

氏 名	越 智 久 晃
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 6 年 2 月 9 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	平成 元 年 3 月 大阪大学大学院基礎工学研究科物理系 専攻前期課程修了
学 位 論 文 題 目	高磁界 MRI 用アンテナの特性解析に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 安達 三郎 東北大学教授 米山 務 東北大学教授 澤谷 邦男 東北大学助教授 宇野 亨

論 文 内 容 要 旨

この論文は、高磁界 MRI 用アンテナの性能向上のための指針を得ることを目的として、1.5 テスラ MRI 用アンテナの特性解析に関する一連の研究成果をまとめたものである。特に、これまで理論的な検討が困難であった人体や板状 RF シールドが、アンテナに与える影響について理論的に検討している。

MRI は、静磁界内に置かれた水素原子核が、静磁界強度に比例した特定の周波数の RF 磁界に共鳴する核磁気共鳴現象を利用した画像診断法である。X 線 CT や超音波診断装置に比べて人体軟組織の識別能力に優れている。人体の任意断面像が得られる、解剖学的情報のみならず血流や代謝機能などの生体機能に関する情報も得られる等の特長を有する低侵襲イメージング法として近年特に注目されている。MRI では人体を MRI 用アンテナの内部に置き、RF 磁界の照射により、人体中の水素原子核を励起する。これらの原子核が定常状態に戻るときに放出する微弱な電磁波を再びアンテナで受信し、像再構成処理を施すことにより人体内部の原子核分布を画像化する。信号を最初に処理するアンテナは画質を決定する重要な素子であり、より一層の性能向上が望まれている。アンテナに要求される性能は、アンテナ内部に均一でかつ高い磁界感度を有することである。なお、MRI においてはアンテナの感度は、単位体積中の水素原子が放出する時計廻り円偏波磁界がアンテナに誘起する電力の大ききさで定義される。しかし、これまで多くの研究が行われてきたにもかかわらず、アンテナ構造と感度の関係については不明な点が依然として多く残されている。これは、MRI 用アンテナが検査対象となる人体やアンテナの外側に設けられる板状 RF シールドと電磁氣的に結合するため、アンテナの性能はアンテナ自身の構造の他に人体とシールドの影響を受け、計

算による予測が一般に困難であるためである。これまでの MRI 用アンテナに関する理論的研究としては、人体とシールドを無限長円柱で、アンテナを無限長導体でそれぞれ近似し、2次元モデルを使って解析した結果が報告されている。しかしながら、この方法では、実際の設計に必要なアンテナの入力インピーダンスの周波数特性や、導体上の電流分布を求めることができないといった問題点が残されている。また、アンテナの形状を最適化するためには、胴体のような楕円柱型負荷がアンテナに与える影響や、シールドの長さが感度に及ぼす影響等についても解析する必要がある。最近、線状導体で構成される任意形状のアンテナを取り扱えること、入力インピーダンスの周波数特性や導体上の電流分布を容易に求めることができることから、Richmond のモーメント法を用いた MRI 用アンテナの特性解析が行われた。ここで、Richmond のモーメント法とは、線状導体で構成されるアンテナを V 形ダイポールセグメントと呼ばれる波長より十分短い要素に分割することにより、アンテナ導体表面上で成立する積分方程式を、電圧行列、インピーダンス行列、電流行列からなる行列方程式に変形し、アンテナ上の電流分布を解く方法である。しかしながら、モーメント法単独では人体や板状シールドの影響については考慮できず、任意の計算モデルを取り扱える解析法が望まれていた。

そこで本論文では、Richmond のモーメント法を基本に、任意形状の人体およびシールドを取り扱える計算法を確立し、1.5テスラ MRI 用アンテナの解析を行った。図 1 には、本論文の各章の関係を示す。

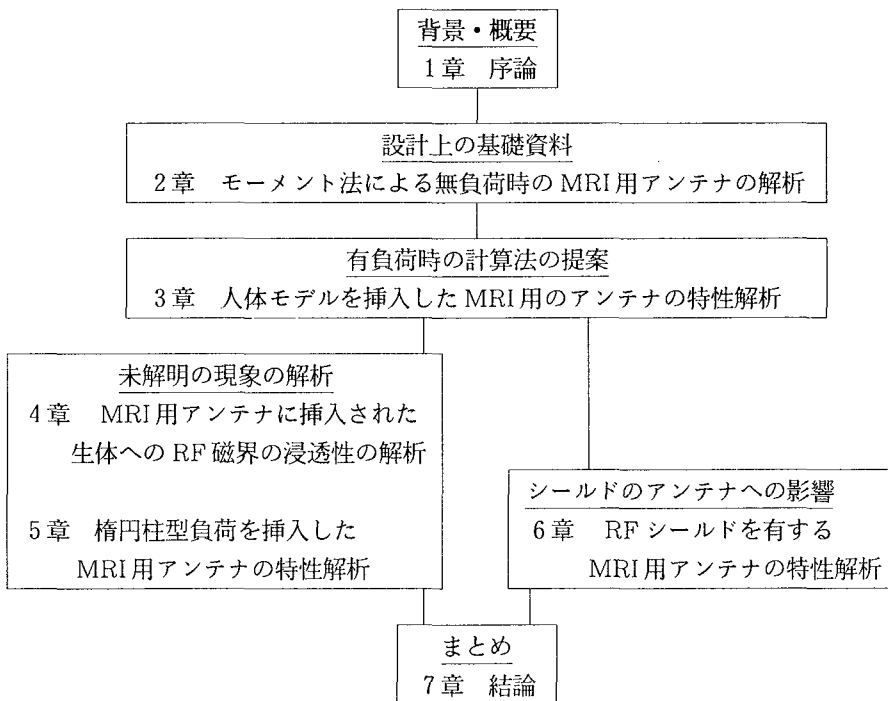


図 1 本論文の構成

1章は序論である。核磁気共鳴現象の原理，MRIの歴史，MRI装置の構成およびMRI用アンテナの役割等について述べている。

2章では，Richmondのモーメント法を用いた無負荷時（人体非挿入時）のアンテナの解析結果について述べた。1.5テスラMRI用アンテナとして広く用いられているマルチプルエレメント・レゾネータの，複数の共振周波数でのアンテナ上の電流分布，および磁界強度分布を示し，イメージングに利用できる共振周波数は唯一であることを示した。また，これらの解析結果は3章以降の解析のための基礎資料として使われた。

3章では，有負荷時（人体挿入時）のアンテナを解析するために，モーメント法にインピーダンス法を組み込む計算法を新たに提案した。アンテナ近傍に生体が存在する場合には，モーメント法のインピーダンス行列の各要素に，次式で与えられる生体からの散乱電界の寄与を加える必要がある。

$$\mathbf{E}^s(\mathbf{r}) = -j\omega\mu \iiint_V \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') (\sigma(\mathbf{r}') + j\omega\epsilon_0(\epsilon_r(\mathbf{r}') - 1)) \cdot \mathbf{E}^{inc}(\mathbf{r}') d\mathbf{r}'$$

ここで \mathbf{r} と \mathbf{r}' はそれぞれ観測点と生体内部の波源点の座標， ω は角周波数， μ は透磁率， \mathbf{E}^{inc} は生体内部の電界， $\bar{\mathbf{G}}$ は自由空間のダイアディック・グリーン関数， σ と ϵ_r はそれぞれ生体内部の導電率と比誘電率である。生体内部の電界 \mathbf{E}^{inc} を求めるためにインピーダンス法を用いた。この方法は生体を3次元インピーダンス・ネットワークに分割し，生体中の電磁界をネットワーク上の電圧，電流に置き換えることにより，それを数値的に解く方法である。本計算法は任意形状・任意媒質の人体モデルを取り扱えるという優れた特長を有している。この計算法で得られた入力インピーダンスを実験値と比較することにより，計算法の妥当性を示した。また，無負荷時と有負荷時の感度分布の違いを明らかにした。

4章では，MRIの分野で未だ十分な説明がなされていない現象の解明を試みた。すなわち，MRIが臨床に利用され始めたのは1980年以降であるが，1970年代の終わり頃，「周波数が高くなると，表皮効果により電磁波は人体深部まで浸透せず，深部では感度が著しく弱くなる。そのため人体断面画像を撮影するためには，静磁界強度を0.3テスラ以下としなくてはならない」という議論が存在した。現実には，撮影限界とされた0.3テスラの5倍の共鳴周波数を有する1.5テスラの人体撮影装置が製品化されており，上記の議論の結論は得られている。しかしながら，なぜ1.5テスラのような高い静磁界強度でも人体が撮影できるのかを定量的に解き示した文献は見当たらない。さらに，実際に静磁界強度1.5テスラのMRI装置で生体を撮影したとき，生体表面よりむしろ深部における感度の方が高くなる場合のあることが知られている。この矛盾を解明するため，3章で提案した計算法を用いて，人体へのRF磁界の浸透性について解析した。アンテナ上の電流が作る入射磁界と，生体内部の電流が作る散乱磁界を分離して求めることにより，生体に電磁波を照射したときの散乱磁界は金属など導体の時と異なり，必ずしも入射磁界を打ち消すものでないことを示した。また，生体表面よりも深部の方が感度が高いのは，散乱磁界の分布の寄与によることを明らかにした。

5章では，胴体のような楕円柱型負荷を挿入したときの，楕円柱型負荷に対するRF磁界の向き

と感度の関係について述べた。これまでアンテナの入力インピーダンスのQ値から判断して、楕円の短軸と給電点のなす感度と感度の関係は 0° を中心として対称であると考えられてきたが、非対称になることを初めて示した。さらに、その原因が楕円柱型負荷を挿入したことによりアンテナ上の電流分布が変化し、RF磁界の向きを楕円の長軸あるいは短軸方向に設定したとき以外は、アンテナ中心で楕円偏波磁界が生じるためであることを示した。さらに、これまで検討されていなかった胴体のような楕円柱型負荷に対する円偏波給電の効果について検討した。

6章では、板状RFシールドがアンテナに及ぼす影響について述べた。ここでは、任意形状の板状RFシールドの影響を解析するために、板状導体上の電流を2方向の面状電流要素で展開し、これにガラーキン法を適用した。無負荷時および有負荷時の入力インピーダンスを実験値と比較することにより、計算法の妥当性を示した。この計算法を用いて、まず、無負荷時において、シールド寸法とアンテナ感度の関係を示した。特にシールドの長さがアンテナ感度に与える影響を定量的に明らかにしたのは、この解析結果が最初である。さらにアンテナとシールドに流れる電流を求めることにより、アンテナ感度は、シールドによってエネルギーがシールド内部に閉じ込められることにより感度が上がる効果と、シールド上に生じる2次電流によって感度が下がる効果の兼ね合いで決定されることを初めて明らかにした。さらに、有負荷時についても、シールド寸法とアンテナ感度の関係を求め、無負荷時と比較検討した。

以上MRI装置の信号検出系の3要素であるアンテナ、人体、シールドの相互作用に関して理論的検討を行い、いくつかの新しい知見を得ることができた。これらの研究成果はMRI装置の設計および性能向上に貢献するものと考えられる。

審査結果の要旨

MRI（磁気共鳴撮像）は、人体の任意断面像が容易に得られ、軟組織の識別能力に優れているほか、血流や代謝機能などの生体機能に関する情報も得られる低侵襲なイメージング法として、近年特に注目されている画像診断法である。MRI法に用いられるアンテナは画質を決定する重要な役目を果たし、それには均一で高い高周波磁界感度が要求される。しかしながら、MRI用アンテナは、従来経験的な手法によって設計されており、アンテナ構造と感度の関係については不明な点が多く残されていた。

本論文は、任意形状のアンテナ、並びに複雑な人体を取り扱える数値解析法を提案し、この解析法を1.5テスラMRI用のアンテナ（マルチプルエレメントレゾネータ）に適用して、人体やシールド導体がアンテナ特性に及ぼす影響を明らかにしたもので、全編7章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、人体およびシールドがない自由空間中のマルチプルエレメントレゾネータをモーメント法を用いて解析し、複数の共振周波数におけるアンテナ上の電流分布と磁界強度を示し、イメージングに利用できるのは唯一の共振周波数であることを理論的に明らかにしている。

第3章では、人体モデルがアンテナの内部に置かれているときのアンテナ特性を解析する手法として、インピーダンス法とモーメント法を組み合わせた数値解析法を提案している。また、実験結果との比較により、この手法の精度と妥当性を示すと共に、人体モデルの有無による感度の変化を明らかにしている。本章で提案された数値解析法は、複雑な形状と媒質を有する人体の影響を精度良く解析できる優れた手法であり、高く評価できる。

第4章では、高磁界MRIにおけるアンテナの磁界感度分布について詳しく検討し、人体表面よりも人体内部の方が僅かながら感度が高いことを初めて理論的に明らかにしている。これは、高磁界MRIでは表面効果のために人体の深部まで磁界が到達しないのではないかとという従来の疑問に対して明確に答えたもので、重要な結論である。

第5章では、胴体のように非軸対称で偏平な損失性誘電体を挿入したときの感度について検討した結果が述べられている。長軸または短軸方向以外に高周波磁界を印加した場合は楕円偏波が発生し、アンテナ給電点の位置と感度の関係は長軸に対して非対称になることを初めて明らかにした。また、均一な感度を得る手段として円偏波給電が有効であることを示している。これらは重要な知見である。

第6章では、モーメント法を任意形状の板状導体の問題に拡張した手法を開発し、アンテナの外側に設けられるシールド円筒導体の効果も含めた解析を行い、シールドの半径と長さによるアンテナ感度の変化を初めて定量的に明らかにしている。これは有用な成果である。

第7章は結論である。

以上要するに、本論文はMRI用のアンテナの数値解析法を開発すると共に、人体やシールド導体がアンテナ特性に及ぼす影響を定量的に明らかにして多くの重要な知見を与えたもので、電磁波工学並びに医用電子工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。