

受託研究報告書

免疫システムの機能とその発達に
おける電磁環境の影響に関する研究

2011.3

名古屋工業大学

I 要旨

携帯電話基地局の電波による新生児および小児への影響評価の一環として、携帯電話基地局の高周波電磁界による生体免疫システムへの影響を機能的・形態的・分子的な指標を用いて検討する必要がある。本研究では、ラット胎児及び幼児に対する電波ばく露装置を開発し、ラットへのばく露量の定量化制御、管理及びモニタリングを行うことを目的とした。まず、2GHz帯携帯電話基地局を対象に、想定された電波源の形態、強度、被ばく時間、動物に対するストレス及び運用保守など諸条件を総合的に検討し、ラット全身ばく露装置の仕様を策定した。次に、策定仕様に基づき、全身ばく露システム（信号発生器、分配装置、電力増幅器、ばく露箱、アンテナ、換気系、制御ソフトウェア）の開発・製作を行った。さらに、開発された全身ばく露システムに対して、分配装置、電力増幅装置、アンテナ、ばく露箱内部電界分布、ラット SAR（比吸収率）など諸特性を実測または計算機シミュレーションにより明らかにした。特に、ラット SAR については、ラットのばく露箱内での活動パターンの記録写真を分類し、それに基づきラット全身平均 SAR を統計的に求めた。また、ばく露システム全体を組み立て試運転を実施し、制御ソフトウェアの動作を確認した。以上により、本ばく露システムの開発が完了し、その仕様と動作も明らかにでき、免疫システムの動物実験に供与できるようになった。

II 研究目的

近年の移動通信技術の飛躍的進歩に伴い、携帯電話は爆発的に普及し、日常の必需品となっている。一方、携帯電話の利用者の急増に伴い、その基地局の設置が急増しているため、公共の間で基地局からの電波が引き起こす人体影響への関心が高まっている。電波の安全性に関して、我が国では国際的なガイドラインを参考に電波防護指針を策定しており、電波法により電波防護指針に基づく規制を行い、適切な電波利用環境の確保に務めている。一方で、世界保健機関等の国際機関では、現状の国際的なガイドラインの妥当性を認めつつ、近年の電波利用技術のより一層の普及状況を考慮し、国際的なガイドラインの信頼性をより強固とするための更なる研究の必要性を勧告しており、我が国の生体電磁環境研究推進委員会がとりまとめた最終報告書(平成19年4月)においても、今後も科学的データの信頼性の向上を図り、電波の安全性評価に関する研究を進めていくことが重要であるとしている。

これまでの報告を総括すると、免疫システムに対する高周波電磁界の影響が示唆される報告が旧ソ連邦を中心に数多く存在している。しかしながら、いずれも電波のばく露装置や評価指標において信頼性に乏しく新たな知見が求められており、世界保健機関電磁界プロジェクトがまとめた高周波電磁界の優先的研究課題(2006年)においても幼若動物における中枢神経系、造血系、免疫系の発達への高周波電磁界の影響の検討が課題として挙げられている。

上記の課題に対応するため、免疫機能においても発達段階にある幼若な動物を用いて、GHz帯携帯電話基地局の高周波電磁界をばく露した際の影響について、動物のドシメトリを明確にし、様々なばく露レベルにおける免疫システムへの影響を機能的・形態的・分子的な指標を用いて検討することが必要である。

このために、本研究では、ラット胎児及び幼児に電波がばく露された際の免疫システムへの影響を評価する実験を実施するためのばく露装置を開発し、また、ラットへのばく露量の定量化制御、管理及びモニタリングを行うことを目的とする。

具体的には、本年度で、妊娠および幼若ラット全身に長時間ばく露が可能なばく露装置の開発を行い、そのアンテナ特性、電界分布特性、SAR特性、制御ソフトウェア特性などの基本性能を明らかにする。即ち、

- ①ばく露装置の基本仕様を策定する。

②ばく露装置の開発・製作を行う。

③ばく露装置の基本性能の評価データを取得する。

Ⅲ ばく露システム基本仕様の策定

基地局による遠方電界は、垂直偏波が支配的である。これによる人体への全身ばく露は、昼には電界が人体の長軸に対して平行し、E 偏波ばく露となるが、夜には人体短軸に平行し、H 偏波ばく露となる。このことから考えると、全身ばく露装置の設計に際しては、多様な偏波の電界強度に基づく全身平均 SAR をばく露設計の評価指標とするのが妥当だと考える。なお、基地局からのばく露を想定しているので、ばく露範囲は全身で、且つばく露時間も一日中としなければならない。長時間のばく露となるため、ラットのストレスを考慮するとそれを固定できず、それ故にばく露システム設計の基本指針は、できるだけ均一なばく露環境を作り、ラットの全身平均 SAR を一定値に保つことになる。

上述携帯電話基地局からの長期ばく露を想定し、まず、基地局からの遠方電界は垂直偏波が支配的なので、立つ・寝る等の日常生活動作により、多様な偏波曝露となるように設計した。また、長時間の全身曝露となるため、ラットのストレスを考慮し、ラットは固定しないことにした。それ故に、ラットの全身平均 SAR の変動幅が日常生活動作による変動範囲内となるようにする必要がある。図 1 に代表的な 3 偏波によるヒトの全身平均 SAR の周波数特性を示す。日常生活において、例えば、ヒトが立っている場合は垂直偏波の E 偏波曝露となるのに対し、ヒトが横たわっている場合は水平偏波の H 偏波曝露となる。よって、代表的な 3 偏波から日常生活動作による変動範囲内を決定した。携帯電話使用周波数の 2GHz 帯においては、1 mW/cm² の入射電界に対して、E 偏波で約 0.03W/kg、H 偏波で約 0.04W/kg、K 偏波で約 0.01W/kg となることから、全身平均 SAR の変動範囲は 3 者の平均値に対して約±60%以内であることがわかる。

これらの携帯電話基地局の特徴をまとめると、以下のようになる。

- ① 1 日 24 時間の長時間曝露
- ② 多様な偏波による曝露（日夜によって変化）
- ③ 2GHz 帯全身 SAR の変動幅：±60%

これらのことを基に、下記のばく露システムの基本仕様を定めた。

- ① ラットに人体安全指針値 0.4W/kg の全身平均 SAR が実現できること。
- ② 無拘束曝露であること。
- ③ 多様な偏波が模擬されること。

④ラットの活動習性を考慮し、全身 SAR の変動が±60%以内に抑えること。

また、発達段階における免疫機能への影響の調査が中心であるため、ばく露時期を以下の3段階を想定した。

①Phase 1： 妊娠期、妊娠から出産までの母ラットへのばく露。

②Phase 2： 離乳前、出生3週間までの離乳前の仔ラットへのばく露。

③Phase 3： 離乳後、出生4週間から6週間までの仔ラットへのばく露。

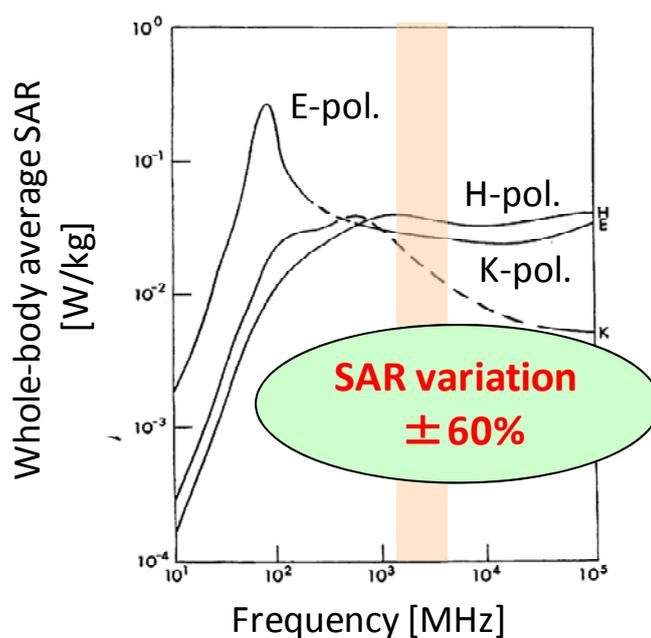


図1 代表的な3偏波によるヒトの全身平均 SAR の周波数特性

IV ばく露システムの開発

ラットに対する全身ばく露システムは、図2のように、任意信号発生器、高周波電力増幅装置、分配装置、曝露箱、パワーメータ、アンテナ、制御用PCから構成される。任意信号発生器で生成した変調波を信号分配装置で2台の高周波電力増幅器に入力し、増幅出力された電力は曝露箱内のアンテナに供給され、アンテナからラットに均一に曝露する装置である。制御PCは専用のソフトにより、パワーメータで読み込んだアンテナへの入力電力値から目的の電力値が±5%以内に収束するように制御し、データを保存する機能を持つ。安定的に電力を制御する事で実験精度を上げることができるシステムである。

図3にラット全身ばく露システムのばく露箱の概念図を示す。ばく露箱一つに対してゲージを4つ設置し、それぞれのケージ内でラットが自由に動けるようにした。このとき、ラットが任意の向きが取れることから、円偏波を用いることで多様な電界方向とラットとの結合関係に対応できるように、ダイポールアンテナを2本水平に直交配置する直交ダイポール構造を案出した。直交ダイポールアンテナ間の位相差を 90° とすることで、遠方界においては円偏波となった。また、アンテナ長を $3/2$ 波長と長くすることで、ばく露箱内の電界分布の均一性を改善し、ばらつきの小さい全身ばく露を目指した。

このように開発したばく露箱の詳細寸法・形状を図4に示す。ばく露箱は、内部寸法が $90\text{cm} \times 90\text{cm} \times 40\text{cm}$ である。金属天井の中心に直交ダイポールアンテナが水平に取り付けられ、天井を除く5面には平面状の電波吸収体が張られている。また、新鮮な空気をラットへ送風するためにばく露箱の中央下部に換気扇、左右2面に小さな換気窓が2つずつ設置されている。さらに、ばく露箱内の中央部にあるプラスチック製の台座は円盤状になっており、回転させることにより、高さを調節できるようになっている。動物実験ではばく露箱の4つのゲージにラットを入れ、毎日20時間以上携帯電話基地局の 2.14GHz の電波を母ラット及び出生した仔ラットに照射できるようにした。図5にばく露箱の外観と内部の様子の写真を示す。

信号発生器、増幅装置、分配装置、曝露箱、アンテナ、制御用PCから構成されたばく露システムの全体構成を図6に、各部の詳細を図7に、システム仕様とばく露箱の詳細機能を表1と2にそれぞれ示す。

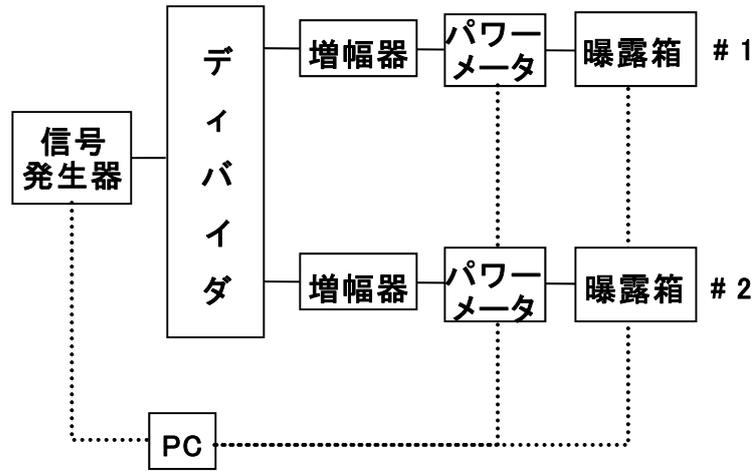


図2 ラット全身ばく露システムの構成

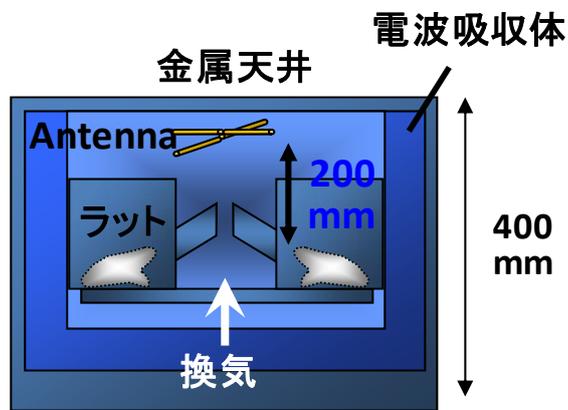
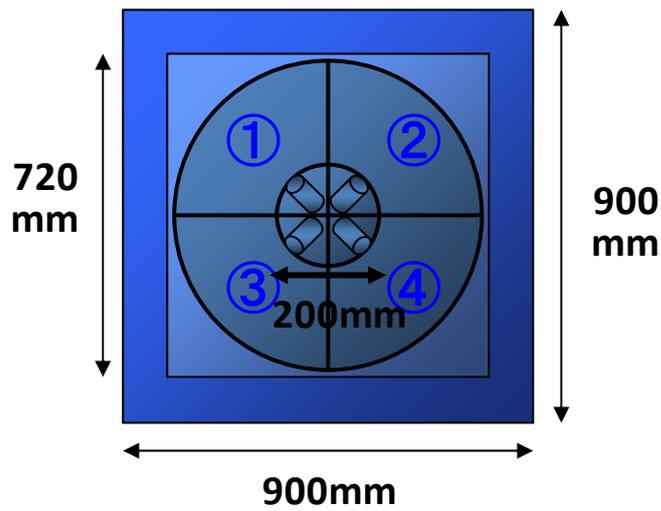
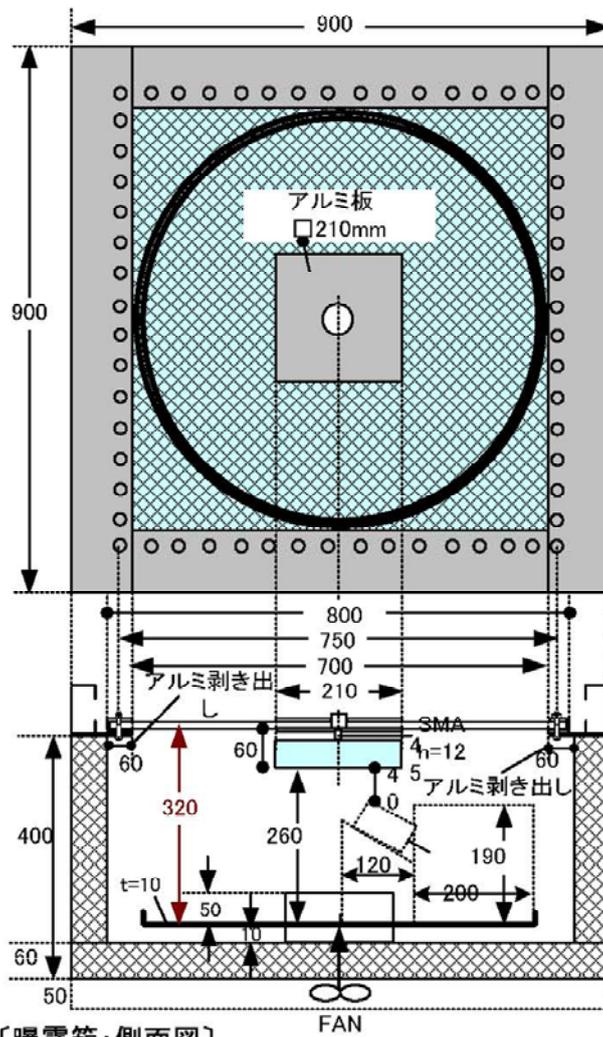


図3 ラット全身ばく露システムのばく露箱の概念図



[曝露箱:側面図]

図4 ばく露箱の詳細寸法・形状

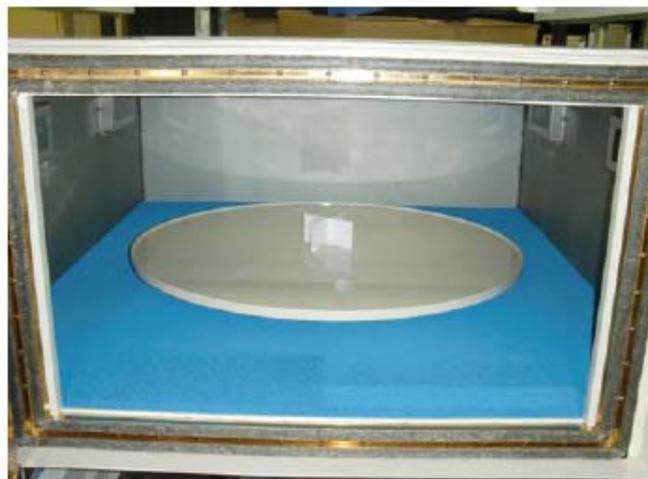


図5 ばく露箱の外観と内部の様子の写真

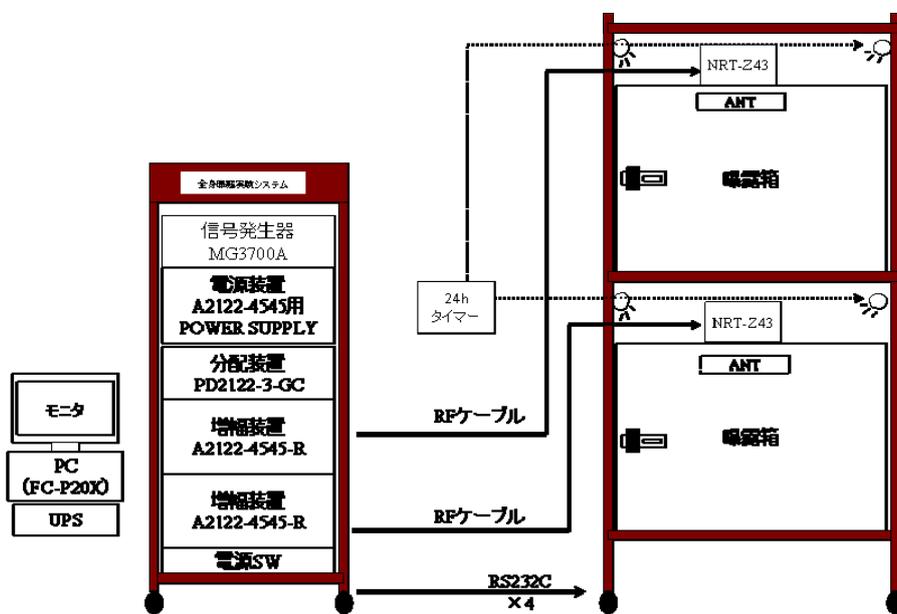


図6 ばく露システムの全体構成

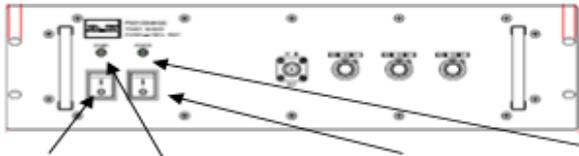
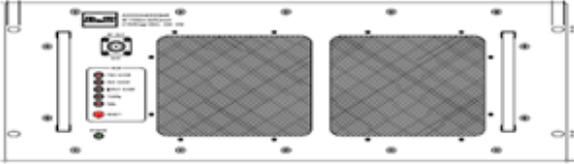
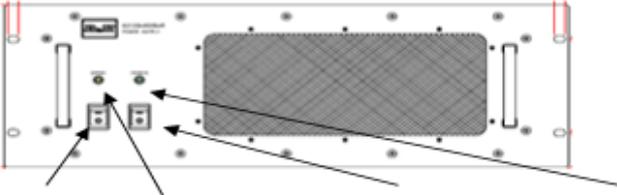
品名	説明
信号発生器 MG3700A	 <p>電源SW</p>
分配装置 PD2122-3	 <p>電源SW(ST-BY LED) POWER SW(Power LED) 「I」側がON。正常時POWERの緑色LED点灯</p>
増幅装置 A2122-45-R	 <p>LEDの説明 POWER: 正常時緑色点灯 以下は異常時に赤色LED点灯 FWD OVER: 出力40W以上のとき REF OVER: 反射電力が4W以上のとき INPUT OVER: 入力電力が5dBm以上のとき TEMP: 内部温度65°C以上のとき P.S.: 電源入力±15%以上のとき RESET SW: 上記異常が発生した場合、LED消灯SW</p>
電源装置 A2122-45-R用	 <p>電源SW(ST-BY LED) POWER SW(Power LED) 「I」側がON。正常時POWERの緑色LED点灯</p>

図7 ばく露システムの各部の詳細

表1 ばく露システムの仕様・性能

仕様項目	仕様項目内容
1. 免疫システム研究用全身曝露実験システム	
1-1	高周波電力増幅装置 2台 分配装置 1台 通過型電力計 2台 温度センサー 2台 円偏波アンテナ 2台
1-2	電源装置 1台
1-3 制御プログラムの機能	
1-3-1	高周波電力増幅装置をGPIBコマンドで利得制御できる
1-3-2	実験データを記録する機能を有する
1-3-3	実験用データベースの修正が容易にできる
1-3-4	通過型電力計の値を読める
1-3-5	温度センサーの値を読める
1-3-6	シリアルポートを4台以上制御できる
1-3-7	データベースで設定された電波曝露レベル(0.4W/kg)に設定できる
1-3-8	電波曝露レベル(0.4W/kg)は±5%以内に制御できる
1-3-9	任意信号発生器の変調波の出力ON/OFF制御ができる
1-3-10	制御プログラムはWindows7のOS下で動作する
1-3-11	制御プログラムはVisual Basic2010で動作する
1-3-12	実験時間を1分から20時間まで1分単位で設定し、電波曝露できる

表2 ばく露箱の仕様・機能

1-4 曝露箱の機能	
1-4-1	以下の周波数においてシールド性能が30dB以上ある 0. 8GHz、2. 1GHz、2. 6GHz、5. 0GHz
1-4-2	ラットを配置するテーブルを手動で回転できる
1-4-3	天板は透明なアクリル板を使用し、メッシュ2mm以下の金網を上下でサンドイッチする構造とし、内部が見える
1-4-4	吸収体はUF-60の平板型を使用すること
1-4-5	外形寸法はW900×D900×H500mm以内である
1-4-6	曝露箱 2台

V ばく露システムの基本性能評価

ばく露システムの設計は、電磁界シミュレーションによって行われた。電磁界シミュレーションツールとしては、FDTD法 (Finite Difference Time Domain method)はその地位が確立してある。FDTD法とは、マクスウェルの方程式を時間領域と空間領域の二つの領域について差分化し、それらの差分方程式を時間領域で逐次計算することによって領域内の電磁界を数値的に求める計算手法である。FDTD法の空間領域の差分は、計算対象となる領域を細かく格子(セル)状に分割し、各微小セルに電気定数を与えることにより計算対象をモデル化する。このため、FDTD法は複雑な形状と構造を有する不均質媒質での電磁界シミュレーションに適している。

本研究では、ばく露システムのアンテナ特性やばく露箱内部電界特性については実測を行い、その実測値と FDTD シミュレーション値の比較により評価する。また、ラット SAR 値については、FDTD シミュレーションにより求め、ラットの活動パターンを基に評価する。

1. アンテナ特性

ラットが任意の向きを取れることから、多様な電界方向とラットとの結合関係に対応できる円偏波の実現が要求される。この考え方に基づき、ダイポールアンテナを 2 本水平に直交配置する直交ダイポール構造とし、アンテナ長は $3/2$ 波長、直交アンテナ間の位相差を 90 度とした。このとき、 90 度の位相差により遠方界においては円偏波となる。

図 8 に開発した直交ダイポールアンテナの構造、図 9 に垂直断面におけるアンテナの指向性パターンを示す。照射方向におけるアンテナ軸比がおおむね $1\sim 3$ dB 以内であれば円偏波アンテナと定義される。このときアンテナパターンは真円 (軸比が 0) ではなく若干の楕円となる。図から、本アンテナ下方での軸比が 1 dB 前後なので、設計通り円偏波アンテナであると判断できる。

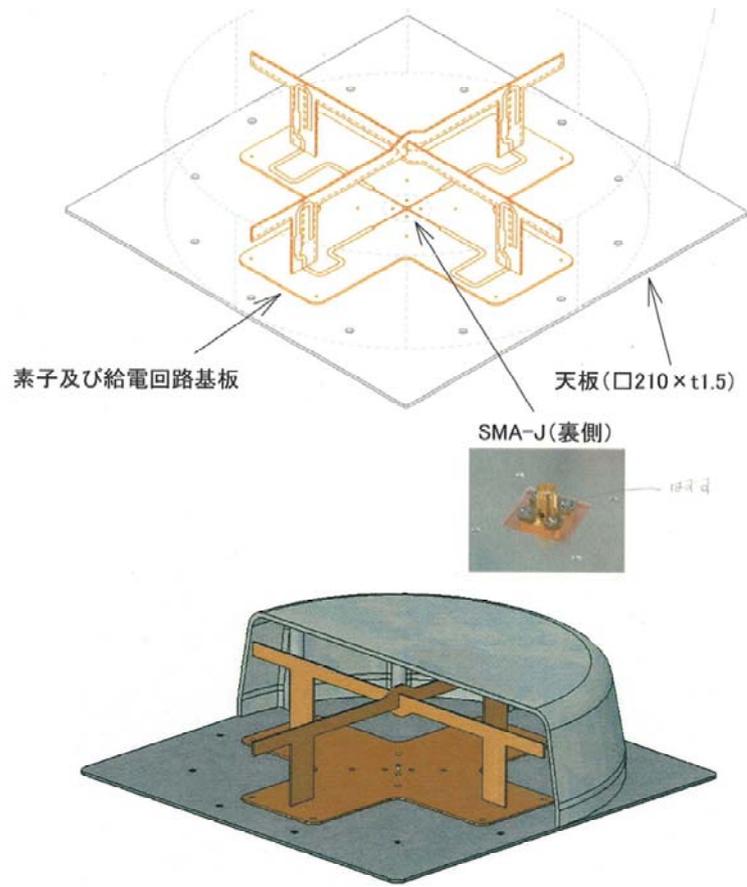


図8 円偏波直交ダイポールアンテナの構造

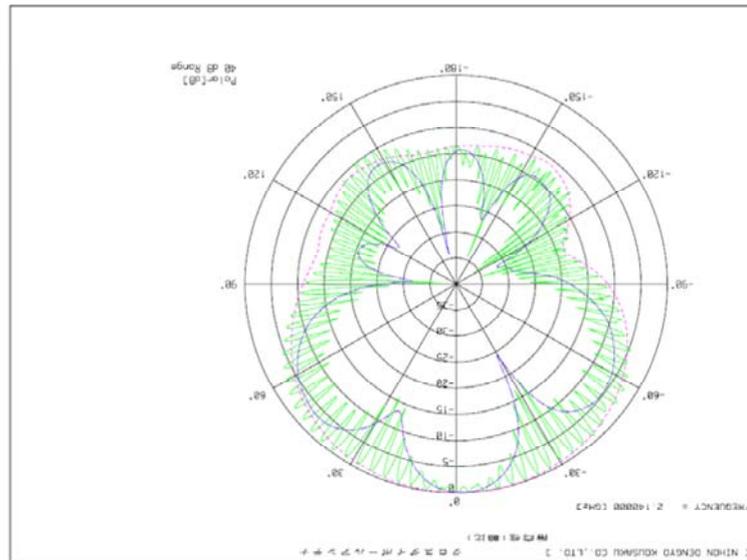


図9 垂直面におけるアンテナ放射パターン

2. 電界分布特性

ばく露箱内の電界分布は、測定と FDTD シミュレーションにより検証した。図 10 に測定概要を示す。直交ダイポールアンテナから下方 22cm のばく露箱内の水平面（ラットの活動場所）を 3 軸電界プローブ（Schmid & Partner Engineering AG ER3DV6）を用いて 2 cm の間隔で走査し、電界分布を測定した。なお、測定を行うために、ばく露箱の前面扉を開けておく必要があるが、これによる影響を確認するために、まずアンテナ入力インピーダンスの特性を測定した。測定結果により、ばく露箱の前面扉によるアンテナ入力インピーダンスの影響は十分小さく、電界分布値自身への影響も扉を全開・半開などで確認したところ、扉直近以外の場所では殆ど無視できることがわかった。

図 11 にこのように測定した電界強度のばく露箱内の場所に対する累積分布を示す。また、同図に FDTD シミュレーションによる結果も同時に示す。図から、測定結果は計算結果と類似しており、平均値もほぼ同じく、1 W のアンテナ入力電力に対して 38V/m であることがわかる。図 12 にばく露箱内の電界強度のヒストグラムを示す。但し、最大値が 1 となるように規格した。図から、ばく露箱内ラット活動空間の約 83% の箇所の電界強度が平均値±15%以内にあり、良好な均一性を有することがわかる。

これらの結果から、ばく露装置内の電界分布特性はほぼ設計通りであることが確認できた。

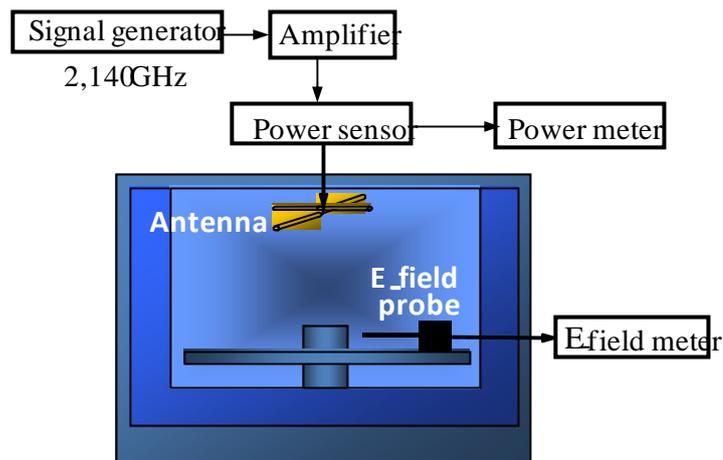


図 10 ばく露箱内部電界分布の測定系

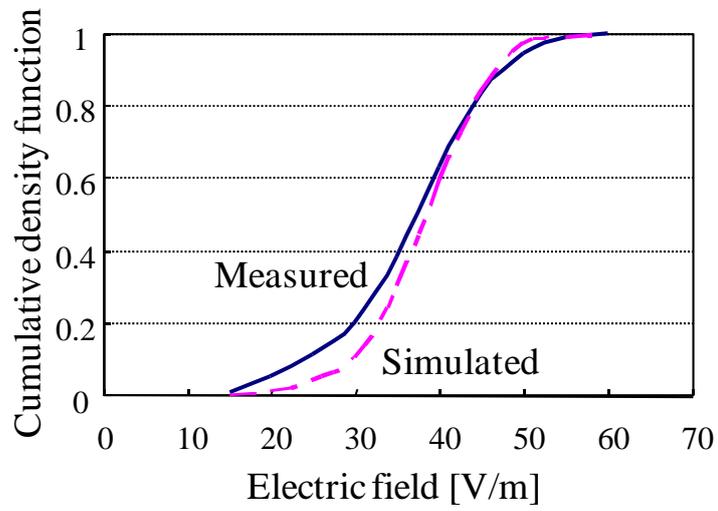


図 11 電界強度のばく露箱内の場所に対する累積分布

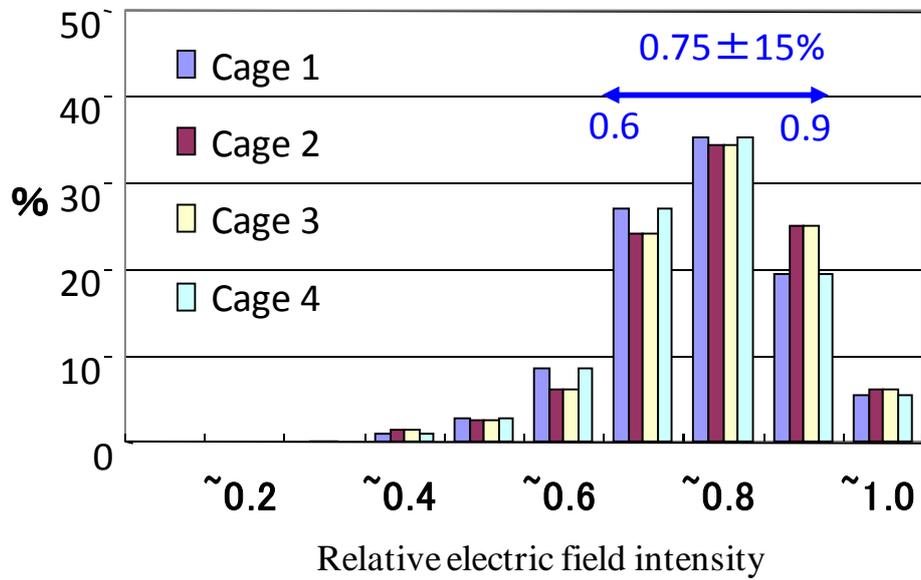


図 12 ばく露箱内の相対電界強度のヒストグラム

VI ばく露システムの SAR 特性評価

1. 数値モデルの生成

ばく露箱内におけるラット体内 SAR を FDTD 法で解析するために、FDTD 解析用ばく露箱モデル及びラット配置モデルの生成が必要である。図 13 にばく露箱の FDTD モデルを示す。この全身ばく露箱モデルは 2mm の立方体で構成した。一方、ラット数値モデルは磁気共鳴像データを基に作成されたものを用いた。母ラットモデルは 11 種類の生体組織で構成され、体重は妊娠 1 週間で 286g、妊娠 2 週間で 322g、妊娠 3 週間で 340g であり、分解能は 2mm である。仔ラットについては、生後 1 週間の体重 20g、生後 2 週間の体重 35g、生後 3 週間（離乳時期）の体重 65g と実測値を元に設定し、実形状であるが、筋肉のみの 1 組織構成とした。図 14 に母ラット及び仔ラットの数値モデルを示す。また表 3 にラット各組織の 2.14GHz における電気定数を示す。なお、母ラットと仔ラットは同じ電気定数を使用した。

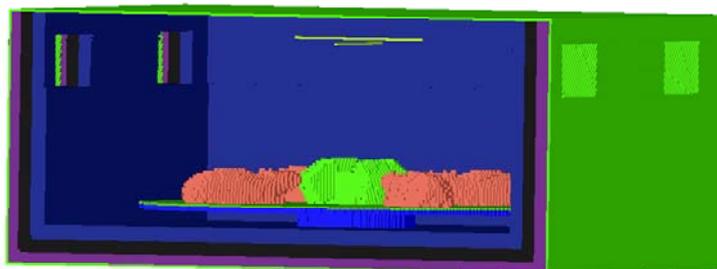


図 13 ばく露箱の数値モデル

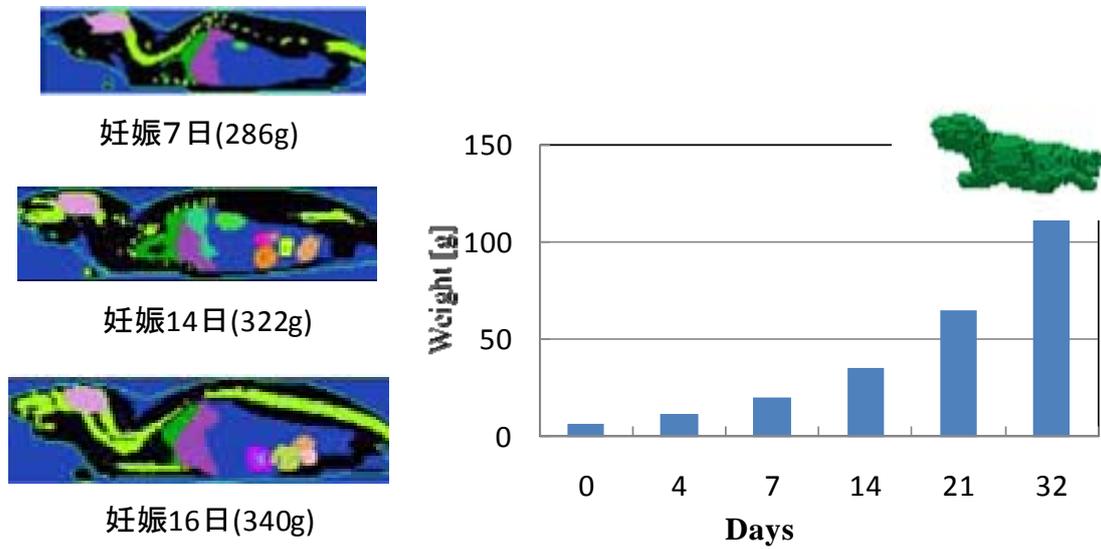


図 14 母ラットと仔ラットの数值モデル

表 3 ラット各組織の 2.14GHz における電気定数

Tissue	ϵ_r	$\sigma(S/m)$
Fat	10.97	0.21
Muscle	54.24	1.48
Liver	43.92	1.37
Eye	68.50	1.02
Brain	43.29	2.12
Bone	11.69	0.30
Apenddix	54.83	1.68
Stomach	62.97	1.81
Skin	40.84	1.37
Others	54.24	1.48
Amniotic fluid	76.12	2.11
Fetus	60.50	1.85

ラットは、ばく露装置内において図3に示した①～④の範囲内で自由に動くので、そのばく露量を評価するために、ラットの行動パターンを把握し、それを元にしてラット数値モデルの生成を行う必要がある。このラット配置モデルの生成は、本研究室で開発したソフトウェア MEDIT Lite を用いた。MEDIT Lite は、ユーザーインターフェースを有し、計算機ディスプレイ上で、ラットをばく露ボックス内任意の位置に、任意の角度（0°～90°）で配置することが可能である。

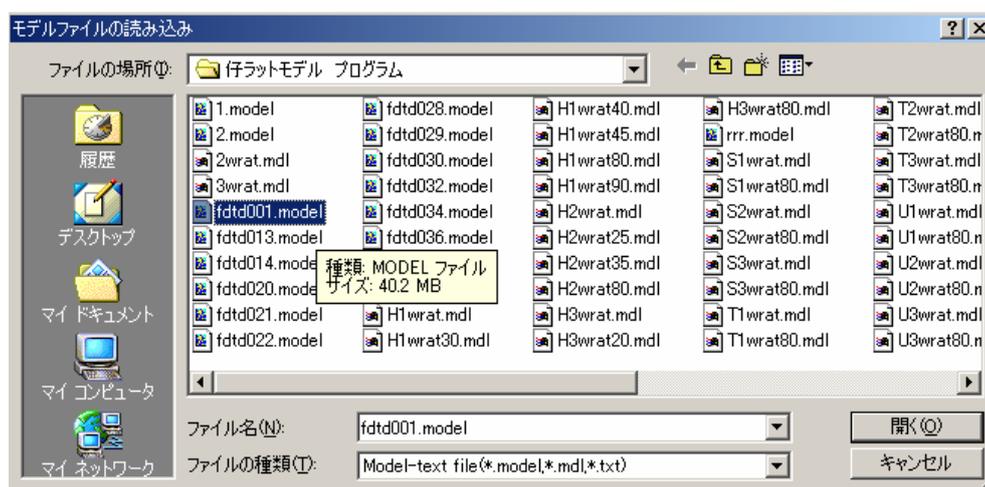
以下に、MEDIT Lite の概要を示す。

(1) モデルの読み込み

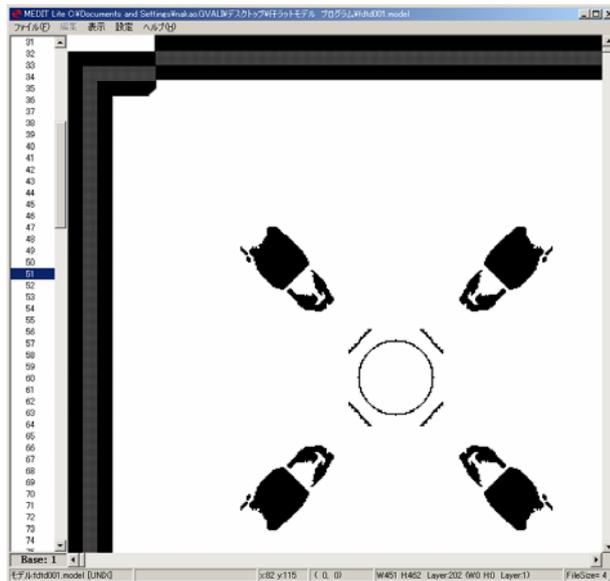
まず、ベースとなるばく露箱モデルを読み込む。以下の画面に従い、モデル読み込みを行う。



例では「fddd001.model」というばく露箱モデルをベースとする。



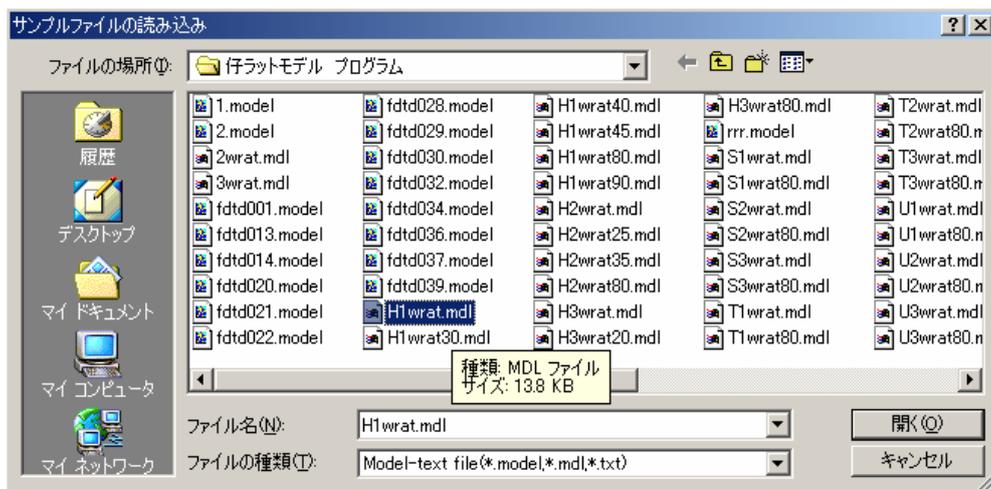
それを選択すると、以下の画面のように表示され、この例では母ラットも配置されている。



そこで、表示モデルが正しく表示されていれば、次に挿入されるラットモデルの読み込みを行う。以下の画面のように従い、挿入させるラットモデル（サンプルモデル）を読み込む。



例では挿入させるラットモデルは「H1wrat.mdl」という仔ラットモデルを用いる。



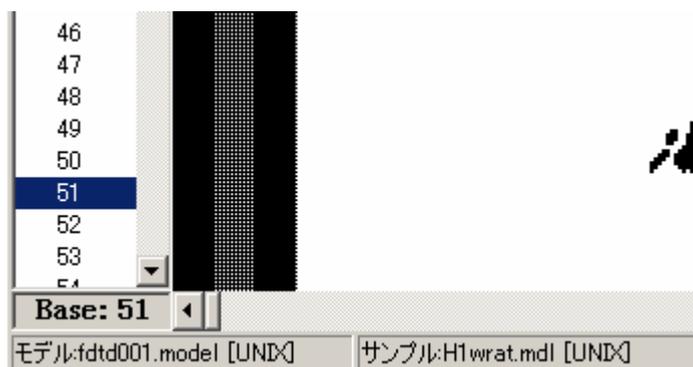
それを選択し、画面に従い読み込みを行う。

これでベースモデル、挿入するラットモデルの読み込みを完了する。

(2) モデルの挿入

まず、ベースモデルのどの階層にラットモデルを挿入するかを設定する。

その際、モデル表示画面左側に階層数を表示させているので、ベース階層にしたい階層数のところで右クリックをすると、ベース階層の設定を行うことができる。以下の画面のように、ベース階層の数が「Base:」のところに表示される。例では「Base:51」なのでベース階層は「51」となる。



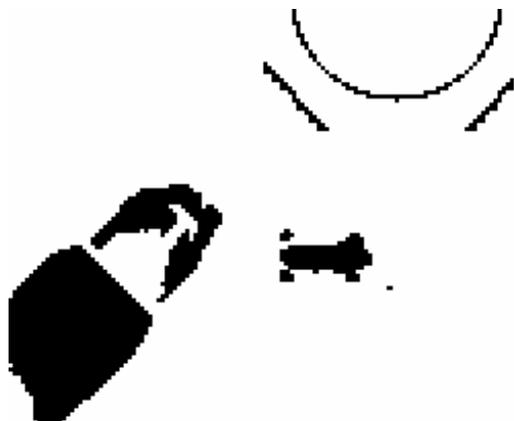
この際、「Base」の下に、ベースモデル名、ラットモデル名が表示されているので確認することができる。

次に、モデル表示画面上で左クリックを押すと、ラットモデルを画面上に表示させることができる。この際、黒く表示されているところがこの階層で挿入される部分で、赤く表示されている部分がラットモデル全体部分となる。

挿入させたい場所で左クリックを押して表示させる。また、この時に右クリックにより、ラットモデルの配置をロックすることができるので、ロックさせて「貼り付け」を行う。



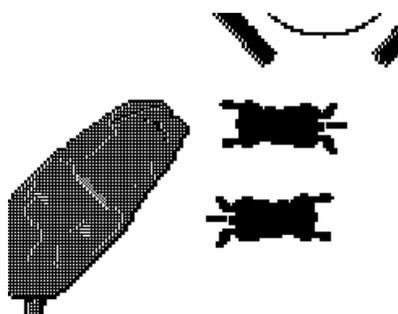
「貼り付け」を行うと、赤く表示されていた部分が消え、この階層に挿入された黒い部分のみの表示となる。他の階層を見ても黒く挿入されている。



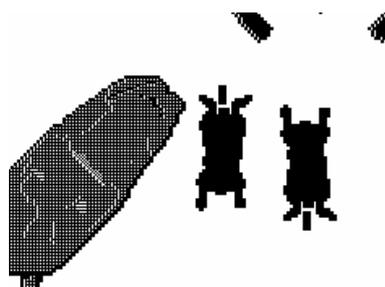
(3) モデルの編集

モデルを貼り付ける際、貼り付け以外に「左右反転」、「上下反転」、「回転」のコマンドがあるが、この3つのコマンドはラットモデルの向きを変更するコマンドである。

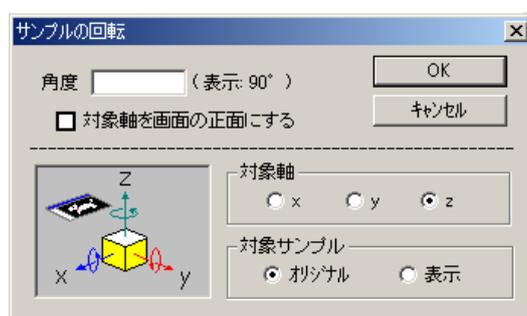
「左右反転」は言葉の通り、ラットモデルを左右反転させる。以下の画面では、上部の仔モデルに対し、下部の仔モデルが左右反転させたものである。



「上下反転」は言葉の通り、ラットモデルを上下反転させる。以下の画面では、上部の仔ラットモデルに対し、下部の仔ラットモデルが上下反転させたものである。

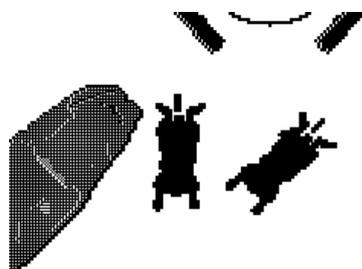


「回転」は言葉の通り、ラットモデルを回転させるコマンドである。「回転」を選択すると、以下の画面が出る。



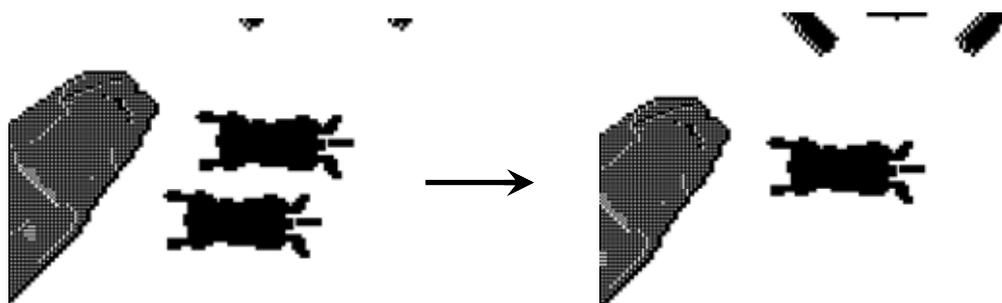
ここで回転させる角度を入力でき、また回転させる対象軸も選択することができる。(表示: 90) は、現段階でのラットモデルの回転角度を示している。

z 軸を選択すると平面上での回転を可能にし、x 軸、y 軸を選択することでラットモデルを起こすことができ、より立体的なモデル挿入が可能となる。以下の画面では「z 軸選択、角度 90」と「z 軸選択、角度 45」を画面に表示したものである。



また、表示サイズを変更することができる。

また、「元に戻す」というコマンドがあるが、これも言葉のように、1つ前に挿入したラットモデルをやり直すことができる。以下の画面では、2つの仔ラットモデルを表示したが、下のものを「元に戻す」により、消した状態を表す。



以上のように、ラットをばく露装置内の任意位置に、任意角度で配置できる。

2. ラット行動パターンに基づく SAR

ばく露期間中のラット SAR を高精度で評価を行うために、ラットのばく露装置内での行動パターンの把握が不可欠である。そこで、予備データとして、ラットがばく露箱内に置かれたときの妊娠中、離乳前及び離乳後の行動を昼間は WEB カメラ、夜間は赤外線カメラまたデジタルビデオのナイトモードで記録した。観測時間は 1 日 20 時間とし、10 分ごとに記録を行った。そして、このデータを元に、ラットのばく露箱内での行動パターンを抽出した。即ち、各ケージを図 15 に示すように、A~I の九つの領域に分け、ラットの各領域における確率を求めた。

(1) ラット妊娠中の SAR

各妊娠週齢それぞれに対して計 100 枚に上る写真を元に、妊娠ラットの位置同定を行い、そのヒストグラムを妊娠 1 週間を図 16、2 週間を図 17、3 週間を図 18 に示す。なお、図中の縦軸は等時間間隔で取った総写真枚数に対する割合を表す。図より、ラットはいずれの妊娠週齢においても、ケージの G か D の位置に長くいることがわかる。

各ケージを A~I の九つの領域に分け、妊娠 7 日間、16 日間及び胎児の各領域にいるときの全身平均 SAR を計算した。図 19 に各領域に配置したときの全身平均 SAR 値を示す。なお、アンテナ入力電力は 1 W とした。

妊娠ラットの活動パターンをみると、ラットは A~I の領域に均等にいるわけではない。特にケージの G か D の位置にいる時間が長く、それ故に全ばく露期間中の全身平均 SAR の算出に際し、それを考慮する必要がある。本研究では、各領域での SAR 値に滞在時間で重み付けすることにより全身平均 SAR を求めた。即ち

$$\begin{aligned} SAR = & w_A SAR_A + w_B SAR_B + w_C SAR_C + w_D SAR_D \\ & + w_E SAR_E + w_F SAR_F + w_G SAR_G \\ & + w_H SAR_H + w_I SAR_I \end{aligned}$$

である。但し、各重み付け係数の和は 1 であり、それを活動パターンの分類結果から得る。表 4 に妊娠 7 日間と 16 日間のときの各領域における重み付け値を示す。これにより算出した妊娠 7 日間、16 日間及び胎児の全身平均 SAR は図 20 に示す。

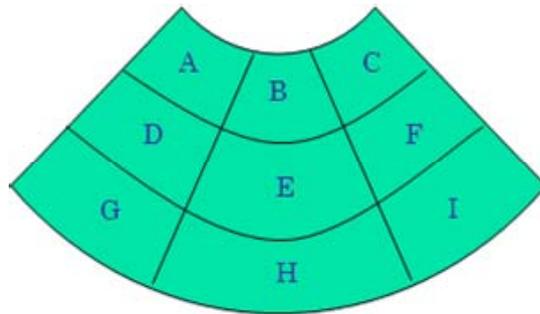


図 15 各ケージを A~I の九つの小領域への分け方

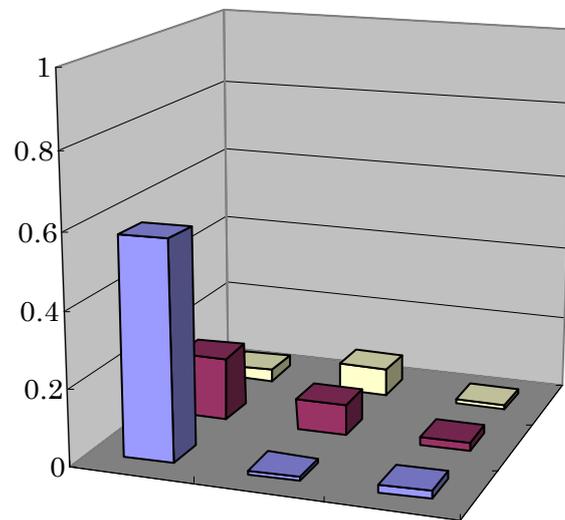


図 16 妊娠 1 週間ラットのケージ内位置のヒストグラム

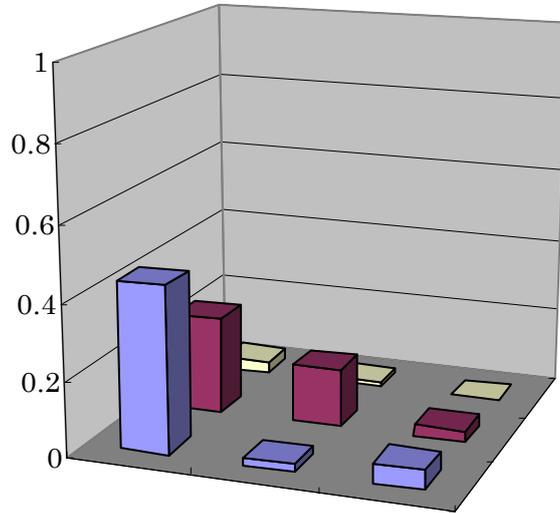


図 17 妊娠 2 週間ラットのケージ内位置のヒストグラム

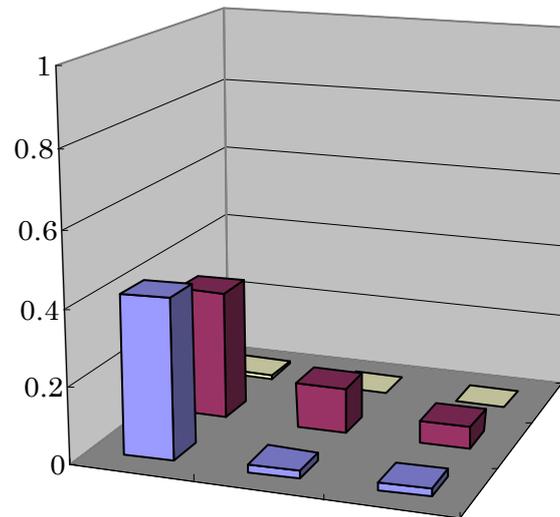


図 18 妊娠 3 週間ラットのケージ内位置のヒストグラム

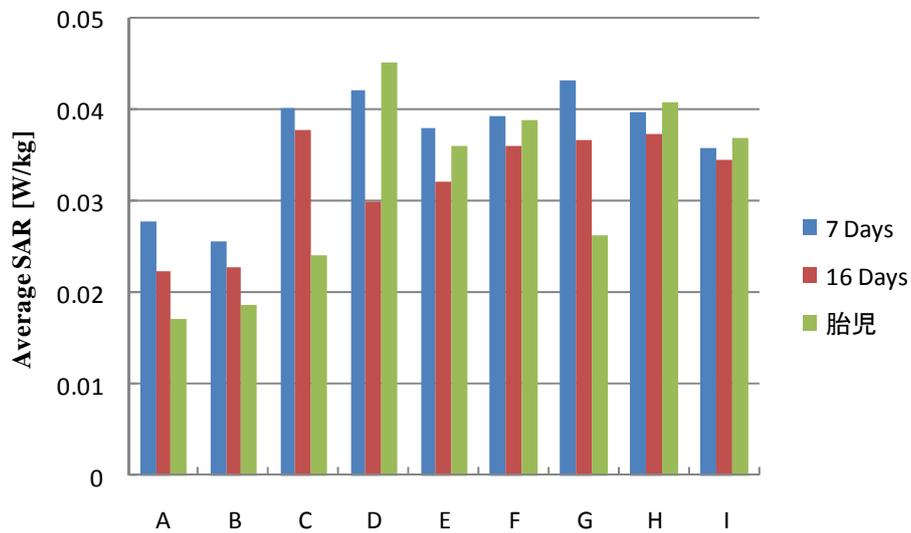


図 19 妊娠ラットが各領域に配置したときの全身平均 SAR

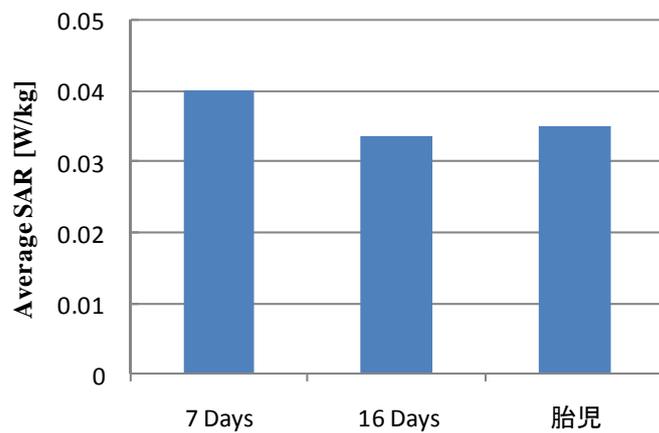


図 20 妊娠ラットの活動パターンを考慮した全身平均 SAR
(アンテナ入力：1 W)

表 4 各領域の重み付け係数

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
7D	0.03	0.07	0.01	0.17	0.08	0.02	0.58	0.01	0.02
16D	0.01	0.00	0.00	0.34	0.12	0.06	0.43	0.02	0.02

さらに、妊娠 16 日間を例として、ラット活動パターンを考慮したときの全身平均 SAR のヒストグラム及び累積分布を図 21 に示す。図からわかるように、ラット SAR の変動は正規分布特性を有せず、平均値、最大頻度値及び 50%累積分布値に対応する中央値はそれぞれ異なっている。但し、標準偏差 σ は 0.4W/kg の胎児平均 SAR に対して約 0.079W/kg であり、平均 SAR 値に対する変動は 3 σ まで考えればほぼ $\pm 60\%$ 以内に抑えられていることがわかる。

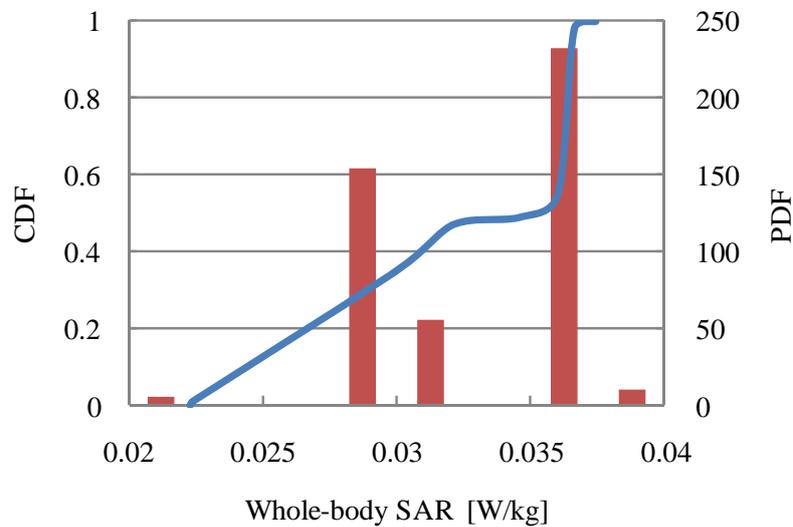


図 21 ラット活動パターンを考慮した全身平均 SAR のヒストグラムと累積分布

(2) 仔ラット出生直後の SAR

母ラット出産後、各ケージに母ラット1匹と仔ラット8匹が同時にばく露される。各週齢において計100枚に上る写真に対する解析結果により、出生後1週間、2週間の初期段階では、仔ラットらは集団で母ラットの近辺に集中し、出生後3週間になると、仔ラットらは各自動き回り、必ずしも母ラットのそばに集まらない傾向である。母ラット及び仔ラットの位置同定によりまとめたヒストグラムを図22~24に示す。図中の縦軸は等時間間隔で取った総写真枚数に対する割合を表す。図より、母ラットはC、D、G、Iにいるケースが多く、仔ラットは出生1週目、2週目のときに殆どDかGに位置するが、3週目になると、ばらばらで活動するケースは半分以上になる。

出生後の仔ラットは1週齢から3週齢までは母ラットと仔ラット8匹が同じケージで生活する。ラットの活動パターンをみると、母ラットはC、D、Gにいる時間が長く、仔ラットは出生1週目、2週目のときに殆どDかGに固まり、3週目になると、ばらばらで活動する確率は半分以上にも上る。

表5は、仔ラット出生後1週目の活動パターンより求めた各領域の重み付け係数である。母ラットは概ね領域C、D、Gのいずれかにいる。

表5 1週齢ラットの各領域での重み付け係数

領域	仔A	仔B	仔C	仔D	仔E	仔F	仔G	仔H	仔I
母C	0.00	0.00	0.00	0.56	0.00	0.00	0.44	0.00	0.00
母D	0.04	0.00	0.00	0.78	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00
母G	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.95	0.00	0.00

母ラットが領域C、D、Gにいる確率を1/3ずつとし、ラットの活動パターンを考慮した全身平均SARは次式

$$SAR = \frac{1}{3} \left(\sum_{n=A}^I w_{Cn} SAR_{Cn} + \sum_{n=A}^I w_{Dn} SAR_{Dn} + \sum_{n=A}^I w_{Gn} SAR_{Gn} \right)$$

より計算できる。各小領域にラットを配置したときの全身平均SAR値を上式に代入することで、出生1週間のラット活動パターンを考慮した全身平均SARが求まる。その結果を図25にまとめて示す。

表6は、仔ラット出生後2週目の活動パターンより求めた各領域の重み付け係数である。このとき、母ラットは概ね領域 D、G、I のいずれかにいるが、仔ラットは母ラット近辺に集中する場合とばらばらになる場合の両方がある。表6の上段は母ラットが D、G、I にいるときの仔ラットが集団になるかならないかの割合、下段は仔ラットが集団になったときの各領域にいる確率を表している。これらの重み付け係数を用いて、ラット全身平均 SAR は次のように求める。

$$SAR = (0.24SAR_{D1} + 0.21SAR_{D2}) + (0.22SAR_{G1} + 0.10SAR_{D2}) + (0.13SAR_{I1} + 0.10SAR_{I2})$$

ここで、 SAR_{m1} は仔ラットが集中するときの全身平均 SAR、 SAR_{m2} は仔ラットがばらばらのときの全身平均 SAR であり、 $m=D、G、I$ である。また、

$$SAR_{m1} = \sum_{n=A}^I w_n SAR_n$$

である。

表6 2週齢ラットの各領域での重み付け係数

領域	仔・集中	仔・ばらばら
母 D	0.24	0.21
母 G	0.22	0.10
母 I	0.13	0.10

仔・集中時：

領域	仔 A	仔 B	仔 C	仔 D	仔 E	仔 F	仔 G	仔 H	仔 I
母 D	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.31	0.06	0.00	0.13
母 G	0.00	0.00	0.00	0.30	0.17	0.00	0.10	0.43	0.00
母 I	0.00	0.00	0.00	0.50	0.32	0.00	0.00	0.00	0.17

各小領域にラットを配置したときの全身平均 SAR 値を上式に代入することで、出生2週間のラット活動パターンを考慮した全身平均 SAR が求まる。その結果も図 25 にまとめて示す。

表7は、仔ラット出生後3週目の活動パターンより求めた各領域の重み付け係数である。このとき、母ラットは概ね領域 A、D、G、I のいずれかにいるが、仔ラットは母ラット近辺に集中するよりばらばらになるケースが多い。つまり、母ラットが領域 D

と I にいるとき以外、仔ラットは殆ど独自で動き、ばらばらになっている。なお、表 7 の上段は母ラットが A、D、G、I にいるときの仔ラットが集団になるかならないかの割合、下段は仔ラットが集団になったときの各領域にいる確率を表している。

表 7 3 週齢ラットの各領域での重み付け係数

領域	仔・集中	仔・ばらばら
母 A	0.04	0.27
母 D	0.17	0.18
母 G	0.01	0.14
母 I	0.11	0.08

仔・集中時：

領域	仔 A	仔 B	仔 C	仔 D	仔 E	仔 F	仔 G	仔 H	仔 I
母 D	0.00	0.00	0.09	0.73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18
母 I	0.10	0.20	0.00	0.10	0.20	0.00	0.00	0.10	0.30

これらの重み付け係数を用いて、ラット全身平均 SAR は次のように求まる。

$$SAR = 0.28SAR_{A2} + (0.20SAR_{D1} + 0.18SAR_{D2}) \\ + 0.15SAR_{G2} + (0.11SAR_{I1} + 0.08SAR_{I2})$$

ここで、 SAR_{m1} は仔ラットが集中するときの全身平均 SAR、 SAR_{m2} は仔ラットがばらばらのときの全身平均 SAR であり、 $m=A、D、G、I$ である。また、

$$SAR_{m1} = \sum_{n=A}^I w_n SAR_n$$

である。

各小領域にラットを配置したときの全身平均 SAR 値を上式に代入することで、出生 3 週間のラット活動パターンを考慮した全身平均 SAR が求まる。その結果も図 25 にまとめて示す。

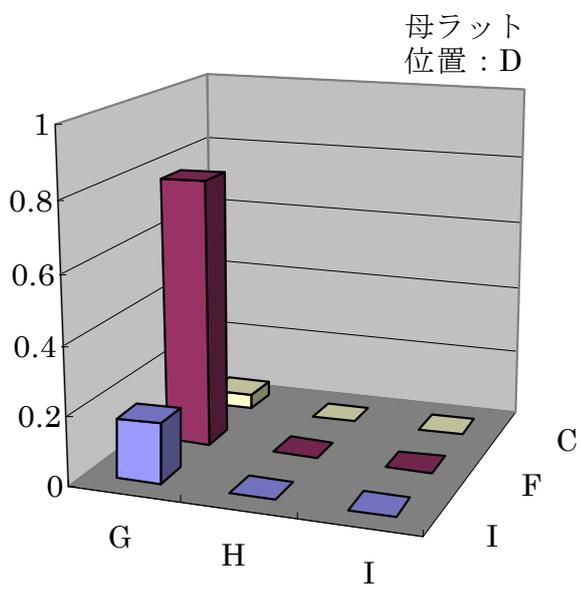
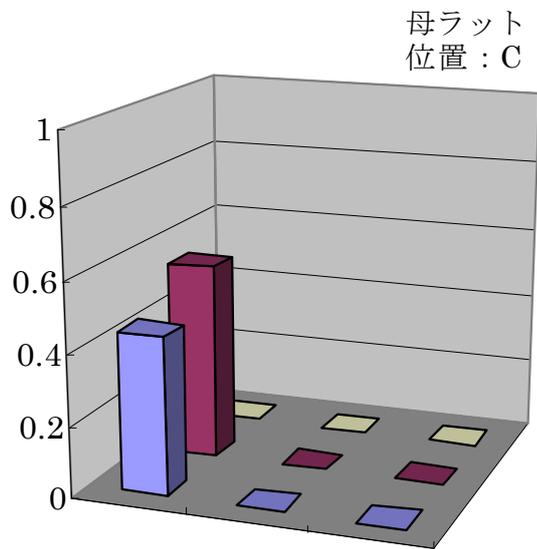


図 22 出生 1 週間仔ラットのばく露箱内位置のヒストグラム例

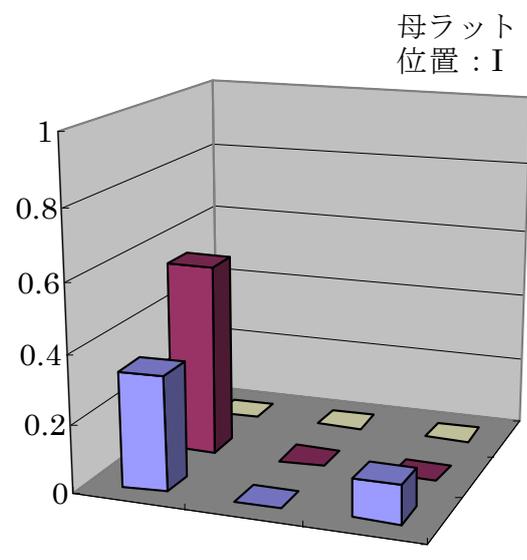
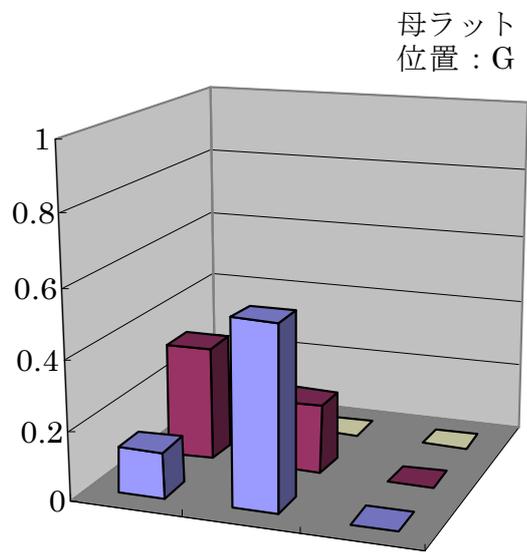


図 23 出生 2 週間仔ラットのばく露箱内位置のヒストグラム例

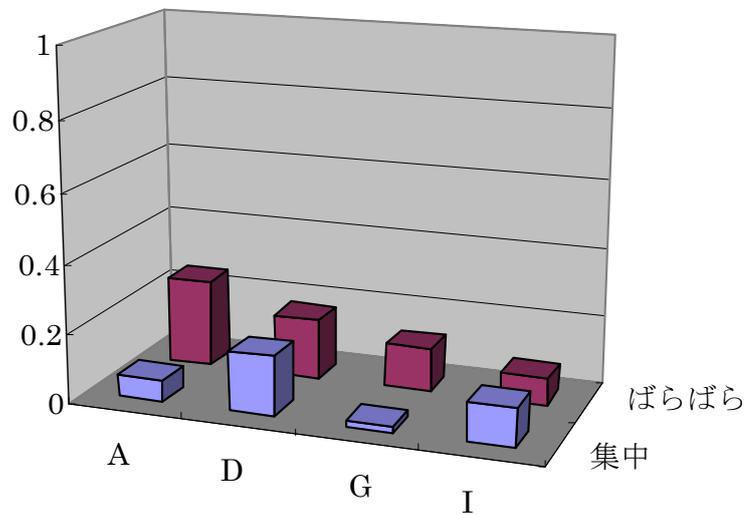


図 24 出生3週間仔ラットのばく露箱内様子のヒストグラム例

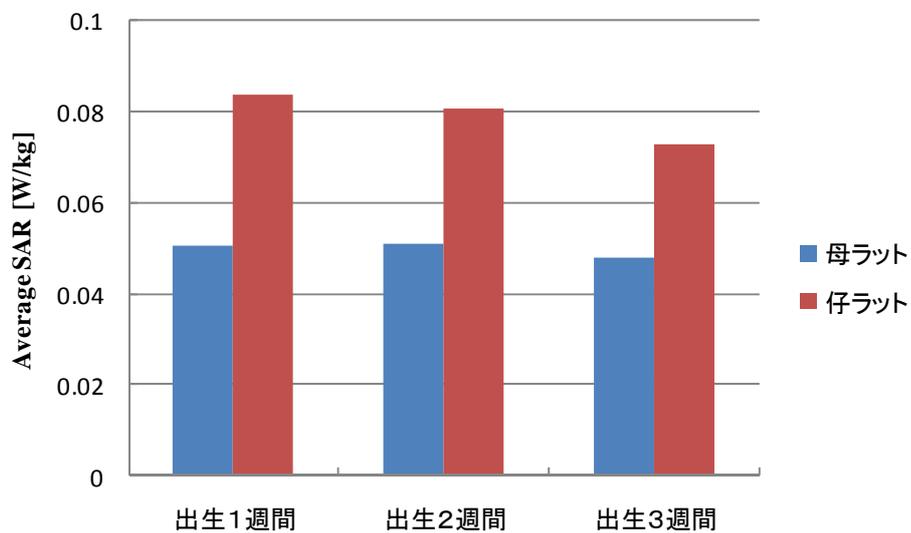


図 25 ラット活動パターンを考慮した全身平均 SAR
(アンテナ入力：1 W)

さらに、出生2週間の仔ラットを例として、ラット活動パターンを考慮したときの全身平均 SAR のヒストグラム及び累積分布を図 26 に示す。図からわかるように、ラット SAR の変動は正規分布特性を有せず、平均値、最大頻度値及び 50%累積分布値に対応する中央値はそれぞれ異なっている。但し、0.4W/kg の仔ラット平均 SAR に対して標準偏差 σ は約 0.063W/kg であり、平均 SAR 値に対する変動は 3σ まで考えればほぼ $\pm 50\%$ 以内に抑えていることがわかる。

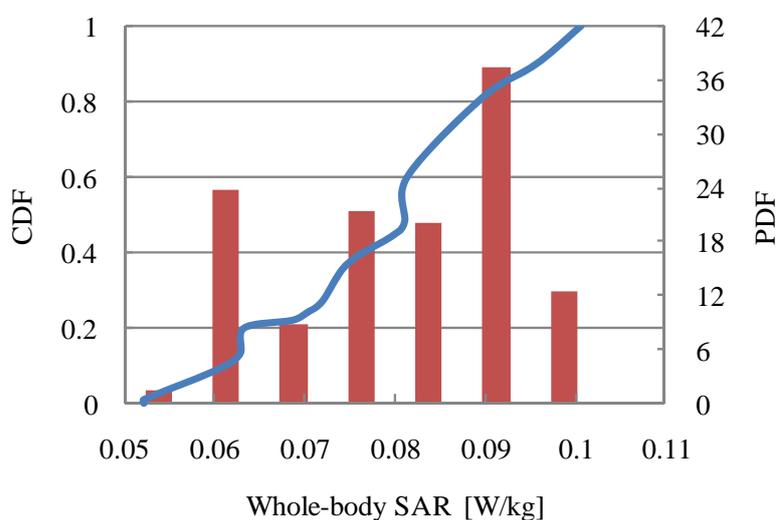


図 26 活動パターンを考慮した離乳前仔ラット全身平均 SAR のヒストグラムと累積分布

(3) 仔ラット離乳後の SAR

仔ラット離乳後、各ケージに仔ラットだけ4匹が配置されておく露される。各週齢において計100枚に上る写真に対する解析結果により、仔ラット離乳後の活動パターンは4匹で集団になるケース、3匹と1匹に分けるケース、及び2匹ずつ分けるケースに分類できる。仔ラットの位置を同定することによりまとめたヒストグラムの一例を図27に示す。図中の縦軸は等時間間隔で取った総写真枚数に対する割合を表す。解析の結果、出生4週間のときに、仔ラットが4匹で集まるケースと分かれるケースはほぼ半々であるが、5週間・6週間になると、分かれるケースが多くなり、4匹、3+1匹、2匹ずつの確率はほぼ同じである。また、仔ラットのケージ内での位置は、D、E、Gのいずれかになるのが一般的である。仔ラット出生後4～6週目の活動パターンが似ていることに注目し、それらのデータの一括処理により、仔ラットのケージ各領域における重み付け係数を導出した。表8にその結果を示す。

表8 4～6週齢ラットの各領域での重み付け係数

4匹集中	3匹+1匹	2匹+2匹
0.41	0.38	0.21

A	B	C	D	E	F	G	H	I
0.01	0.03	0.03	0.25	0.28	0.03	0.35	0.00	0.02

表8から、仔ラットはケージの中で主に領域D、E、Gにいることがわかる。これを元に、4匹集中時、3匹と1匹に分けるととき及び2匹と2匹に分けるときの3つの組み合わせについて、仔ラット数値モデルを制作し、仔ラットが領域D、E、Gにいるときの全身平均を求めた。

仔ラットの活動パターンを考慮したSAR値は、表8の重み付け係数から、次式

$$SAR = w_{m1} \sum_{n=A}^I w_n SAR_n + w_{m2} \sum_{n=A}^I w_n SAR_n + w_{m3} \sum_{n=A}^I w_n SAR_n$$

により求め、その結果は1Wのアンテナ入力に対して0.055W/kgである。ここで、 w_{m1} は4匹集中の重み付け係数、 w_{m2} は3匹と1匹に分かれるときの重み付け係数、 w_{m3} は

2匹と2匹に分かれるときの重み付け係数であり、 w_n と SAR_n はそれぞれケージ各領域の重み付け係数と仔ラット平均 SAR である。

さらに、出生5週間の仔ラットを例として、ラット活動パターンを考慮したときの全身平均 SAR のヒストグラム及び累積分布を図 28 に示す。図からわかるように、ラット SAR の変動は他の時期に比べて正規分布の特性にやや近くなるが、平均値、最大頻度値及び 50%累積分布値に対応する中央値はやはりそれぞれ異なっている。但し、0.4W/kg の仔ラット平均 SAR に対して標準偏差 σ は約 0.041W/kg%であり、平均 SAR 値に対する変動は3 σ まで考えればほぼ $\pm 30\%$ 以内に抑えていることがわかる。

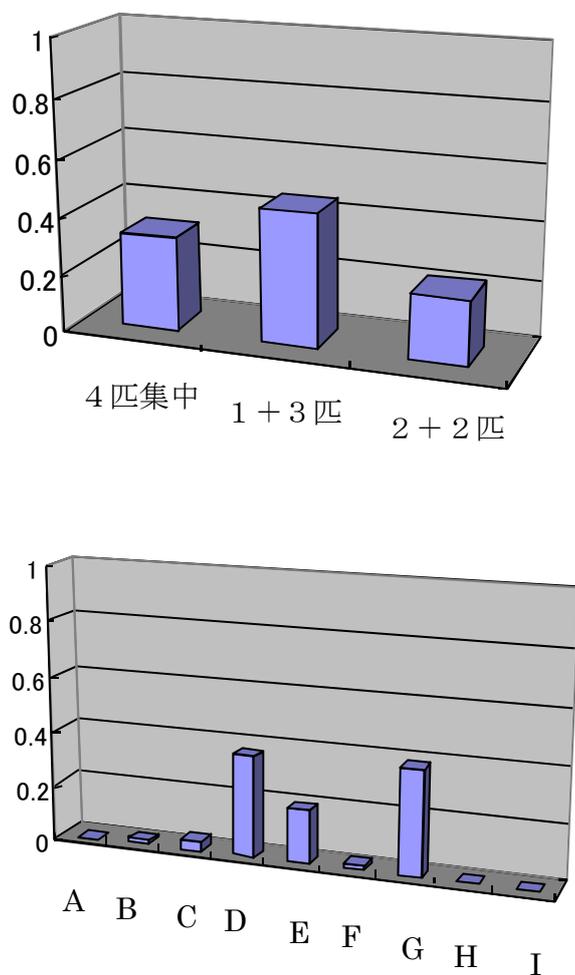


図 27 離乳後仔ラットのばく露箱内位置のヒストグラム例

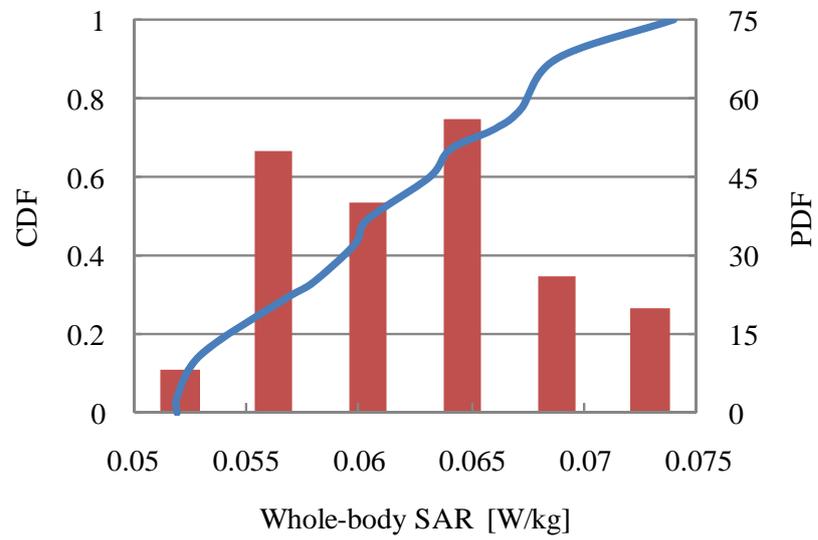


図 28 活動パターンを考慮した離乳後仔ラット全身平均 SAR のヒストグラムと累積分布

(4) 各ばく露時期の SAR のまとめ

以上のように、ラットのばく露箱内での活動パターンの記録写真を分類し、それに基づく電磁界シミュレーションによりばく露条件下でのラット全身平均 SAR を統計的に明らかにした。その SAR の統計平均値と標準偏差の結果を妊娠期、離乳前、離乳後それぞれについて表9にまとめて示す。また、そのときに必要とされるアンテナへの入力電力も示している。これらの結果から、本ばく露システムは、人体安全指針値の0.4 W/kg のばく露をラットに実現できたことと、SAR 変動がいずれも±60%以内に抑えられていること、それ故に仕様通りの特性が得られていることがわかる。

表9 ラット SAR の統計平均値と標準偏差

		平均SAR [W/kg]	標準偏差 σ [W/kg]	$\pm 3\sigma$ / 平均	所要電力 [W]
Phase 1	母ラット	0.38	0.079	$\pm 59.3\%$	11.43
	胎児	0.4			11.43
Phase 2	母ラット	0.25	0.063	$\pm 47.3\%$	4.94
	離乳前仔ラット	0.4			4.94
Phase 3	離乳後仔ラット	0.4	0.041	$\pm 30.8\%$	6.42

VII ばく露システムの試運転結果

開発されたばく露システム全体を組み立て、試運転を実施し、その動作及び性能を検査した。図 29 にばく露システム全体の接続を示す。

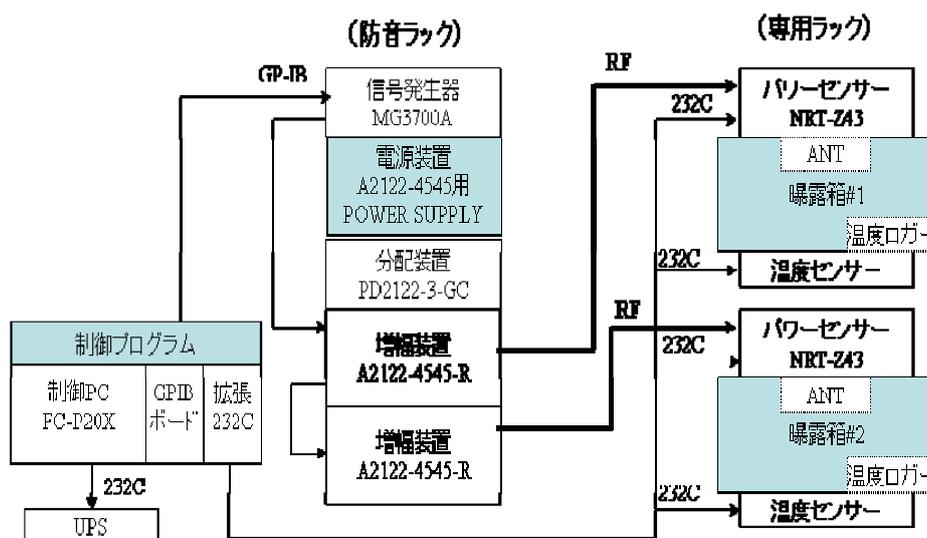


図 29 ばく露システム全体の組立

1. 分配装置の特性

図 30 に信号発生器からの入力信号が分配装置によって 2 分岐された出力信号の電力スペクトル波形を示す。図から、それぞれの出力が同等であり、分配装置が動作していることが確認できた。

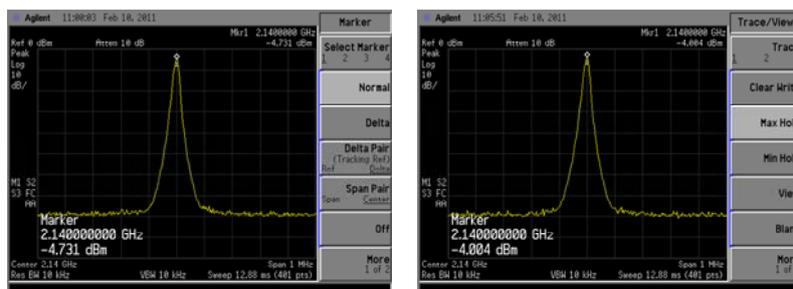


図 30 分配装置によって 2 分岐された出力信号の電力スペクトル

2. 増幅装置の特性

図 31 に 2 台の増幅装置の入力信号に対する増幅後の電力スペクトル波形、図 32 に増幅設定値に対する出力（アンテナへの入力電力）の特性を示す。図 32 から、両者は良好な線形特性で対応し、設定通りに動作しているが確認できた。

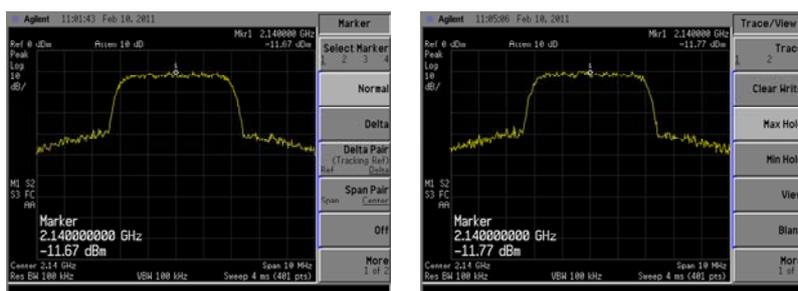


図 31 2 台の増幅装置の入力信号に対する増幅後の電力スペクトル

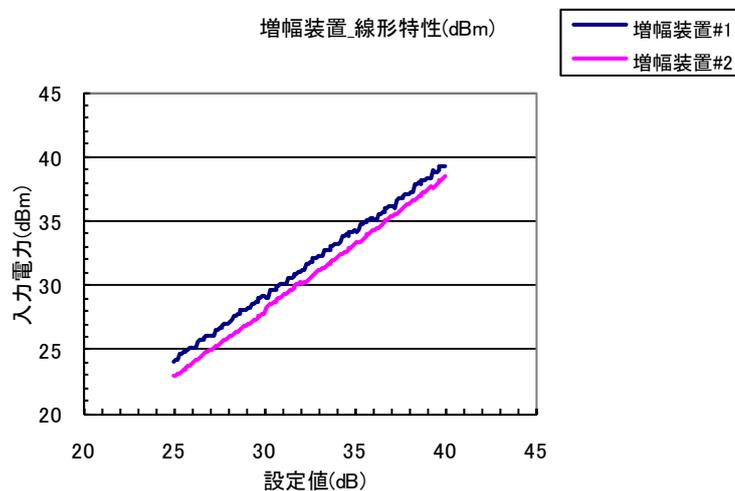


図 32 増幅設定値に対する出力（アンテナへの入力電力）特性

3. ばく露箱のシールド性能

運行中の電力漏洩を遮蔽するためのばく露箱のシールド性能を図 33 の配置で行った。その測定結果を表 10 に示す。表から、2GHz 帯においては、箱前面で 46dB 以上、上部で 36dB 以上のシールド性能を有することがわかり、漏洩電力の遮蔽には十分であることが確認できた。

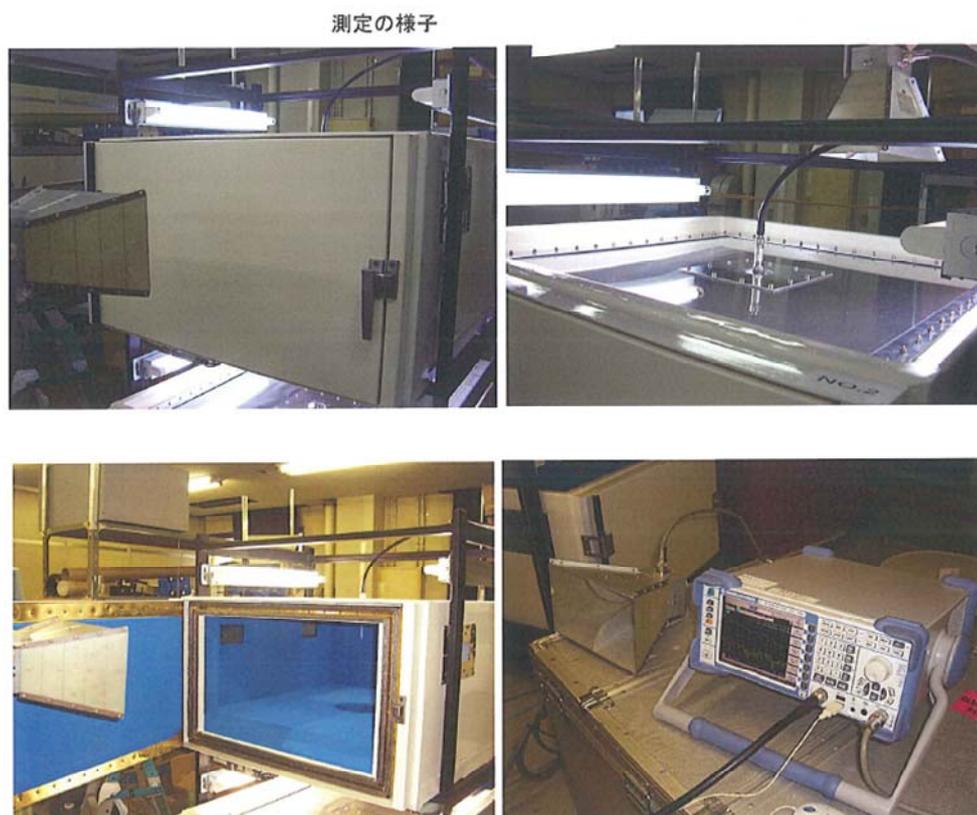


図 33 ばく露箱のシールド性能測定の様子

表 10 ばく露箱シールド性能の測定結果

測定結果	周波数	周波数: MHz単位								判定
		シールド性能 (dB)								
	周波数	800	1000	2000	2100	2500	2600	5000	5200	
#1	①扉側	45	35	50	53	53	43	41	45	良
	②上部	33	31	36	37	44	44	32	35	良
#2	①扉側	42	48	46	44	42	46	33	49	良
	②上部	37	40	40	40	42	40	33	32	良

4. 制御ソフトウェアの動作

本ばく露システム全体を制御するソフトウェアは、

- 照射処理の開始・停止を制御する測定機能
- 日付・実験別ラット配置スケジュール・ばく露レベルスケジュール・ラットグループのデータの表示を行うスケジュール機能
- 電力増幅器・パワーセンサ・温度センサの各データのモニター結果を表示するモニター機能
- 信号発生器・モニター時間スケジュール・装置状況スケジュールの設定を行うパラメータ設定機能
- 日付選択でデータファイルの表示を行うファイル機能
- 各グループのばく露レベル設定を行うばく露レベル設定機能

などから構成されている。図 34 に本制御ソフトウェアのメイン画面、図 35 に制御ソフトウェアのスケジュール画面、図 36 に制御ソフトウェアのパラメータ設定画面、図 37 に制御ソフトウェアのばく露レベル管理画面の動作例を示す。システム全体は、制御ソフトウェアの制御に従い動作することが確認できた。

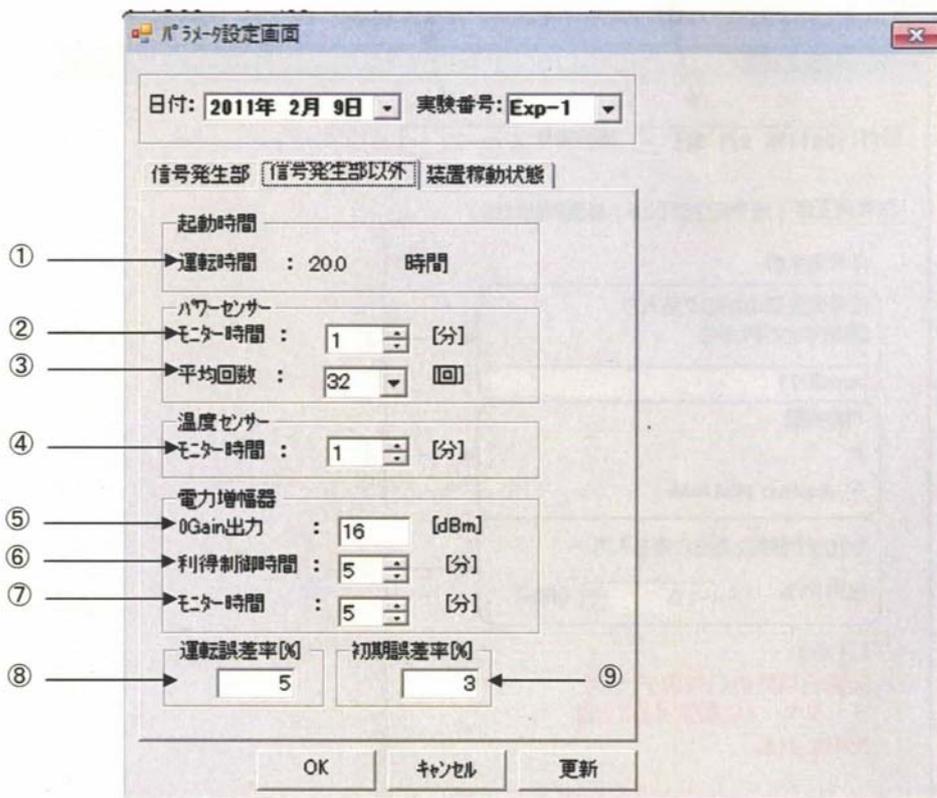
画面名称	Main 画面																											
内容	各画面の呼び出し処理・ソフトウェア全体の終了処理を行う。																											
画像イメージ																												
機能説明	<table border="1"> <thead> <tr> <th>番号</th> <th>GUI</th> <th>機能</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>①</td> <td>実験日</td> <td>照射実験を行う日付を選択します。</td> </tr> <tr> <td>②</td> <td>測定</td> <td>測定画面を開きます。 P4.参照</td> </tr> <tr> <td>③</td> <td>スケジュール</td> <td>スケジュール画面を開きます。 P5.参照</td> </tr> <tr> <td>④</td> <td>モニター</td> <td>モニター画面を開きます。 P6.参照</td> </tr> <tr> <td>⑤</td> <td>ファイル</td> <td>ファイル画面を開きます。 P10.参照</td> </tr> <tr> <td>⑥</td> <td>パラメータ設定</td> <td>パラメータ設定画面を開きます。</td> </tr> <tr> <td>⑦</td> <td>管理者</td> <td>管理者用ログイン画面を開きます。</td> </tr> <tr> <td>⑧</td> <td>終了</td> <td>本ソフトを終了します。 *ウインドウ右上の「×」では終了しません。</td> </tr> </tbody> </table>	番号	GUI	機能	①	実験日	照射実験を行う日付を選択します。	②	測定	測定画面を開きます。 P4.参照	③	スケジュール	スケジュール画面を開きます。 P5.参照	④	モニター	モニター画面を開きます。 P6.参照	⑤	ファイル	ファイル画面を開きます。 P10.参照	⑥	パラメータ設定	パラメータ設定画面を開きます。	⑦	管理者	管理者用ログイン画面を開きます。	⑧	終了	本ソフトを終了します。 *ウインドウ右上の「×」では終了しません。
番号	GUI	機能																										
①	実験日	照射実験を行う日付を選択します。																										
②	測定	測定画面を開きます。 P4.参照																										
③	スケジュール	スケジュール画面を開きます。 P5.参照																										
④	モニター	モニター画面を開きます。 P6.参照																										
⑤	ファイル	ファイル画面を開きます。 P10.参照																										
⑥	パラメータ設定	パラメータ設定画面を開きます。																										
⑦	管理者	管理者用ログイン画面を開きます。																										
⑧	終了	本ソフトを終了します。 *ウインドウ右上の「×」では終了しません。																										

図 34 制御ソフトウェアのメイン画面

画面名称	スケジュール画面																		
内容	日付別のラット配置スケジュール/曝露レベルスケジュール/ラットグループデータを表示します。																		
画像イメージ																			
機能説明	<table border="1"> <thead> <tr> <th>番号</th> <th>GUI</th> <th>機能</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>①</td> <td>カレンダー</td> <td>照射実験日程を選択します。</td> </tr> <tr> <td>②</td> <td>Dev_Schedule</td> <td>照射グループを色分けして表示します。 SHAM=水色・高曝露=紫</td> </tr> <tr> <td>③</td> <td>曝露レベル</td> <td>各グループの照射レベルを表示します。また、グループを色分けして表示します。</td> </tr> <tr> <td>④</td> <td>Rat:Group Data</td> <td>ラットグループデータを表示します。</td> </tr> <tr> <td>⑤</td> <td>閉じる</td> <td>スケジュール画面を閉じます。</td> </tr> </tbody> </table>	番号	GUI	機能	①	カレンダー	照射実験日程を選択します。	②	Dev_Schedule	照射グループを色分けして表示します。 SHAM=水色・高曝露=紫	③	曝露レベル	各グループの照射レベルを表示します。また、グループを色分けして表示します。	④	Rat:Group Data	ラットグループデータを表示します。	⑤	閉じる	スケジュール画面を閉じます。
番号	GUI	機能																	
①	カレンダー	照射実験日程を選択します。																	
②	Dev_Schedule	照射グループを色分けして表示します。 SHAM=水色・高曝露=紫																	
③	曝露レベル	各グループの照射レベルを表示します。また、グループを色分けして表示します。																	
④	Rat:Group Data	ラットグループデータを表示します。																	
⑤	閉じる	スケジュール画面を閉じます。																	

図 35 制御ソフトウェアのスケジュール画面

画面名称	パラメータ設定画面 / 信号発生部以外
内容	電力増幅器、パワーメーターの設定を行います。
画像イメージ	



機能説明

番号	GUI	機能
①	運転時間	照射運転の時間を表示します。本実験では20時間の照射を行います。(変更は測定画面から行ってください。)
②	モニター時間	パワーセンサーのモニターする時間間隔を設定します。初期値[5分]
③	平均回数	パワーセンサーのアベレージ回数を設定します。初期値[32回]
④	モニター時間	温度センサーのモニターする時間間隔を設定します。初期値[5分]
⑤	0Gain 出力	電力増幅器に"00"の設定を行ったときの出力レベルを設定します。初期値「16」
⑥	利得制御時間	電力増幅器の利得調整を行う時間間隔を設定します。初期値[5分]
⑦	モニター時間	電力増幅器をモニターする時間間隔を設定します。初期値[5分]
⑧	運転誤差率	照射運転中に利得制御を行った場合の収束目標誤差率を設定します。初期値[5%]
⑨	初期誤差率	運転初期化時に、利得設定収束目標誤差率を設定します。初期化誤差率内に収束しなかった場合は、運転誤差率を目標に収束します。初期値[3%]

*パラメータ設定の変更を行うときのみ[OK]または[更新]ボタンをクリックしてください。確認のみで、変更しない場合は[キャンセル]をクリックしてください。

図 36 制御ソフトウェアのパラメータ設定画面

画面名称	データベース画面 / 曝露レベルスケジュール																			
内容	曝露レベルスケジュールの確認および変更を行います。																			
画像イメージ																				
機能説明	<table border="1"> <thead> <tr> <th>番号</th> <th>GUI</th> <th>機能</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>①</td> <td>Date</td> <td>照射実験日の日付を表示します。</td> </tr> <tr> <td>②</td> <td>Lev_ID</td> <td>照射レベル ID を表示します。</td> </tr> <tr> <td>③</td> <td>Weight</td> <td>ラットの体重(本システムでは使用しません)</td> </tr> <tr> <td>④</td> <td>Ant_W</td> <td>照射レベル 単位[W]</td> </tr> <tr> <td>⑤</td> <td>Ant_dbm</td> <td>照射レベル 単位[dBm]</td> </tr> </tbody> </table>		番号	GUI	機能	①	Date	照射実験日の日付を表示します。	②	Lev_ID	照射レベル ID を表示します。	③	Weight	ラットの体重(本システムでは使用しません)	④	Ant_W	照射レベル 単位[W]	⑤	Ant_dbm	照射レベル 単位[dBm]
番号	GUI	機能																		
①	Date	照射実験日の日付を表示します。																		
②	Lev_ID	照射レベル ID を表示します。																		
③	Weight	ラットの体重(本システムでは使用しません)																		
④	Ant_W	照射レベル 単位[W]																		
⑤	Ant_dbm	照射レベル 単位[dBm]																		

図 37 制御ソフトウェアのばく露レベル管理画面

VIII まとめ

携帯電話基地局の高周波電磁界による生体免疫システムへの影響を機能的・形態的・分子的な指標を用いて検討するために、ラット胎児及び幼児に対する電波ばく露装置を開発し、ラットへのばく露量の定量化制御、管理及びモニタリングを行うことが本研究の目的である。本年度では、下記年次目標

- ① ばく露システムの基本仕様の策定
- ② ばく露システムの開発・製作
- ③ ばく露システムの基本性能の評価データの取得

に沿って研究を遂行した結果、

① 2GHz 帯携帯電話基地局を対象に、想定された電波源の形態、強度、被ばく時間、動物に対するストレス及び運用保守など諸条件を総合的に検討し、ラット全身ばく露装置の仕様を策定した。

② 全身ばく露システム（信号発生器、分配装置、電力増幅器、曝露箱、アンテナ、換気系、制御ソフトウェア）の開発・製作を行った。

- ③ 開発された全身ばく露システムに対し、
- ばく露箱内のアンテナ特性、内部電界特性については、実測と計算機シミュレーション結果との比較評価
 - ラット SAR 特性については、ラットのばく露箱内での活動パターンの記録写真を分類し、それに基づく計算機シミュレーションによるばく露条件下でのラット全身平均 SAR の統計評価
 - 分配装置、電力増幅器、ばく露箱シールド性能、制御ソフトウェアについては、システム全体の試運転と実測

によって明らかにし、設計通り動作することが確認できた。

これにより、本年度の目標はすべて達成できた。