

厚生労働科学研究費補助金
(平成15年度)
研究報告書

別添2

厚生労働科学研究費補助金

がん予防等健康科学総合事業

発達段階にある脳を対象とする携帯電話周波数帯電磁界

暴露の血液脳関門に及ぼす影響に関する研究

平成15年度 統括・分担研究報告書

主任研究者 大久保 千代次

平成16（2004）年4月

別添3

目 次

I. 統括研究報告書

発達段階にある脳を対象とする携帯電話周波数帯電磁界暴露の血液脳関門に及ぼす影響に関する研究 1
大久保 千代次

II. 分担研究報告書

1. 発達段階にある脳を対象とする携帯電話周波数帯電磁界暴露の血液脳関門に及ぼす影響に関する研究 -局所ばく露用アンテナに関する研究- 10
多氣昌生、渡辺聡一、和氣加奈子

2. 発達段階にある脳を対象とする携帯電話周波数帯電磁界ばく露の血液脳関門に及ぼす影響に関する研究-ラット脳マイクロダイアリス法による検討- 22
大久保千代次、牛山 明、増田 宏

III. 研究成果の刊行に関する一覧表 40

別添 4

厚生労働科学研究費補助金（がん予防等健康科学総合研究事業） 総括研究報告書

発達段階にある脳を対象とする携帯電話周波数帯電磁界暴露の血液脳関門に 及ぼす影響に関する研究

主任研究者 大久保千代次 国立保健医療科学院生活環境部部長

研究要旨

携帯電話等の機器の安全性については、総務省の定めた電波防護指針等でガイドラインが示されているが、主に電磁界の発熱作用を根拠にしたものであり、非熱的あるいは長期的暴露な生体影響については、十分な科学的根拠がないため考慮されていない。携帯電話においては頭部に接近して使用することから、高周波電磁界暴露は頭部に集中するため、脳に対する暴露影響評価を十分に行うことが必要である。本研究では発育段階の脳への影響、その中でも脳の血液脳関門に対する影響の有無について脳深部で追究することを目的とする。本研究では携帯電話を模した動物（ラット）の頭に対する暴露システムを構築しその性能を検証すると共に、脳深部での脳関門機能への影響を検出する計測システムを構築した。これらの暴露システムならびに計測システムを用いて、基礎的なデータを取得すると共に、周波数 1.439GHz (Personal-Digital cellular (PDC)変調方式) の電磁界を局所平均 SAR 約 35W/kg で 30 分間連続暴露した際の影響を検討した。

A. 研究目的

携帯電話は我が国において著しい勢いで普及し、現在、PHS と合わせて 8000 万台もの端末が利用されている。現在ではその利便性から日常生活において不可欠ともいえる器具のひとつとなっている。しかしながらその一方で、携帯電話の発する高周波電磁界が健康に影響を及ぼすのではないかと懸念を持っている国

民も多い。

携帯電話等の機器の安全性については、総務省の定めた電波防護指針等に則りそのガイドラインが示されているが、そのガイドラインは主に電磁界の発熱作用を根拠にしたものであり、非熱的あるいは長期的暴露な生体影響については、十分な科学的根拠がないため考慮されていない。また WHO で 1996 年から開始された

国際電磁界プロジェクトにおいても、電磁界の安全性、特に学童の携帯電話使用に関する生物学的影響については全く研究が未着手である事に重大な関心を持ち、最優先的研究課題に位置づけをしている。一方、携帯電話の使用により、脳深部では血液脳関門が破綻すると指摘する研究者とこれを否定する見解を混在し、未だコンセンサスを得ていない。我々も脳表面での生体顕微鏡的影響評価では、電磁界による血液脳関門機能破綻は見いだせていない。

本研究では、携帯電話においては頭部に接近して使用することから、高周波電磁界暴露の発育段階の脳への影響、その中でも脳の血液脳関門に対する影響の有無について脳深部で追究する。

そこで本研究では実験動物のラットを用いてこの点を明らかにすることを目的とする。具体的には、研究組織を二班に分け、ひとつの班が工学的な側面から携帯電話周波数帯の電磁界の暴露量の評価をシミュレーション計算によって行い、もうひとつの班は生理学的側面からラットに電磁界暴露した際の影響を脳深部で評価する。生体影響の評価方法としては、ダイアリシスサンプリング法を用いる。ラットに電磁界暴露を行いながら脳髄液（または脳間質液、以下同）を連続的に採取し、脳髄液中の蛋白質（アルブミン）の濃度の電磁界暴露による変化を調べることにより、血液脳関門の生理機能に対する影響を明らかにする手法である。検討対象は成体ラットだけでなく幼若ラットを用いた検討も行い、高周波電磁界のリスク評価に寄与する知見を提供することを最終的な目的とする。

B. 研究方法

研究を暴露装置の開発、検証をおこなう工学班と、動物を用いて生体影響を検討する生体影響班に分けた。

工学的検討

携帯電話機による頭部暴露は、頭部に集中する暴露であり、脳が重要な器官であることから、詳細な検討が必要である。局所に集中した暴露を行う際に、局所だけでなく全身での吸収電力も無視できないレベルであれば、全身的な熱作用が生じてしまう。この場合、暴露を受けた生体に変化が生じたとしても、それが深部体温の上昇などの全身的な熱効果によるものである可能性があり、局所への暴露に固有の現象を把握することができない。このため、全身平均エネルギー吸収率（SAR）が小さく、脳の局所 SAR が十分に大きな暴露を実現する暴露システムが必要である。

本暴露システムには以下のような条件が満たされる必要がある。

全身平均 SAR が 1~4 W/kg を超えると、全身加温の影響による生体影響が生じる。また、局所 SAR に関する防護指針値は、全身平均 SAR の 20 倍~25 倍の値である。すなわち、全身平均 SAR に対して、25 倍以上の局所 SAR が頭部で実現できることが望ましい。

実験動物として通常用いられるげっ歯類は、携帯電話で使用される 900MHz~1.5GHz 程度の電磁界の波長に比べて大きいとはいえないため、局所に電磁界の吸収を限定することは困難である。これまで使用されてきた線状アンテナ（モノポールアンテナやダイポールアンテナ）

による暴露装置の場合、局所 SAR の全身平均 SAR に対する比は、2~4 程度に過ぎない。アンテナの寸法が、実験動物に比べて小さくできないため、上記の目標値である 25 という比を実現することは困難と予想されるので、線状アンテナに比べて十分な改善が実現できることを目標に本研究を実施した。

生体影響の検討

バリア透過性観察システム

本研究においては、バリア透過性の定量にマイクロダイアリス分析システム（エイコム株式会社、ニューロペプチドダイアリスサンプリングシステム EPPS-10）を使用した。

電磁界の吸収や反射を抑えるために、本研究においては、一般に用いられているカニューレとは異なり、すべての部品を非金属製の素材で作成したものを用いた。カニューレの手術はすでに報告されている方法によっておこなった。手術は、実験の5日前までに行った。

電磁界暴露装置および暴露条件

電磁界暴露については、本報告書の工学班によって報告されている装置を用いた。装置はループアンテナ、シグナルジェネレーター、パワーアンプより構成され、実験は電磁界吸収体を内部に貼ってある電磁界シールドチャンパー内で行った。初年度においては、我が国の電波防護指針（局所 SAR）値を大きく上回る強い電磁界（指針値の 17.5 倍）を暴露しその影響を評価した。ループアンテナより周波数 1.439GHz（PDC 方式）の電磁界をラット頭部へ 30 分間照射した。使用

した電磁界強度は、頭部平均 SAR で 35W/kg とした。なお、暴露装置のファンによる強制換気を実施すると麻酔下の動物の体温低下を招くため、暴露装置内の換気は行わなかった。また、暴露と同一の操作は行うが電磁界暴露をしないラットを Sham 群とした。

ラットには、暴露の直前に 2% (w/v) の FITC-albumin（Sigma Chemical）を 100ul/k 体重で尾静脈から注射した。その後カニューレを Push-Pull ポンプに装着して流速 1ul/min の速度で人工脳髄液（CSF）を流した。また、暴露（偽暴露）は 30 分間行い、暴露（偽暴露）終了後、カニューレをラインを保ったまま動物から外し、CSF に浸し、その後 150 分間に亘り、Push-Pull ポンプを作動させた。この間、Push-Pull ポンプは流速 1ul/min で作動させ、溶出された液を連続的に蛍光光度計のマイクロフローセルを通じて蛍光強度のモニタリングを行った。また、ラットは直後にエバンスブルー液をカニューレを通じて注入後、灌流固定を行い、脳室内にカニューレが挿入されているか否かの確認を行った。

C. 結果

工学的検討の結果

ループアンテナを用いた局所暴露システム

これまでの検討から、磁界によって生体と結合する形式が、暴露の局在化と負荷変動による影響の小ささから適当であると考えられる。そこでループアンテナによる暴露装置を作成した。アンテナはプリント基板上に印刷したもので、実験

中のラットはラットホルダーに固定される。

アンテナの入力インピーダンス

アンテナの特性として、入力インピーダンスの測定を行い、また FDTD 法による数値解析結果との比較を行った。その結果、共振周波数が予定していた周波数より高い 1.8GHz 付近となったが、これは試作後の熱対策により基板を取り去った影響である。詳細な暴露評価に用いたこのアンテナのほかに、1.439GHz 用のアンテナも作成し、実験に使用した。

アンテナによる電磁界分布の測定

作成したループアンテナによる電磁界を実験的に測定した。測定は、等方性の電界プローブおよび磁界プローブを用いて行い検証した。

暴露評価の結果

1. 均一モデルによる暴露評価

サーモグラフィ法では通常は均一な媒質を用いる。はじめに、均一媒質のラットファントムを用いてサーモグラフィ法により求めた SAR 分布と、同様の均一な数値ラットモデルを用いた FDTD 法による数値解析を行った。周波数は 1.88[GHz]、入射電力 20[W]、照射時間 30[sec]で測定を行った。計算条件は、周波数 1.88 [GHz]、セルサイズ 1 [mm]、解析領域 290×280×200、タイムステップ数 2763 である。実験による SAR 分布と数値計算による SAR 分布はほぼ一致している。

また、アンテナと頭部の距離が 5 mm 程度になると、SAR が小さくなり、分布もやや広がる。これらの結果を定量的に比較するために、深さ方向の SAR 分布を、実験測定結果と数値計算結果を重ねてみ

るとこの方法の精度からみて十分によく一致していた。以上の結果から、数値解析の結果は十分信頼できるといえる。したがって、ラットの電気定数の不均一を考慮したときの影響は、数値解析で評価できる。また、さまざまな暴露条件における SAR 分布は、実験によらなくても数値計算を用いて推定できる。

2. 不均一モデルによる検討

FDTD 法による数値解析では、ラットの解剖学的構造を考慮した不均一モデルを用いた解析が可能である。数値解析結果から、アンテナ入力電力 1 W あたりの脳での平均 SAR を算出すると 13 W/kg となる。これに対して全身平均 SAR は 0.64 W/kg である。すなわち、両者の比は約 20 となり、目的としたレベルに達している。一方、従来用いられてきたモノポールアンテナによる暴露装置では、アンテナ入力電力 1 W のときの脳平均 SAR は 1.8W/kg であり、全身平均 SAR は 0.25 W/kg である。すなわち、局所 SAR と全身平均 SAR の比は約 7 倍であった。

生体影響の検討

カニューレの特性

一般に、プッシュプル用のカニューレには入路と出路の 2 本の微小管を 1 本外管で包む構造になっているものが多い。しかしながら、市販の製品については、外管がスチール管になっているものが多く、本研究でそれを用いると、スチール管がアンテナの役割をしてしまい、電磁界が集中することが考えられた。そこで本研究では、ガラス製外管を使用し、特製のカニューレを作成した。また、管以

外の部位も全て非金属材料で作製した。プッシュプル用のカニューレと同様に、ガイドカニューレも管の部分は、ガラス製を用いた。

検出装置の構築とその基礎特性

本研究では、FITC-albumin をマーカーとして蛍光検出器で検出を行うため、まず蛍光検出器の性能を検討した。

蛍光検出器に FITC-albumin を流し、その蛍光特性を確かめた。

その結果より本実験においては励起波長 491nm、蛍光波長 520nm に固定して測定を行った。また、FITC-albumin の濃度と蛍光強度の相関を調べる目的で、様々な濃度の FITC-albumin 溶液をマイクロフローセルに流して、蛍光強度との関係を調べた。その結果、FITC-albumin 濃度と蛍光強度は強い相関を持つことが示され、試料中の蛍光強度は FITC-albumin 濃度を反映するものと考えられた。

コントロール実験

カニューレを装着したラットを、麻酔下で保定し、Push-Pull ポンプによる灌流を行った。その典型例を示した。カニューレを装着し Push-Pull ポンプを流速 1 $\mu\text{l}/\text{min}$ で作動させるとカニューレから蛍光検出部までの管内の容量が 75 μl であるため、回収される脳髄液が検出部で観察されるのは、始動から 75 分後からということになる。また、カニューレを 30 分後に外すため、脳髄液が検出器に入ってくるのは原理的には始動から 75 分から 105 分の間であるが、蛍光検出器のマイクロフローセルユニットの容量が 15 μl であること、管径が狭く灌流液（髄液）と管との間の相互作用が働くこと

など考慮すると、検出器で検出される蛍光はより幅広い時間帯に観察される。そこで本研究では、ポンプの始動から 180 分までを観察することとした。

始動から 75 分を過ぎると、若干の蛍光値の上昇が見られるが、これは脳髄液に微量の FITC-Albumin が漏出してきているためだと考えられた。また、カニューレを外したラットにエバンスブルー液を注入し、即時に灌流固定を行った脳の凍結切片を作成し、カニューレが正しく目的とする側脳室に入っているかどうかを確認した。脳の実質が青く染まっていないこと、切片中でエバンスブルーによって青く染まっている部分と側脳室の部位が一致すること、また注入されたエバンスブルーが脳室間を移動して第 4 脳室などでも見られることから、カニューレが正しく側脳室に挿入されていたことが推測された。

電磁界急性暴露実験

実験プロトコールに従って、電磁界暴露を行った。本研究においては、脳局所 SAR が 35W/kg で、30 分間の連続暴露を行った。

条件の設定がやや困難なため、蛍光のピークの位置にややずれがあるが、全体の傾向として暴露群において、高い蛍光強度を示した。このことは、暴露群において、FITC-albumin の髄液への移行が亢進されていること、すなわち非常に強い電磁界暴露によりバリア機能が何らかの障害を受けたことを示唆している。

D. 考察

電磁界が人々の健康を害するのではな

いかという電磁界の健康リスクについては大きな社会的関心が持たれている。

電子レンジなどに代表されるように、マイクロ波は高いレベルで生体に暴露されるとエネルギーが組織に吸収されて熱に変換される。これらの熱作用については以前より多くの研究が行われており、現在の国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) によって推奨されているガイドラインも主に、熱作用に基づいて設定されている。しかしながら、非熱作用についての研究はまだ例が少なく、確定した作用は認められておらず、これまでの動物実験の結果は携帯電話で用いられている程度のレベルでは急性、慢性影響とも認められていない。

このような背景をもとに、WHO 国際電磁界プロジェクトでは、2003 年に WHO research agenda for radio frequency fields (WHO 高周波(RF)電磁界の研究課題) を発表し、RF 電磁界に関して、疫学、ヒトの実験的研究、動物の実験的研究、in vitro での組織、細胞、無細胞を用いた研究の各分野で行われるべき優先的な研究課題を示した。その中で至急行われるべき研究として、動物を用いた血液脳関門の透過性に関する研究が挙げられている。

血液脳関門に関する研究ではこれまでに、いくつかの報告があり、ポジティブとネガティブな相反する結果が報告されている。スウェーデン Lund 大学の Salford らは微弱なマイクロ波がラットの脳に影響を与える可能性を示唆する報告を行っている。この研究は、幼若ラットに高周波磁界を 2 時間暴露し、50 日後に脳を調べると、血液脳関門の透過性

が高まっていることを示した。計算による暴露条件は、全身平均 SAR で、2, 20, 200mW/kg であり、これらが透過性との量反応関係を示すことを示唆した。彼らの行った SAR 算出法については、専門家からの異論もあり、かつ 2 時間の暴露の後に、50 日間の空白期間があることから、血管の透過性が仮に認められたとしてもその結果はあまりにも限定的であり、電磁界暴露との因果関係については疑問点も多く、そのほかの研究ではおおむねネガティブな結果である。たとえば、Tsurita らは、ラットに 1439MHz の TDMA 変調波を 1 日あたり 1 時間、脳局所 SAR 2 W/kg の強度で、2 週ないし 4 週の連続暴露をおこなったが、脳内の血管透過性ならびに脳の形態に影響を及ぼさないことを示している。

ここで述べた研究でもそうであるように、血液脳関門の機能を議論する際には、一般的に、主要血漿蛋白質の一つであるアルブミンの透過度が一つの指標になる。血液脳関門は脳の内部環境を維持するために血液を流れる物質の脳組織への移行を制限しており、常態生理下では血漿の蛋白質成分の脳間質液への移行も制限されている。脳室とクモ膜下腔を満たしている脳髄液も関門を通じて産生され、脳髄液と脳間質液は相互交換が起こることといわれている。このことから、脳髄液と脳間質液は生理的に同質であり、血漿との大きな違いとして脳関門による選択的な物質透過があるため、脳髄液中の総蛋白質濃度は血漿の 0.5% 以下と少ない。このことから脳髄液 (あるいは細胞間液) のアルブミン濃度はバリア機能の正常性を示す指標として用いることができる。

しかしながら脳髄液成分は生成と吸収により常に入れ替わるため、脳髄液中の成分分析を行うためには、脳室内脳髄液をリアルタイムにモニタリング可能なシステムを用いることが必須である。これらの条件を満たす解析方法として本研究では、プッシュプルポンプを用いるマイクロダイアリシス方法を検討した。本分析システムを用いることにより、目的部位に挿入したカニューレより連続的に必要量の試料液を一定速度で採取することができる。本研究では側脳室にカニューレを埋め込み人工髄液を超低速で注入することにより脳内圧を一定に保ちながら脳髄液を採取した。本研究では、脳髄液中の蛍光分子 FITC-Albumin の検出のために、蛍光色素を高感度で検出可能な分光蛍光光度計 FP6500(日本分光)を接続し、さらに検出部ではセル容量 15 μ l のマイクロフローセルユニットを配置し、微量でかつ、高感度に検出した。偽暴露条件下で、検出器の設定を最適化し、次に上記のループアンテナを用いて、30分間連続暴露による急性暴露影響を検討した。本研究においては、脳局所 SAR が 35W/kg で、30分間の連続暴露を行った。その結果は、暴露群において、FITC-albumin の髄液への移行が亢進されていること、すなわち非常に強い電磁界暴露によりバリア機能が何らかの障害を受けた可能性を示唆している。しかしながら、今年度は単一の暴露条件であったことや、アンテナとカニューレの相互作用については検討できなかったため、詳細な検討は今後の課題である。またこれまで多くの報告で用いられている免疫組織染色による検討についても同時に行う必要がある。

E. 結論

脳の局所に集中したマイクロ波の暴露を行うことのできる暴露システムとして、ループアンテナを用いた暴露システムを開発した。このシステムの暴露評価を行ったところ、全身平均 SAR に対して脳平均 SAR を 20 倍とすることができた。これは、目的を満たすものであり、従来のモノポールアンテナによる暴露より十分に優れたものといえる。

またこの暴露装置を用いてラットの暴露実験を試みた。脳におけるバリア機能のリアルタイム計測のために、本年度の研究で開発した、蛍光検出器を組み込んだダイアリシスサンプリング法は高感度で脳内変化を追跡可能であった。

急性暴露影響を検討した結果、非常に強い磁界の長時間連続暴露でバリア機能が何らかの影響を受けている可能性が考えられた。しかしながら、影響のメカニズムなども含めてより詳細な検討が必要であると考えられる。

発表

Ushiyama A., Masuda H., Ohkubo C., Effects of subchronic exposure to extremely low frequency electromagnetic fields on the cranial microcirculation in the brain tumor bearing mouse. 25th Annual meeting, bioelectromagnetic society

Masuda H., Ushiyama A., Wake K., Watanabe S., Yamanaka Y., Taki M., Ohkubo C., Sub-chronic effects of local

exposure to radio-frequency electromagnetic fields with a loop antenna on the cerebral microcirculation in rats. 25th Annual meeting, bioelectromagnetic society

Ushiyama A, Ohkubo C. Effects of Whole Body Exposure to 50Hz Electromagnetic Fields on the Intramicrovascular Leukocyte Adhesion in Mice. International Conference on Non-Ionizing Radiation at UNITEN (ICNIR2003), Electromagnetic Fields and Our Health, 2003 October 20-22; Kuala Lumpur, Malaysia; Abstract book

Masuda H, Ushiyama A, Wake K, Watanabe S, Taki M, Ohkubo C. Acute effects of local exposure to radio-frequency electromagnetic fields with a loop antenna on the cerebral microcirculation in rats. The 3rd International EMF Seminar: 2003 Oct 13-17; Guilin, China; Abstract book.

Masuda H, Hirota S, Ushiyama A, Wake K, Watanabe S, Taki M, Ohkubo C. In vivo evaluation of exposure effects to radio-frequency electromagnetic fields on the cerebral circulation in rats. The Blood-Brain Barrier (BBB) Workshop of COST281-Potential health Implications from Mobile Communication Systems: 2003 Nov 2-6; Reims, Germany; Abstract book.

Masuda H, Hirota S, Ushiyama A, Wake K, Watanabe S, Yamanaka Y, Taki M, Ohkubo C. Sub-chronic effects of local exposure to Radio-frequency electromagnetic fields with loop antenna on the cerebral microcirculation in rats. 6th International Congress of the European Bioelectromagnetics Association: 2003 Nov 13-15; Budapest, Hungary; Abstract book.

Masuda H, Hirota S, Ushiyama A, Wake K, Watanabe S, Yamanaka Y, Taki M, Ohkubo C. Intravital-microscopic evaluation of exposure effects to radio-frequency electromagnetic fields on the cerebral circulation in rats. Workshop and MCM of COST281-Potential health Implications from Mobile Communication Systems: 2003 Nov 15-16; Budapest, Hungary; Abstract book.

Ushiyama A, Suzuki Y, Masuda H, Hirota S, Taki M, Ohkubo C. Physiological Effect of continuous whole-body exposure to extremely low frequency electromagnetic fields with or without transient magnetic fields on cerebral microcirculation in mice with brain tumor. Asia-Pacific EMF conference 2004 Jan26-30, Bangkok, Thailand, Abstract book p.90

Traikov L, Ushiyama A, Masuda H, Ohkubo C. Acute effects of whole-body exposure to low frequency 16 Hz and 50 Hz electromagnetic fields on cutaneous microcirculation in mice. -EMF-frequency dependence of changes in the blood diameter- Asia-Pacific EMF conference 2004 Jan26-30, Bangkok, Thailand, Abstract book p.91

別添5

厚生労働科学研究費補助金（がん予防等健康科学総合研究事業）
分担研究報告書

発達段階にある脳を対象とする携帯電話周波数帯電磁界暴露の血液脳関門に及ぼす影
響に関する研究

－局所暴露用アンテナに関する研究－

分担研究者 多氣 昌生 東京都立大学工学研究科教授
分担研究者 渡邊 聡一 情報通信研究機構電磁環境センター生体 EMC 部
門リーダー
分担研究者 和氣 加奈子 情報通信研究機構電磁環境センター

空間的に局所に集中した電磁界暴露の作用については、暴露部位が明らかに温度上昇する場合を除いて、生体作用として知られている作用はこれまで報告がないが、詳細な研究が十分に行われているとはいえない。特に、携帯電話機による頭部暴露は、頭部に集中する暴露であり、脳が重要な器官であることから、詳細な検討が必要である。その際、局所暴露が、局所だけでなく全身での吸収電力も無視できないレベルであれば、全身的な熱作用を伴う。この場合、暴露により生体に変化が生じたとしても、それが深部体温の上昇などの全身的な熱効果によるものである可能性があり、局所への暴露に由来する固有の現象を把握することができない。このため、影響評価を行う電磁界暴露システムは全身平均のエネルギー吸収率 (SAR) が小さく、局所 SAR が十分に大きな暴露を実現する必要がある。

本研究においては、このような暴露条件を実現するための暴露システムの開発を行い、その暴露評価を行った。つまり脳の局所に集中した電磁界暴露を行うことのできる暴露システムとして、ループアンテナを用いた暴露システムを開発し、このシステムの暴露評価をファントムモデル並びに数値モデルを適用して行ったところ、全身平均 SAR に対して脳平均 SAR を 20 倍以上とすることができた。これは、当初の目的を満たすものであり、この暴露システムを生体評価に供した。

A. 目的

高周波電磁界の生体作用では、1960 年代以来の研究により、熱作用が支配的な

影響であると理解されている。体温や組織温度に変化が生じない、「非熱的」な暴露レベルでも、健康に影響する可能性がないことを証明することはできないが、これまでの研究では、少なくとも全身への定常的な暴露では、非熱的作用の健康影響を具体的に示す、再現性のある研究報告はない。

暴露が時間的・空間的に限られていれば、瞬間的・局所的には強い暴露であっても平均すればエネルギーはわずかであり、生体の温度の上昇はほとんど生じない。このような暴露が何らかの影響を及ぼす可能性は否定できない。

時間的に限られた暴露の生体作用として、ピーク電力の大きなパルス波によるマイクロ波聴覚効果は確立された生体作用である。これは瞬間的なエネルギー吸収によって組織がわずかに熱膨張して弾性波が生じ、これが聴器官によって感知される現象である。このときの温度上昇は数マイクロ℃で、その時間は10マイクロ秒のオーダーである。

一方、空間的に局所に集中した電磁界暴露の作用については、暴露部位が明らかに温度上昇する場合を除いて、生体作用として知られている作用はない。しかし、管理環境についての防護指針値である10W/kgの局所SARは、組織の内部電界で100V/mをこえ、電流密度も100A/mのオーダーである。熱的には血流による熱運搬によって大きな温度上昇は生じなくても、この内部電界によって生じる生体影響の可能性を調べる必要がある。また、局所でのエネルギー吸収により生じる熱運搬の必要性から、血流に変

化が生じることが考えられる。このような局所に集中した高周波電磁界暴露の生体影響については、詳細な研究が十分でない。特に、携帯電話機による頭部暴露は、頭部に集中する暴露であり、脳が重要な器官であることから、詳細な検討が必要である。

局所に集中した暴露を行う際に、局所だけでなく全身での吸収電力も無視できないレベルであれば、全身的な熱作用が生じてしまう。この場合、暴露を受けた生体に変化が生じたとしても、それが深部体温の上昇などの全身的な熱効果によるものである可能性があり、局所への暴露に固有の現象を把握することができない。このため、全身平均SARが小さく、局所SARが十分に大きな暴露を実現する暴露システムが必要である。

本研究では、このような暴露条件を実現するための暴露システムの開発を行い、その暴露評価を行う。

B. 方法

局所暴露システムの必要条件

全身平均SARが1~4 W/kgを超えると、全身加温の影響による生体影響が生じる。また、局所SARに関する防護指針値は、全身平均SARの20倍~25倍の値である。すなわち、全身平均SARに対して、25倍以上の局所SARが頭部で実現できることが望ましい。

実験動物として通常用いられるげっ歯類は、携帯電話で使用される900MHz~1.5GHz程度の電磁波の波長に比べて大きいとはいえないため、局所に電磁波の吸収を限定することは困難である。これ

まで使用されてきた線状アンテナ（モノポールアンテナやダイポールアンテナ）による暴露装置の場合、局所 SAR の全身平均 SAR に対する比は、2~4 程度に過ぎない。アンテナの寸法が、実験動物に比べて小さくできないため、上記の目標値である 25 という比を実現することは困難と予想されるので、線状アンテナに比べて十分な改善が実現できることを目標に本研究を実施した。

C. 結果

ループアンテナを用いた局所暴露システム

これまでの検討から、磁界によって生体と結合する形式が、暴露の局在化と負荷変動による影響の小ささから適当であると考えられる。そこでループアンテナによる暴露装置を作成した。作成したアンテナを Fig. 1 に示す。アンテナはプリント基板上に印刷したもので、2 に示したラットホルダーに固定される。

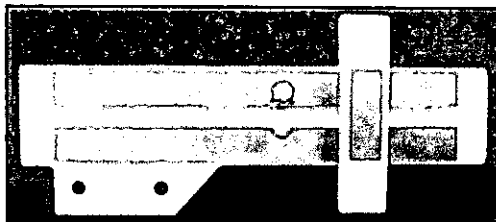


Fig. 1 ループアンテナ

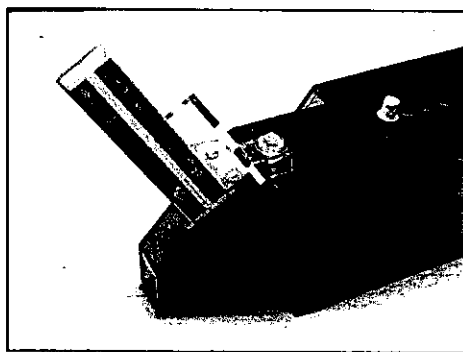


Fig. 2 ループアンテナとラットホルダー

アンテナの入力インピーダンス

アンテナの特性として、入力インピーダンスの測定を行い、また FDTD 法による数値解析結果との比較を行った。結果を Fig.3 に示す。共振周波数が予定していた周波数より高い 1.8GHz 付近となって

いるが、これは試作後の熱対策により基板を取り去った影響である。詳細な暴露評価に用いたこのアンテナのほかに、1.439GHz 用のアンテナも作成し、実験に使用した。

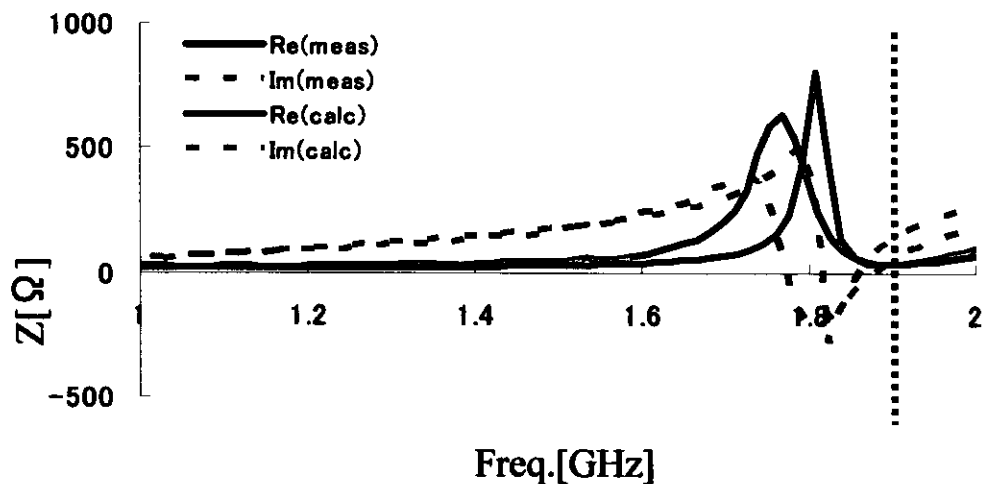


Fig.3 ループアンテナの入力インピーダンス特性の測定値と計算値
meas は実測値、calc は FDTD 法による数値解析値を示す。また、Re は実部、Im は虚部を示す。図より入力インピーダンスの測定結果と計算結果とが良く一致していることから、計算によるアンテナのモデル化が十分に行えていることがわかる。

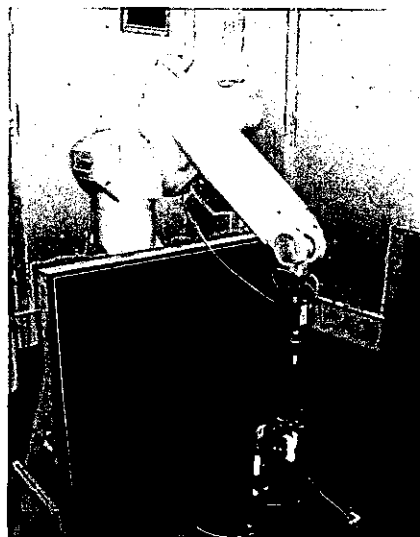


Fig.4 DASY3システム

アンテナによる電磁界分布の測定

作成したループアンテナによる電磁界を実験的に測定した。測定は、等方性の電界プローブおよび磁界プローブを用いて行った。これらのプローブは、DASY3システム(Fig. 4)のものであり、このシステムはロボットアームにより空間をスキャンして電磁界分布を測定することがで

きる。DASY3システムの外観を Fig. 4 に示す。また、アンテナ付近の電磁界分布を測定する際のプローブ付近の様子を Fig. 5 に示す。

測定された電界分布および磁界分布を Fig. 6 に示す。また、比較のため、FDTD法による計算結果も示す。

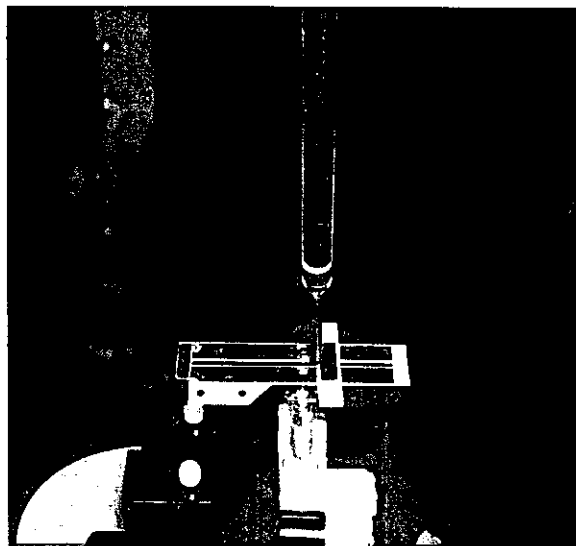


Fig.5 電磁界測定の際のプローブ付近の様子

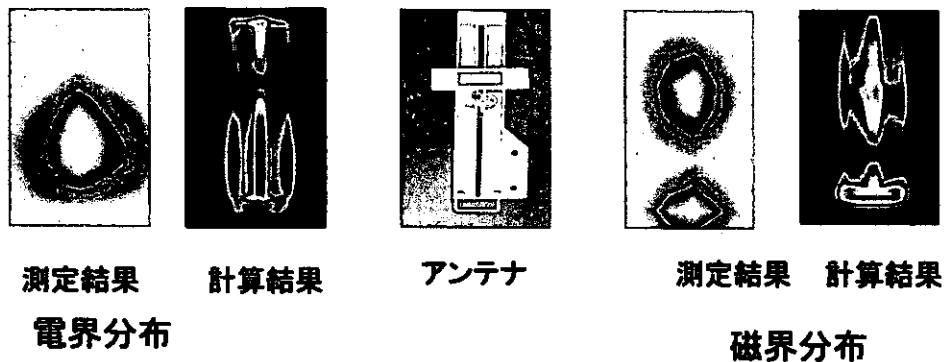


Fig. 6 電界分布および磁界分布の測定結果と計算結果

暴露評価の方法

1. 数値的評価の方法

ループアンテナによるラット頭部内の SAR 分布を時間領域差分法で推定した。計算には CT 画像に基づく数値モデルを用いた。ラットの数値モデルとアンテナのモデルを Fig. 7 に示す。

組織の電氣的な不均一を考慮した数値解析を行う場合、各組織の電気定数の違いを計算に反映する必要がある。使用した電気定数を Table 1 に示す。

計算に用いたラットとアンテナの相対的な配置を Fig. 8 に示す。

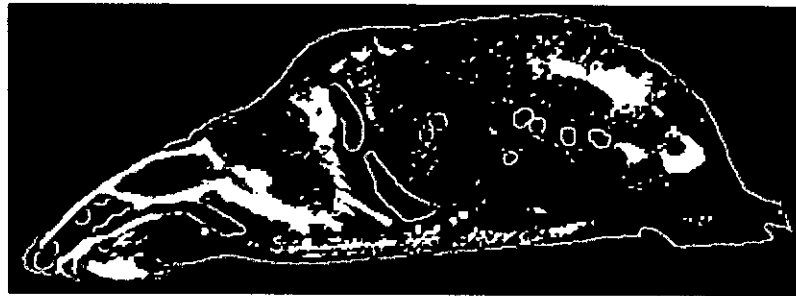


Fig. 7 数値ラットモデル

Table 1 ラットの各組織の電気定数 (1.88GHz)

COLOR	TISSUE(組織)	(比誘電率)	(導電率)[S/m]
	Air(空気)	1.000000	0.000000
	Brain(脳)	43.408279	1.193568
	Cerebral Spinal Fluid(脳脊髄液)	67.084656	2.982283
	Nerve(Spine)(延髄近傍)	30.768017	0.870682
	Eye(眼球)	53.447453	1.649688
	Bone(骨)	15.484262	0.451195
	Muscle(筋肉)	54.332108	1.436068
	Skin(皮膚)	38.744930	1.216511

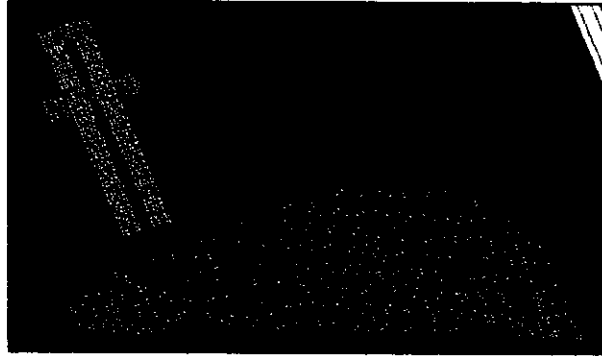


Fig.8 ラットとアンテナの数値モデル

2. 実験的な暴露評価

SAR を実験的に測定する方法として、本検討ではサーモグラフ法を用いた。生体組織と等価な電気定数をもつ媒質でラットファントムを作成し、アンテナに大電力を給電してファントムに電磁波を照射する。電力を吸収したラットファントムの各部分は、その部分の SAR の大きさに応じて温度が上昇する。時間とともに熱は拡散するが、照射電力が十分に大きければ過熱は急速であるため、熱伝導による温度の拡散は無視できる。したがって、電磁波を照射する前と照射したあとのファントム内部の温度分布を測定することによって SAR の分布を知ることができる。

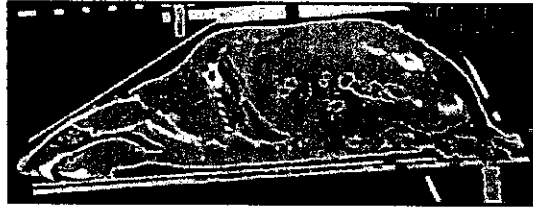
SAR の推定には次の式が用いられる。

$$SAR = c \frac{dT}{dt} \cong c \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

ここで、 c は比熱 [J/K・kg]、 ΔT は電磁波暴露による温度上昇 [K]、 Δt は電磁波の照射時間 [sec] である。

この方法による測定精度を高くするには、ファントム内での熱伝導による温度の拡散を小さくすること、外気に放射による熱放散を小さくすることが必要である。このため、十分に大きな電力で照射する必要がある。

ラットファントムは、使用するラットホルダーに入れたラットの X 線 CT 画像をもとに、バルサ材で形状の立体モデルを作成し、これをもとに型を作成して生体等価媒質のファントムを作成した (Fig. 9)。



(a) ラットのX線CT画像



(b) バルサ材による形状モデル



(b) バルサ材による形状モデル

Fig.9 ラットファントムの作成過程

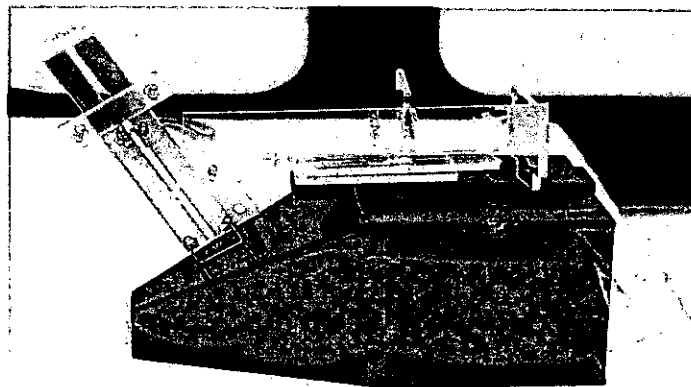


Fig.10 サーモグラフによる SAR測定用ラットファントム