エムディ シャハダト ホサイン アクラム 博 士 (工学) 博 甲 第 7250 号 平成 27 年 3 月 25 日 学位規則第4条第1項該当 数理物質科学研究科

Coupled Circuit Analysis of Eddy Currents in MRI Systems (MRI システムにおける渦電流の結合回路解析)

查	筑波大学教授	理学博士	巨瀬勝美
查	筑波大学教授	理学博士	高田義久
查	筑波大学講師	博士(理学)	渡辺紀生
查	(独)国立環境研究所室長	博士(工学)	渡邉英宏
	_ 查 查	查	査筑波大学教授理学博士査筑波大学講師博士(理学)

# 論 文 の 要 旨

磁気共鳴イメージング (Magnetic Resonance Imaging: MRI) においては、均一な静磁場、線形勾配磁場、そして高周波磁場が使われる。静磁場は、核スピンを分極させて核磁化を作り出す役割を果たし、勾配磁場は、核磁化が発生する NMR 信号の空間的位置を特定するものであり、高周波磁場は、核スピンを励起して、NMR 信号を生み出す役割を有している。本研究は、勾配磁場の時間的変動に関する研究であり、特に、勾配磁場を時間的に変化させるときに周囲の導体に発生する渦電流を、定量的に求めるための手法に関する研究である。

勾配磁場を時間的に変化させたときに周囲の導体に発生する渦電流を求める方法に関しては、さまざまなアプローチにより研究が行われており、これまで、有限要素法(Finite Element Method:FEM)により、周囲の導体をメッシュで区切られる小さな領域に分割して計算する手法や、時間領域差分法(Finite Difference Time Domain Method:FDTD)と呼ばれるMaxwell 方程式を直接数値的に解く方法などの、直接的な計算法ではあるが、膨大な計算機パワーを必要とする方法が提案されている。また、これらの方法は、メッシュの設定方法によっては、その粗さに伴うアーチファクト(偽の情報)が現れることが知られており、これらの点でも、改良が期待されている。

これに対し、勾配磁場コイルの周囲の導体を、直流抵抗 R と自己インダクタンス L にモデル化して渦電流を解析する方法は、Coupled circuit analysis と呼ばれ、渦電流解析法として有力な手法とされている。ただし、実際に計算する場合には、さまざまな未解決の問題もあり、実際のシステムにおいて計算された例や、実験データと比較された例も少ない。そこで、本研究では、0.3T の永久磁石を用いたオープン型小型 MRI と、9.4T の縦型超伝導磁石を用いた MRI を対象として、この手法を実装することにより、より優れた解析法として確立することを目的として研究を行った。

本研究で開発した解析手法は,以下の通りである.

まず, 勾配磁場コイルの発生する磁場と磁気的な結合を持つ導体を, 一次元的な形状(帯状の領域やリング状の領域など)の導体(subdomain)に分割する. ただし, subdomain は, 勾配磁場変化が含む最大の周波数の侵入長(skin depth)の10分の1以下の厚さに取るようにし, 一定の電流が流れるようにする. このように分割された各 subdomain に対し, 勾配磁場コイルが発生する時間的に変動する磁場によって誘導される電流に関する連立一次方程式を作る. この連立一次方程式には, subdomain の自己インダクタンスだけでなく, subdomain 相互間の相互インダクタンスによる効果も取り入れられており, それらが, 勾配磁場に流れる電流変化を外力とした, 非斉次(inhomogeneous)の連立一次方程式となっている.

この非斉次の線形方程式を解くためには、外力項(勾配磁場コイルの電流変化項)をゼロとおいた斉次 (homogeneous) 方程式の一般解に、非斉次方程式の特別解を加え、それが、初期条件を満たすようにすれば良い. 斉次方程式の一般解  $I_i(t)$ は、その係数行列の固有値 $\lambda_i$ を求め、その固有ベクトルから作られる基底により係数行列を対角化して解くことにより、時定数 $\lambda_i$ で減衰する指数関数の線形結合として得ることができる。よって、具体的には、その係数行列を計算する必要がある.

この係数行列の対角成分は、subdomain の自己インダクタンス、非対角成分は、相互インダクタンスであり、それぞれ、帯状およびリング状の subdomain の場合には、ともに解析的に表すことができる。そして、勾配磁場コイルと subdomain の間の相互インダクタンスに関しては、solid angle を用いた計算手法によって計算を行った。なお、計算には、Mathematica を使い、 $PC(OS:Windows7, CPU:Core\ 2\ Duo(2.93GHz\ clock)$ 、4GB メモリ)で計算を行った。

実験は、静磁場強度 0.3T、ポールピース径 32cm の水平開口で鉛直方向の磁場を持つ小型永久磁石、遺伝的アルゴリズムで最適化した巻き線パターンを有する勾配磁場コイル、直方体状の真鍮製電磁シールドボックス (180mm×220mm×100mm)を有する RF プローブから構成される小児骨年齢計測用小型 MRI と、静磁場強度 9.4T の縦型超伝導磁石 (室温部の内径は 53.84mm、液体室素槽の内径は 61.14mm、液体へリウム槽の内径は 69.74mm、以上いずれも厚さ 1.63mm の Cu 製、Al 製の磁石の巻き枠の内径は 81.1mm、厚さは 3mm)、外径 39mm、内径 32mmの円筒型勾配磁場コイル、外径 20mm、長さ 35mm の鞍型 RFコイルから構成される MR microscope で行った.

小児骨年齢計測用 MRI においては、内径 6mm の球状ガラス容器内のベビーオイルを試料とし、立ち上がりと立ち下がりがいずれも 170μsで、継続時間が 1.06ms の勾配磁場パルス(Gx, Gz)を印加した後にRFパルスを印加して、その後の FID を観測することにより渦電流の効果を計測した。また、その球状の試料は、ステッピングモーターを用いて、プローブ内で位置を動かしながら計測を行った。高磁場 MR microscope においては、内径 4mm の球状ガラス容器内の硫酸銅水溶液を試料とし、継続時間が 50ms の勾配磁場パルス(Gx, Gz)を印加した時間Δ後に、Δを変えて RF パルスを印加し、その数 ms 後にグラジエントエコーを発生させ、勾配磁場パルスの強度変化に対するグラジエントエコーのピーク位置のシフト量から、渦電流の効果を計測した。

その結果, 0.3T のシステムにおいて, シールドボックスに流れる渦電流の時定数は, Gz のスイッチングによって誘起されるものでは 170µs, Gx のスイッチングによって誘起されるものについては 70µs であり, その大きさもシミュレーションと実験で良く一致した. また, 9.4T のシステムにおいては, Cu のボアなどに流れる渦電流の時定数は, 2.5G/cm の強度を有する Gz のスイッチングによって誘起されるものでは, シミュ

レーションより、内部から、それぞれ 1.04ms (0.2989 G/cm), 1.94ms (0.2180 G/cm), 2.28ms (0.1565 G/cm), 1.27ms (0.1022 G/cm) であることが求められ、同じく2.5 G/cm の強度を有する Gx のスイッチングによって誘起されるものでは、シミュレーションより、1.06ms (0.3034 G/cm),1.80ms (0.1750 G/cm),2.43ms (0.1367 G/cm),1.63ms (0.1013 G/cm) と求められた、実験との詳細な比較に関しては、課題が残るが、概ね、実験を再現することができた。なお、計算時間は、0.3T のシステムにおいては、0C では 1C 分 57 秒,0C では 1C 分 1C のシステムにおいては、1C のシステムにおいては、1C では 1C のシステムにおいては、1C のかりのは、1C のかりののは、1C のかりのは、1C のかりののは、1C のかりのの

以上より,本研究で提案した渦電流解析手法は,有用であると結論した.

## 審査の要旨

### 〔批評〕

本研究は、博士課程に入学まで、MRI に関する経験が全くなかったにもかかわらず、3 年間でゼロから研究を始めてここまで達成したものであり、その点でも、その能力は高く評価できる。また、公開審査で使用されたスライドは、非常に良く準備されたものであり、発表も明快であった。そして、多くの質問に対する回答も、概ね妥当であった。

### [最終試験結果]

平成27年2月17日、数理物質科学研究科学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、 著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

#### [結論]

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。