

## 3次元CG技術を用いた 放射線リスク認識支援システムの構築に関する研究

### 学位論文内容の要旨

本研究は、モンテカルロシミュレーションによる放射線防護量までの換算係数の算出を行い、3次元CG技術を用いた放射線リスクの可視化による放射線リスク認知支援システムの構築を目的としている。

近年20年の間に、パソコンの性能や使いやすさは格段に向上し、それに伴い、ネットワーク環境の整備が進んだ。このようにパソコン環境の利便性がますます向上している中、コンピュータグラフィックス(CG: Computer Graphics)技術の進歩にも目を見張るものがあり、産業界、理工学分野、医療分野、娯楽業界等様々な分野においてCG技術が応用されている。

一方、近年の宇宙空間の利用、大型加速器から発生する高エネルギー荷電粒子や二次粒子の高度利用などにより、人体が被ばくする放射線が広範かつ高エネルギー範囲のものとなってきている。また、放射線利用分野の多様化が進み、放射線に被ばくする人口の増大と一般大衆の被ばく機会の増加も無視できないものとなっており、放射線防護の問題がますます重要となっている。このような状況であるにもかかわらず、高エネルギー放射線に対する放射線防護データの整備は充分とはいえない。

そこで、本研究では、放射線粒子の輸送計算にEGS-4モンテカルロシミュレーションコードを用い、その中にMIRD-5型数学的人体ファントムを組み込んで、2MeV以上の高エネルギー電子線に対する放射線防護量までの換算係数の算出を行った。同時に、不可視情報である放射線リスクの提示手法としてCGを用いて可視化する新しい放射線管理方式を提案し、3次元CG技術による放射線リスク認識支援システムの構築に関する研究を行った。以下に各章の概略を述べる。

本論文は6章で構成した。第1章は序論であり、本研究の背景とこれまでの関連研究、目的、そして本論文の構成を述べた。第2章では、放射線防護体系全般について説明した。放射線被ばくした際の影響とそのリスクの考え方、放射線障害から人体を守るための提言・勧告をしている国際的機関である国際放射線防護委員会ICRPとその方針についてまとめた。また、ICRPの勧告で用いられている放射線防護量の概要と現在の放射線防護体制についての概略を述べ、これまでのICRPによる勧告の中で高エネルギー電子線に対する放射線防護データの不十分さについて指摘し、現在の放射線高度利用の状況からこれらのデータ整備の急務性について言及した。

第3章では、EGS-4シミュレーションプログラムとMIRD-5型人体形状ファントムを用いて、未だICRPで対応されていない高エネルギー電子線に対する放射線防護量の換算係数の算出を行った結果について述べた。冒頭に、換算係数の算出時に用いたEGS-4モンテカルロ

シミュレーションコードと MIRD-5 型数学的人体形状ファントムについて概略を説明した。その後、特定の臓器(皮膚、生殖腺、赤色骨髄、筋肉)についての吸収線量の詳細な算出方法について明らかにし、前方-後方、左右の側方照射に関する放射線防護量換算係数を算出した。計算を行った入射エネルギー範囲(0.1~200 MeV)では、前方照射の換算係数が全入射エネルギーにおいて一番大きく、これは、人体の前面に放射線リスクを考慮する上で重要な臓器(乳房、睾丸など)が多いためであることが分かった。左右の側方照射の換算係数はほぼ一致しているが、臓器ごとでは結腸と肝臓が身体の左右に占める割合が異なるため吸収線量値が左右で異なることを明らかにした。入射エネルギーが増加するにつれ照射体系間の差異は小さくなるが、200 MeV ではほぼ一致するため、放射線防護の観点から前方照射だけでなく様々な照射体系についてさらに高いエネルギーでの計算をすることが必要であることを示した。今後の人体ファントム高度化への考慮点として MIRD-5 ファントムの皮膚や骨領域に関する問題点を指摘し、さらに、他の研究との比較を行い、本研究で算出した換算係数の妥当性を明らかにした。

第4章では、リスク管理と不可視情報の可視化として、リスク認知とその管理について放射線リスクを例にあげて説明した後、専門家と一般公衆の放射線リスク認識の差異について検討した。その結果、リスク認知を高めるためには、人々が知りたい情報をわかりやすく提示することが重要であることを明らかにし、第3章で算出された放射線防護量までの換算係数や放射線量に関する様々な情報(不可視情報)を、3次元CGを用いて可視化する手法を提案した。まず、放射線リスクの特色で重要なのは放射線の透過作用であることを明らかにし、その特色を表現するのに適した可視化手法として、本研究では透過状況描画を得意とするレイトレーシング法を用いることとした。そこで、本章の後半では、不可視情報の可視化に関する現状とコンピュータグラフィックス全般について、特に本研究で用いた POV-Ray の基礎であるレイトレーシング法の原理について述べた。

第5章では、3次元CGによる放射線リスク認識支援システムの構築について述べた。POV-Rayによって人体ファントムの可視化を行い、CGによる放射線リスクの可視化について考察しその有用性および有望性について検証した。リスク状況に応じて色彩表現することで放射線リスクを表示できることを確認した。また、人体ファントムを透明物質で可視化したことで、放射線の透過性が表現され、内部臓器のリスクの状況を視覚的に捕えることが可能となっている。次に、可視化された人体ファントムを利用し、今まで算出してきた数値的な放射線防護換算係数の可視化も含めた新しい放射線管理システムとして、3次元CGによる放射線リスク認識支援システムの構築を行った。システムでは、第3章のシミュレーション結果による放射線の人体臓器の沈着エネルギー量を人体ファントムや放射線リスクパネルの色彩表示で表現している。また、放射線防護量の換算係数のグラフ化や放射線影響についてのテキスト表示などで放射線リスクおよびその影響について情報の一元化が図られている。リスク状況の色彩化やグラフ表示による情報伝達は、視覚的に表されているため、素早く直感的にその内容を知ることができ、リスク認知の向上や情報の共有化に有効であると考えられる。最後に、構築した試作システムに関連してその特徴や性能について述べ、その有効性、応用分野について検討した。

第6章では、本研究の全体的なまとめと今後の研究課題について論じた。

以上、本論文に述べた研究より、未だICRPで対応されていない高エネルギー電子線に対する放射線防護量の換算係数の算出を行い、放射線防護の基礎データとしての妥当性を明らかにした。また、3次元CG技術による放射線リスク認識支援システムの構築により、不可視情報である放射線リスクのCG可視化の有用性を明らかにした。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 青 木 由 直  
副 査 教 授 柄 内 香 次  
副 査 教 授 北 島 秀 夫  
副 査 教 授 澤 村 貞 史

学 位 論 文 題 名

## 3次元CG技術を用いた

### 放射線リスク認識支援システムの構築に関する研究

近年の宇宙空間の利用や加速器から発生する高エネルギー荷電粒子や二次粒子の高度利用などにより、人体が被ばくする放射線の種類やエネルギーが広範囲なものとなつてきている。また、放射線利用分野の多様化が進み、放射線に被ばくする人口の増大と一般公衆の被ばく機会の増加も無視できないものとなっている。このような中、放射線防護の問題がますます重要となっている。

一方、近年、電子計算機の性能や使いやすさは格段に向上し、それに伴い、ネットワーク環境の整備が進んだ。このように電子計算機環境の利便性がますます向上し、コンピュータグラフィックス (CG: Computer Graphics) 技術の進歩にも目を見張るものがあり、理工学分野、医療分野等様々な分野においてCG技術が応用されている。

本研究は、このような背景のもと、モンテカルロシミュレーションによる放射線防護に必要な実効線量の算出を行い、これをデータベースとして、3次元CG技術を用いた放射線リスクの可視化による放射線リスク認知支援システムの構築を目的としたものであり、以下のような成果を上げている。

(1) MIRD-5型人体ファントムおよびEGS-4モンテカルロコードを用いて電子、陽電子、ガンマ線間の相互粒子転換を含むエネルギー輸送・沈着蓄積過程をシミュレートできる計算体系を構築した。これを用いて、人体内の62臓器・組織を対象として、0.1 MeV—200MeVの高エネルギー電子線に被ばくした場合の各臓器中のエネルギー沈着量を求め、この沈着エネルギー量から放射線防護に必要な臓器線量、等価線量および実効線量を求める計算方法を、特に皮膚、骨表面、赤色骨髄、筋肉におけるエネルギー沈着量の取り扱い方法を含めて、明らかにした。

(2) 人体に対して電子線を前方から照射する場合、後方から照射する場合および側方から照射する場合において、入射粒子フルーエンスから実効線量を求めるための換算係

数およびそのエネルギー依存性を示し、入射電子のエネルギーや照射方向によって換算係数の値に寄与する主要な臓器が異なることを示した。その結果、例えば前方照射では、1 MeV 以下では皮膚が、10 MeV 以下では乳房、50 MeV 以上では生殖腺や肺が実効線量に主として寄与することを明らかにした。

(3) 放射線によって人体に誘発される確率的影響に関するリスクの認知と管理をより安全に、より適切に行うため、従来の数値的管理に加えて、放射線防護に関する不可視情報を可視化することの重要性を指摘している。確率的影響の特色により、入射粒子のエネルギーや照射方向によって各臓器のリスクが異なるため、正確なリスク認知のためには人体内部が透過して可視化できる CG 技術が必要であることを明らかにした。そのため、透過表現が可能なレイトレーシング法による 3 次元画像作成プログラムである POV-Ray を用いて MIRD-5 型と同型の放射線リスク表示用人体ファントムを作成している。

(4) 可視化された人体ファントムを用い、サーバー・クライアントシステムを基本とした 3 次元 CG による放射線リスク認識支援システムの構築を行っている。このシステムは、放射線防護のための換算係数や放射線場の量に関するシミュレーション結果、放射線による人体臓器の沈着エネルギー量等をデータベースとして保有しており、放射線作業条件を入力することによりその作業に基づく放射線リスクを従来の被ばく線量値として与えるのみならず、確率的影響の大きさとして人体ファントム内の各臓器上の色彩表現で与えることが可能であり、放射線リスクの視覚的認識に有効であることを明らかにしている。さらに、構築したシステムに関連してその特徴や性能について述べ、その有用性や適用分野について検討している。

これを要するに、著者は、高度利用が急速に展開しつつある高エネルギー電子線に対する放射線防護のための実効線量の算出を行い、さらに放射線リスク認識支援システムを構築することにより、不可視情報である放射線リスクを 3 次元 CG 技術を用いて可視化することの有用性を明らかにしており、情報メディア工学、リスク科学、放射線保健物理学に対して貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格ある者と認める。