

「新しい無線システムの使用形態で生じる電波への妊娠女性・胎児の曝露評価モデルの開発」

平成22年度実施報告書

研究代表者 渡辺 聡一

独立行政法人情報通信研究機構
電磁波計測研究センター 研究マネージャー

1. 研究実施の概要

本研究プロジェクトでは、近年の無線端末の普及と多様化を背景に、様々な状況における妊娠女性および胎児における電波ばく露量を詳細に評価するための数値人体モデルの生成・変形技術および詳細なばく露評価を目的としている。平成22年度(初年度)の研究進捗状況、研究成果、今後の見通しを下記に述べる。

本プロジェクトで検討されるべき電波曝露のシナリオを明確にし、評価対象とする妊娠女性数値モデルおよび曝露条件を明確化することを目的に過去の論文等を調査し、本プロジェクトで開発する妊娠女性モデルや曝露条件等について検討した。その結果、妊娠初期および妊娠後期、直立以外の姿勢および 3GHz 以上の周波数の各条件での検討がほとんどないことが明らかになった。

妊娠女性モデルを作成するために必要な妊娠女性、特に胎児の医療画像(MRI)を入手について、2010年11月24日に神奈川県立こども医療センター倫理委員会の承認が得られた。これにより、本プロジェクトに必要な胎児組織・分解能を考慮した撮像条件の最適化方法を検討し、実際に妊娠女性・胎児の撮像を行い、画質の評価を行った。今後は取得した MRI 画像に基づいて胎児組織の同定作業を進めて、主にフランス側で開発中の自動および半自動の組織同定ツールの性能を評価する。さらに、異なる画像データセットから構築されたモデルを合成するツールにより構築された妊娠女性モデルの医学監修等を行なう予定である。

本研究プロジェクトに必要な電磁界・熱解析コードをシングル GPU (General Purpose Graphic Processing Unit) に実装し、高速化を図った。今後はこれらのコードを大規模計算への対応および更なる計算速度の向上を目指してマルチ GPU 化を進める予定である。

本プロジェクトのための基礎検討として、既存の妊娠女性数値モデルやその他の数値人体モデルを利用し、遠方から電波を照射した際の SAR および温度解析、携帯電話などの無線通信端末を腹部近傍に配置した場合の胎児内 SAR および温度上昇の解析を実施し、胎児の曝露量に影響する因子、今後検討が必要な無線通信端末の分類、胎児に大きく影響を及ぼす可能性が高い無線通信端末の配置などの考察を行った。

2. 研究実施体制

グループ名	研究代表者又は 主たる共同研究者氏名	所属機関・部署・役職名	研究題目
NICTグループ	渡辺 聡一	独立行政法人情報通信研究機構・電磁波計測研究センターEMCグループ・研究マネージャー	新しい無線システムの使用形態で生じる電波への妊娠女性・胎児の曝露評価モデルの開発
名工大グループ	藤原 修	名古屋工業大学大学院・工学研究科おもひ領域・教授	妊娠女性数値モデルにおける電波曝露量評価
千葉大グループ	伊藤 公一	千葉大学大学院・工学研究科人工システム科学専攻・教授	妊娠女性の電波曝露量評価モデルの構築
KCMCグループ	丹羽 徹	神奈川県立こども医療センター・放射線科・医師	数値人体モデルのための画像評価

3. 研究実施内容

「NICT」グループ

本プロジェクトで検討すべき電波曝露のシナリオを明確にし、評価対象とする妊娠女性数値モデルおよび曝露条件を設定するために、過去に開発された妊娠女性モデルおよびそれらのモデルを用いた曝露評価の研究について調査を行った。表1に既存の妊娠女性モデルの特徴を、表2にこれまでに検討されている妊娠女性モデルを用いた曝露評価について示す。これらの調査から、妊娠初期(7週まで)および妊娠後期(35週以降)のモデル開発例が少なく、胎児の体温調節に重要な役割を果たしている臍帯をモデル化した妊娠女性モデルが少ないことも確認した。また、既存のモデルは概ねボクセルサイズが2mm以下であることから3GHzまでの電波曝露評価が可能であるが、本プロジェクトで対象とする新たな無線システムではさらに高い周波数帯の評価を行うためにはボクセルサイズを0.5-1mm程度にする必要があることが確認された。また、これまでに無線通信機器を対象とした曝露評価は妊娠26週を対象にしたヘリカルアンテナ(150MHz)とダイポールアンテナ、PIFA(900MHz,2GHz)のみであることを確認した。さらに胎児の位置や姿勢、妊娠女性の姿勢等を変更した場合の胎児内の曝露量のばらつき等について検討した報告もないことを確認した。

次に妊娠女性モデルを用いた曝露評価を効率的に実施することも目的として、数値人体モデルを用いた曝露量推定で広く利用されているFDTD法の高速化計算手法について検討した。FDTD法はスカラー演算速度が遅いことがウィークポイントであり、最新のCPUを搭載したワークステーションを利用しても計算時間があまり短縮されないという問題があった。一方で、スーパーコンピュータ等によるベクトル演算により、FDTD計算の高速化は可能であるが、計算コストとジョブ投入から実行までの待ち時間に問題があった。そこで、近年CPUに比べて演算性能が著しく向上したGPUにFDTD法を実装し、その性能を評価した。以降ではCUDA(NVIDIA社製GPU計算コード開発環境)による3次元FDTD法のGPU実装について述べる。

GPUを用いた高速計算を実現するためには、CPU-GPU間のデータ転送回数を少なくすることが重要となる。そこで、初期設定後に電磁界の更新計算に必要なデータをすべて転送する。電磁界更新計算をGPU側で並列処理を終了した後、結果をCPUに転送する。現時点ではCUDAの制限により解析領域を3次元ブロックに分割して並列計算することはできない。そこで解析領域を2次元ブロックに分割し、残りの1次元に関し

ではスレッドで実行されるカーネルプログラムで計算することにより並列計算を実現した。GPU による FDTD 計算性能を評価するため、GPU (NVIDIA Tesla C2050)、CPU (Intel Xeon X5450)、スーパーコンピュータ (NEC SX-8R) による計算速度を比較した。その結果、GPU は CPU の 40 倍程度、スーパーコンピュータ (1ノード:8 CPU) の 1/4 程度であることを確認した。

また、妊娠女性および胎児の曝露量推定に関する基礎的な検討を行った。数値人体モデルを用いた数値シミュレーションにおいては数値人体モデルが有する組織の電気定数が必要となる。しかしながら、胎児の電気定数に関する有用な報告はない。そこで、現状、胎児の電気定数は胎児の水分量から推定した値を利用していることから、その値が真値と大きくかけ離れている可能性がある。そこで、NICT が開発している妊娠女性モデル (13 週、18 週、26 週) を用いて 30MHz から 2GHz の平面波に胎児および妊娠女性固有の電気定数を変化させた場合の妊娠女性および胎児の曝露量を評価した。その結果、胎児および妊娠固有の電気定数は妊娠女性モデルの全身共振周波数帯において、全身平均 SAR および胎児平均 SAR にほとんど影響しないことを確認した。また 200MHz 以上の周波数において、胎児平均 SAR は胎児および妊娠女性固有組織の電気定数に依存するものの、胎児平均 SAR は全身平均 SAR より低いことを確認した。

さらに、妊娠初期の妊娠女性モデルを用いて、平面波への全身ばく露時の温度上昇解析を行った。その結果、60 分曝露後の胎芽の温度上昇は、 0.1°C 未満であることが分かった。また、胎芽の温度上昇と全身平均 SAR の相関は、周波数、曝露方向に関わらずほぼ一定で、胎芽の温度上昇は胎芽平均 SAR でなく、主として母体の全身平均 SAR に依存することが示された。

表1 既存の妊娠女性モデルの概要

作成機関 (愛称)	作成年	国	部位	母体 組織数	胎児 組織数	ボクセル サイズ	妊娠週
ORNL	1995	USA	-	32	5	-	3,6,9 months
FDA	2006	USA	体幹	3	3	Arbitrary size (mesh)	1,2,3,4,5,6,7,8,9 months
Hand et al	2006	UK	腹部	12	3	1.04 x 1.04 x 5 mm	28 weeks
HPA	2006	UK	全身	40	6	2.061 x 2.061 x 1.948 mm	8, 13,26,38 weeks
SILVY	2007	Austria	全身	26	6	2 x 2 x 2 mm	30 weeks
RPI	2007	USA	全身	26	6	Arbitrary size (mesh)	3, 6, 9 months
NICT	2007	Japan	全身	50	6	2 x 2 x 2 mm	26 weeks
NICT	2008, 2009	Japan	全身	50	6	2 x 2 x 2 mm	10,12,13,18,20, 26,28 weeks
GSF (KATAJA)	2008	Germany	全身	153	18	1.775 x 1.775 x 4.840 mm	24 weeks
Telecom Paris Tech	2010	France	全身	2	4-11	Arbitrary size (mesh)	8,9,10,13,26,30,32, 33,35 weeks

表 2 過去に検討された妊娠女性モデルを用いた曝露評価

	報告年	モデル	妊娠週	対象	周波数
Dimbylow	2007	HPA	8, 13, 26,38 weeks	Plane wave	20 MHz-3 GHz
Dimbylow et al	2009	HPA, RPI, NICT	13,26,38 weeks	Plane wave	20 MHz-3 GHz
Nagaoka et al	2007	NICT	26 weeks	Plane wave	10 MHz-2GHz
Nagaoka et al	2008, 2009	NICT	10,12,13,18,20,26,28 weeks	Plane wave	30 MHz-2GHz
Kawai et al	2010	NICT	4 ,8 weeks	Plane wave	10 MHz - 1.5 GHz
Togashi et al	2008	NICT	26 weeks	Mobil phone (half-wave dipole,PIFA)	900 MHz, 2 GHz
Akimoto et al	2011	NICT	26 weeks	Business portable radio (helical antenna)	150 MHz
Kikuchi et al	2010	NICT	26 weeks	MRI	64 MHz
Pediaditis et al	2008	SILVY	30 weeks	MRI	13, 43, 64, 85,127,170 MHz
Hand et al	2006	Hand	28 weeks	MRI	64,127 MHz
Hand et al	2010	NICT	26 weeks	MRI	64,128 MHz
Wu et al	2006	FDA	1,2,3,4,5,6,7,8,9 months	MRI	64, 128 MHz

「名工大」グループ

研究期間を通じて必要な電磁界・熱解析コードの高速化を図るため、GPGPU (General Purpose Graphic Processing Unit) に装荷されたベクトルプロセッサ向けのコード最適化を実施した。本研究を通じて用いる時間領域差分法(FDTD)法は、並列化に適したアルゴリズムを有している。特に、1年目で取り扱った遠方からの電波ばく露に対しては、金属体などを含まないため、当初想定していた 5 倍程度よりも高い 25 倍以上の高速化を達成できた。

構築したアルゴリズムおよび FDTD 法を用いて、主に人体に吸収される電力量(SAR)を解析した。従来、大地面の SAR に与える影響については十分な検討がなされていないため、金属大地面に直立する人体の SAR 解析を行った。解析の結果、完全導体大地面上に直立した場合に全身平均 SAR が最大となり、回転楕円体を用いた過去の報告と一致した。一方で、身長で規格化した間隔に依存しながら振動し、足裏と完全導体大知面の距離を 10cm 以上とすると完全導体大地面の影響を無視できるというこれまでの報告とは一致しなかった。特に、全身平均 SAR はモデルによらず、距離 d が身長 H の 0.1 倍のとき最小に、0.7 倍のとき極大となった。身長の 0.7 倍の時の SAR は、完全導体大地面に直立する場合と大きな差はなかった。また、自由空間中に直立した場合と完全導体大知面上に直立した場合の全身平均 SAR の差異は、完全導体大地面に直立した場合の方が自由空間に直立した場合より 10%程度大きくなることが確認できた。この差異は人体をアンテナと近似した理論から予想されるものに比べて小さく、主たる要因は、モデルの不均質性により、足首付近における等価的に導電率が小さいためと推察した。以上より、電波防護ガイドラインへの知見として最も有用となる最悪条件は、完全導体大地面に直立した場合であると言える。この条件に対して、NICT が構築した既存の妊娠女性モデルに対して SAR が最大となる周波数である共振周波数を定め、比較計算を実施するための条件を定めた。この条件を NICT およびフランステレコム Orange Lab. に提示し、比較計算を開始した。

また、妊娠女性のうち、特に母体に吸収される電力量評価を目的に、遠方から電波をばく露した場合の SAR の全身平均値の検討を行った。これまで、筆者らの研究グループでは、自由空間中に直立する人体モデルに対し、共振周波数における全身平均 SAR を推定する手法をダイポールアンテナとの類似性に基づき提案してきた。その手法を、金属大地面に直立する場合に拡張し、複数の人体モデルを対象とし、各モデルが完全導体平面上に直立している場合の全身平均 SAR を解析した。得られた結果を用いてモノポールアンテナの受信特性の類似性に基づく全身平均 SAR 推定式を提案し、その有効性について検討した。その結果、モデルの不均質性、形状の影響により、全身平均 SAR 推定式からの推定値と FDTD 解析による解析値に最大で 10%程度の差異が生じるものの、おおよその値を推定できることが確認した。また、既存の NICT の妊娠女性数値モデルを用いた解析結果は、母体に関しては、その他の成人あるいは子供モデルと明確な差異は見られなかった。現在、胎児の SAR について検討を行っているところである。

「千葉大」グループ

様々な曝露条件における妊娠女性の曝露評価モデルの構築を目的として、本年度は、これまでに開発された妊娠女性数値モデルを用いて、携帯電話を代表とする無線通信端末を腹部近傍に配置した場合の胎児内 SAR および温度上昇解析の予備的検討を行った。これらの曝露評価で、無線通信端末の周波数、出力、サイズ等から、今後検討が必要な無線通信端末の分類や、胎児に大きく影響を及ぼす可能性が高い無線通信端末の配置などを考察した。

本年度の曝露評価に用いた端末は、業務用無線機(150 MHz)および携帯電話機(2 GHz)である。まずは、業務用無線機を用いた曝露評価について説明する。実用されている業務用無線機を参考に、きょう体付きヘリカルアンテナの数値モデル化を行った。ここで、計算機シミュレーションの不確かさを低減するために、モデル化の妥当性を検討することは、これらの評価をする上で非常に重要な課題である。そこで、モデル化の妥当性を検討するために、参考にした無線機と人体等価ファントムを用いて SAR の測定を行い、モデル化を行ったきょう体付きヘリカルアンテナの計算機シミュレーション結果と比較を行った。その結果、シミュレーション結果と測定結果が良好に一致したことで、モデル化の妥当性を確認した。次に、これまでに開発された妊娠女性数値モデルを用いて、業務用無線機使用時における胴体内 SAR 分布の計算機シミュレーションを行った。また、業務用無線機の実使用状況での SAR 分布について考察するために、アンテナを腰周りの様々な位置に配置した際の胎児内 SAR 分布を算出した。その結果、アンテナが母体腹部前方にある場合、アンテナと胎児との距離が短くなるため、最も高い SAR を示すことが確認された。さらに、胎児が子宮内で姿勢を変えることを考慮して、医学系論文等を参考に代表的かつ典型的な胎児の姿勢における SAR 解析も行った。これについても、アンテナまでの距離が短いほど、胎児での SAR が高くなることが確認できた。これらの得られた SAR を発熱源と位置づけ、体内(特に胎児)での温度上昇分布を算出した。この電磁波曝露に伴う体内の温度上昇分布を計算するためには、生体熱輸送方程式を用いた計算手法が広く知られている。SAR は体内での発熱源となることから、熱拡散や血流による熱移動などを考慮することで、体内での温度上昇分布を見積もることが可能である。これらの作用を微分方程式として記述したものが生体熱輸送方程式であり、前段階で算出された SAR を代入することで、体内での温度上昇分布を算出する。そこで得られた温度上昇値を、胎児の奇形、成長遅延、発育障害といった異常の直接的な原因となり得る温度上昇閾値と比較した結果、その閾値を超えないことが明らかになった。

次に、携帯電話機を用いた曝露評価について説明する。こちらも実用されている携帯電話機を参考に、きょう体付き平板逆 F アンテナの数値モデル化を行った。妊娠女性数値モデルを用いて、携帯電話機使用時におけ

る胎児内 SAR 分布の算出した結果、業務無線機使用時における傾向と同様に、母体腹部前方にアンテナがある場合の胎児内 SAR が最も高く、アンテナと胎児との距離が一番の要因であることを確認した。また、携帯電話機は業務無線機に比べて物理的にアンテナサイズも小さく、周波数も高いために、SAR は母体内部で広く分布することはなく、胎児の SAR は低い値を示した。さらに、温度上昇分布も算出した結果、閾値を超えないこと確認した。

以上の結果をまとめると、周波数が低い無線通信端末の方が(出力にもよるものの)、胎児において高い SAR を示す。さらに、周波数に関わらず、母体前方にアンテナが配置されている場合の方が、胎児との距離が短くなるため、SAR が高くなることがわかった。

「KCMC」グループ

本年度は数値人体モデルを作成するためにあたり、臓器の描出能がその後の解析精度に影響するため、磁気共鳴画像法(magnetic resonance imaging: MRI)の至適撮像方法を検討した。

撮像中の胎児の動きを止めることは不可能であるが、MRI は撮像対象の動きにより画質が著しく低下する。このため、対象の動きがある場合でも画質がある程度保たれる撮像法について検討した。まず、成人ボランティアにて single shot 法である Haste 法、Fisp 法、および体動補正法である T2 強調 BLADE 法、T1 強調 BLADE 法に関して実際に撮像を行い、従来の撮像法と画質に関して比較検討した。この検討は、撮像時間やパラメータ設定における画質のコントラスト比、撮像時間への影響、および解剖学的な描出能に関して行った。画像判定は画像上の信号計測および放射線科専門医による視覚的評価にて施行した。信号解析では、画像を Dicom 形式にて出力し、ワークステーション上で各解剖学的部位の信号値の計測を行った。次に、小児の臨床 MRI にて体動のある患児で体動補正法を適応し、撮像された MRI の画質を検討した。また、新生児における撮像法、画質の検討も併せて行った。ボランティアで施行した撮像法の比較検討では、体動補正法である BLADE 法での撮像で十分な画質が得られることが確認できた。また、小児・新生児の臨床の撮像において、体動のある患児で施行された MRI にて従来の撮像法に対して BLADE 法の有用性が確認できた。

胎児の MRI を施行においては、当院の倫理委員会での審議を経た。倫理委員会での承認が得られ上で、上記にて検討した撮像法を最適化し、実際に妊娠女性・胎児の撮像、および画質の評価を行った。妊娠女性、胎児においても体動補正法にて比較的良好な画像が取得され、胎児の各臓器や臍帯、胎盤などが同定可能であった。

以上、MRI の撮像法を最適化することにより、比較的良好な胎児の画像が取得された。撮像の対象を増やし更なる画質の向上に努めたい。また、各スライス間でのつながりやスライス間の補正なども今後検討する予定である。

4. 主催したワークショップ等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2010/5/17	Fetus プロジェクト キックオフ会合	東京八重洲ホール	6	研究課題採択後の日本側研究者の初顔合わせ。今後方針等についての打合せ
2010/5/31	Fetus プロジェクト パリ会合	フランス国立 高等通信学院	15	日仏共同研究者の初顔合わせ。共同研究契約や研究方針についての打合せ。
2010/10/18	Fetus プロジェクト 日仏 TV 会議 事前準備会合	NICT 麹町会議室	11	日仏 TV 会議での議題や研究の進捗報告。
2010/10/27	Fetus プロジェクト 日仏 TV 会議	フランステレコム 東京オフィス	16	日仏関係者による研究進捗報告。
2010/12/1	Fetus プロジェクト パリ会合	オレンジラボ	20	日仏関係者による共同研究進捗報告および今後の研究方針等の確認。

以上