 程度で、他の一回は 20mG を超えるものであった。これらピークは立ち上がりが急峻であるが、数十ミリ秒以上の比較的持続時間の長いものであった。

これまで、トランジェント波形の影響を示唆した疫学調査として、アームストロングによるカナダの電力設備作業者における

パルス界の曝露と肺ガンの関連性を示唆した研究報告が知られている (Armstrong, 1994)。この時に使われた、トランジェントパルス界の頻度の測定装置は「ポジトロン」という計器であり、その高周波トランジェント(HFT)と呼ばれるチャンネルを利用している。Maruvada は、この装置の測定するトランジェントが、実際に想定している信号ではなく、多くの場合が作業者の使うトランシーバや携帯電話による電波をカウントしたものであり、信頼できるデータではないと指摘している (Maruvada, 1995)。

本調査では、電力設備作業員でなく、一般居住環境でのトランジェント電磁界に着目したものであるが、2kHz までの帯域では、トランジェント電磁界と分類できそうな、大きなピーク値を持った波形がそれほど頻繁に発生していないことが示唆された。帯域を広くすれば、インパルス的な電磁界が測定される可能性は増えるが、それが電力機器のスイッチング等が原因となる波形でなく、他の高周波利用機器からの電磁界を検出しているに過ぎないかもしれないことに注意が必要である。高周波の電磁界については、生体作用についての研究が数多くなされており、その知見に基づく判断ができる。郵政省による電波防護指針など、高周波の防護指針等で考慮されている内容からは、電気機器のスイッチングで発生する程度の高周波電磁界が健康に悪影響を与えるという根拠になる現象は見あたらない。

トランジェント電磁界に対する問題提起は、低周波磁界の疫学調査と生物実験結果の不一致（前者が影響の可能性を示唆しているのに対して、後方で影響の存在が確認

できない）と、上記のパルス電磁界についての疫学調査結果から推測されたものである。低周波電磁界の健康影響を与える要因の候補として、「トランジェント」ということばが頻繁に使われていても、実際に居住環境の中にどのような「トランジェント電磁界」が存在するかが明確にされていなかった。ここでの測定結果は、まだ予備的段階ではあるが、その実態の一部を示したものと見える。次年度にさらに調査を進め、トランジェント電磁界の実態を明らかにする必要がある。

文献

- B. Armstrong, et al., Association between exposure to pulsed electromagnetic fields and cancer in electric utility workers Quebec, Canada, and France, *Am. J. Epidemiol.*, Vol.140, No.9, pp.805-820 (1994).
- P.S.Maruvada, Identification of sources responsible for utility worker exposure data obtained using Positron HFT Channel, International conference on Electromagnetic energy, Electromagnetic Energy Association, May 9-10 (1995).
- National Research Council: Possible health effects of exposure to residential electric and magnetic fields. Pre-publication, National Academic Press, Washington, DC, 1996.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection:

Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields(up to 300 G Hz), Health Physics, Vol. 74, No. 4, pp.494-522 (1998).

NIEHS Working Group Report: Assessment of health effects from exposure to power-line frequency electric and magnetic fields. NIH Publication No. 98-3981, 1998.

電気学会、電磁界生体影響問題調査特別委員会：電磁界の生体影響に関する現状評価と今後の課題、電気学会、1998

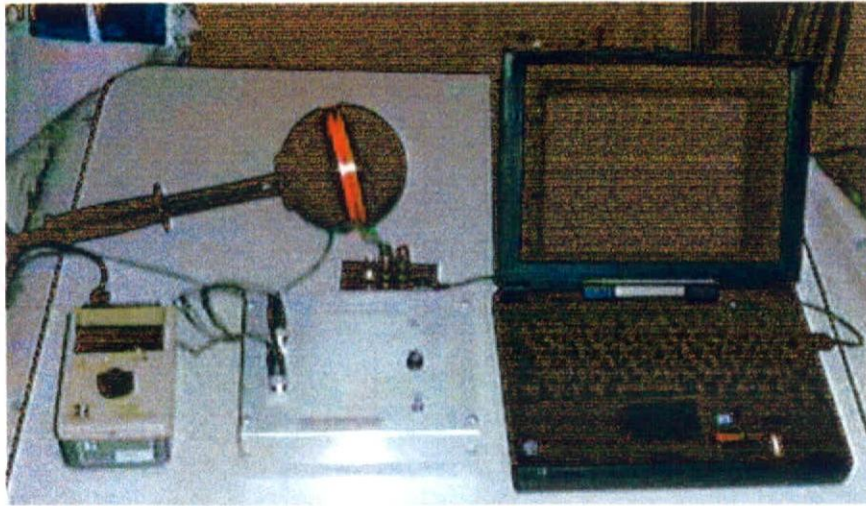


写真1 測定システム全体

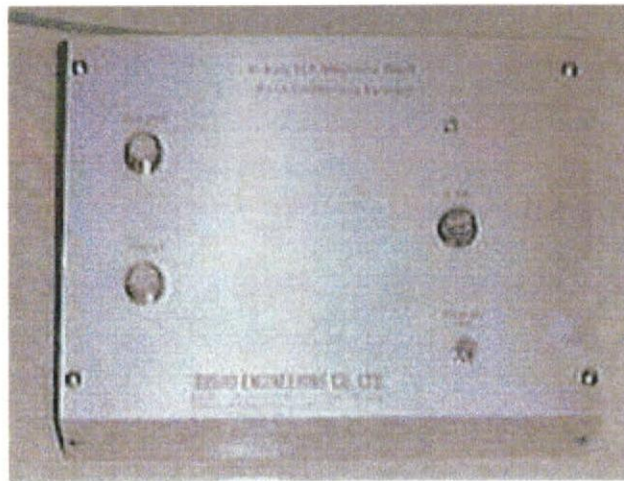


写真2 電子回路・インターフェイス部

表 一般家庭における測定例

基準値以上全てのデータ

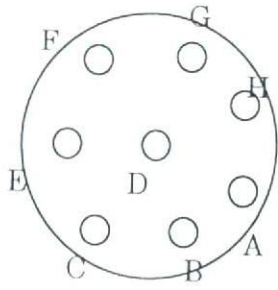
Search standard Level= 1000 All data

Number	Time	X-Axis			Y-Axis			Z-Axis			3-Axis
		Max	Avg	Max-Avg	Max	Avg	Max-Avg	Max	Avg	Max-Avg	Avg
789519	16:41:56:03	1398	248	1150	721	130	591	1398	79	1319	223
789520	16:41:56:05	1267	378	889	753	229	524	1267	171	1096	222
3622682	08:42:00:39	1774	1030	744	374	151	223	1774	1062	712	120
3622683	08:42:00:41	1775	1524	251	376	264	112	1775	1564	211	151
3622684	08:42:00:43	1775	1523	252	393	264	129	1775	1563	212	209
3622685	08:42:00:45	1775	1522	253	387	256	131	1775	1562	213	287
3622686	08:42:00:47	1775	1513	262	393	244	149	1775	1556	219	349
3622687	08:42:00:49	1776	1502	274	351	226	125	1776	1549	227	415
3622688	08:42:00:51	1776	1474	302	327	187	140	1776	1525	251	478
3622689	08:42:00:53	1775	1383	392	201	124	77	1775	1452	323	541
3622690	08:42:00:55	1776	1175	601	138	71	67	1776	1305	471	600
3622691	08:42:00:57	1570	858	712	111	50	61	1570	1098	472	653
3622692	08:42:00:59	1099	590	509	105	42	63	1099	802	297	709

最高点のみをピックアップ

Search standard Level= 1000

Number	Time	X-Axis			Y-Axis			Z-Axis			3-Axis
		Max	Avg	Max-Avg	Max	Avg	Max-Avg	Max	Avg	Max-Avg	Avg
789519	16:41:56:03	1398	248	1150	721	130	591	1398	79	1319	223
3622687	08:42:00:49	1776	1502	274	351	226	125	1776	1549	227	415



A	X
B	X_GND
C	Y
D	3-Axis
E	Y_GND
F	Z
G	Z_GND
H	3-AxisGND

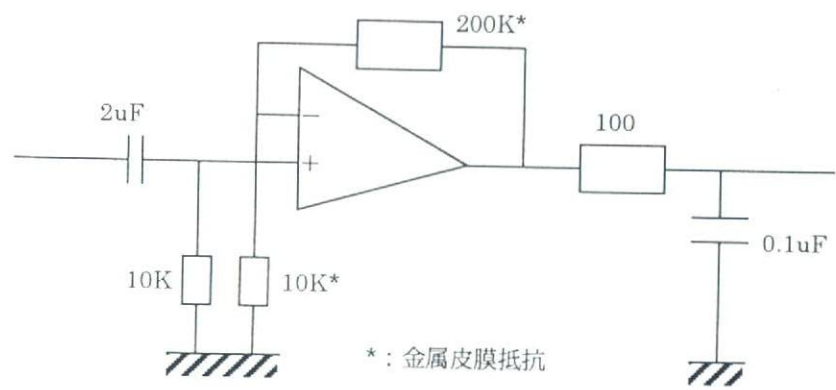
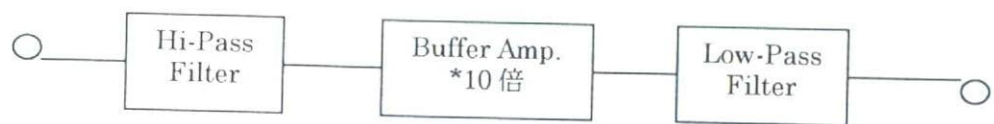
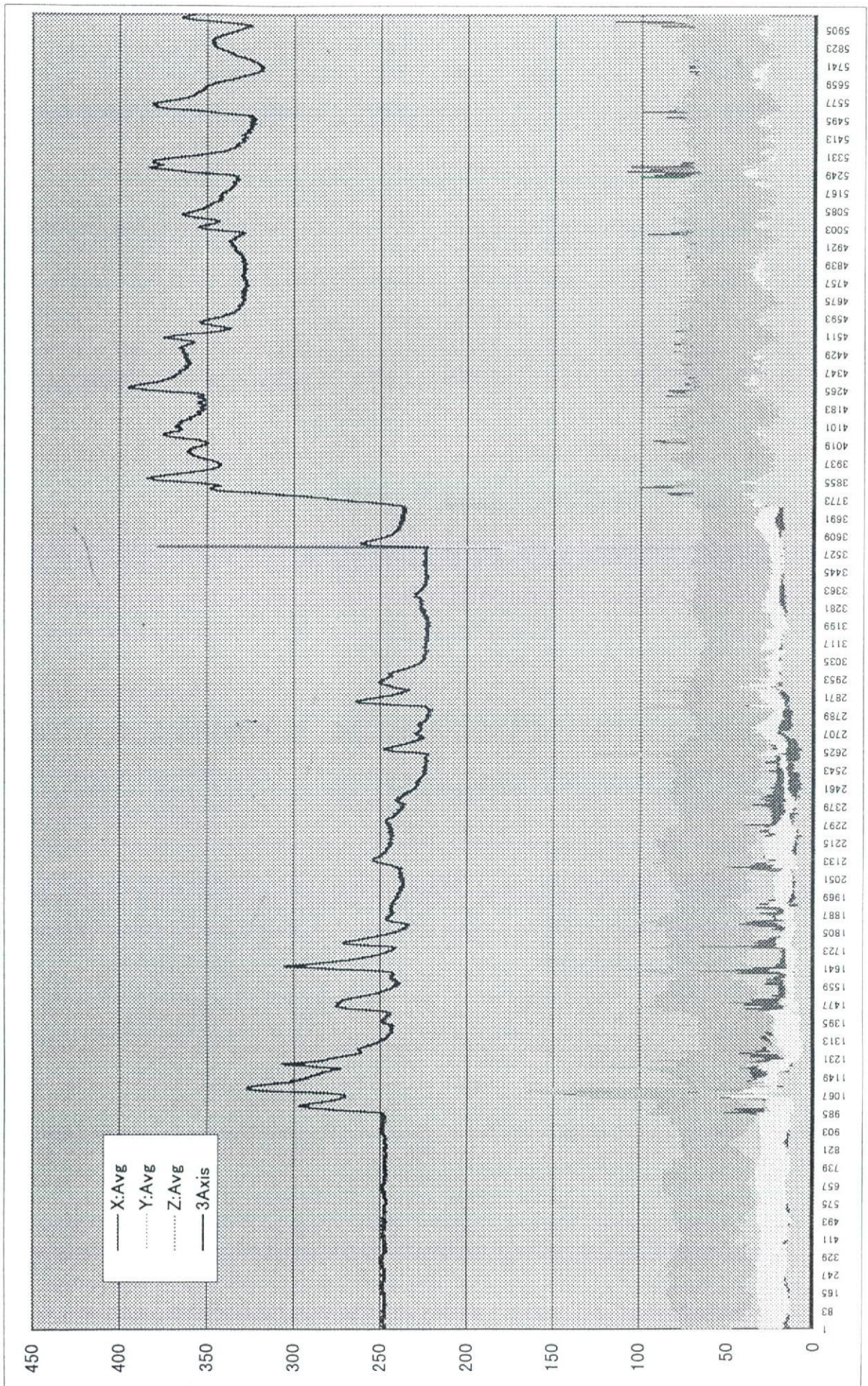


図 A トランジェント測定器の構成



5905
5823
5741
5658
5577
5495
5413
5331
5249
5167
5085
5003
4921
4839
4757
4675
4593
4511
4429
4347
4265
4183
4101
4019
3937
3855
3773
3691
3609
3527
3445
3363
3281
3199
3117
3035
2953
2871
2789
2707
2625
2543
2461
2379
2297
2215
2133
2051
1969
1887
1805
1723
1641
1559
1477
1395
1313
1231
1149
1067
985
903
821
739
657
575
493
411
329
247
165
83
1