

## 博士論文の内容の要旨

令和8年2月17日

研究審査委員会委員長 渡部晴之

審査委員 下瀬川正幸

審査委員 川村 拓

外部審査委員 宮地利明

研究課題名

「MRIの空間分解能評価におけるラダー法の有用性に関する研究」

所属・氏名 診療放射線学研究科診療放射線学専攻 博士後期課程 竹内友一

近年、画像診断技術は目覚ましく発展しており、特に Magnetic Resonance Imaging (MRI) においては、新たな撮像シーケンスや画像再構成技術の登場により、画質を客観的に評価する手法の確立が課題となっている。他の医用画像モダリティでは、空間分解能評価に Modulation Transfer Function (MTF) を用いた評価法が確立され、技術革新に合わせて評価法も進歩してきた。しかし、MRI では画像生成プロセスから、MTF の入力から出力への線形性が担保されない。よって、複素画像を用いた方法やパーシャルボリューム効果を用いた方法などが提案されているが、複素画像の取得が装置のベンダーに依存し困難であることや、特殊なファントムが必要であること、さらには MTF を算出する上で様々な補正が必要で、処理が煩雑であることから、汎用されていないのが現状である。一方、International Electrotechnical Commission (IEC) は、装置の性能評価を目的に周期的パターンを持つファントムを用いた簡便な解析から空間分解能を評価する方法を提案しており、これを発展させたラダー法が臨床の撮像条件の違いを評価する目的で考案されている。しかし、ラダー法に関しては MTF との関係や、撮像条件の違いを評価する際の有用性、臨床画像の見た目との比較についての妥当性が明らかにされていない。よって MRI の空間分解能評価は確立された汎用的な評価法が存在せず、新しい技術の臨床応用における最適化プロセスの阻害の一因となっていた。

本研究は、この課題を解決するため、簡便かつ空間周波数情報を含む新しい評価手法であるラダー法の妥当性と有用性を多角的に検証することを目的とした。

まず、ラダー法の妥当性を示すために、解像特性が異なる条件下においてラダー法の評価値と MTF を算出し、比較した。その結果、ラダー法の評価値 ladder index ( $LI$ ) と MTF のカットオフ周波数にはすべての条件で相関係数が 0.90 以上の高い相関が認められた。ラダー法は周期的パターン内の信号の標準偏差を平均値で割ることで  $LI$  を算出するため、解像度が低い条件では、ラダーファントムのプレート間のグラデーションが増加し、 $LI$  が減少する傾向を示した。このことから、ラダー法は MRI の空間分解能を客観的かつ簡便に評価可能であり、MTF の代替手法として有用であることが示唆された。

次に、ラダー法の有用性を示すため、撮像パラメータが画像の分解能に与える影響を評価

し、パラメータの最適化を検討した。具体的には、3D撮像シーケンスにおいて撮像時間短縮を目的とした「slice resolution」というパラメータについて、撮像時間短縮に伴うスライス選択方向の空間分解能の劣化をラダー法および視覚評価で検討した。その結果、slice resolutionを100%から80%に低下させた場合でも、multi-planar reconstruction (MPR) 画像における空間分解能の劣化は確認されず、直径2 mmの構造を十分に分離可能であることが示された。一方、slice resolutionを70%以下に設定した場合には、ラダー法の評価値  $LI$  および視覚評価スコアが低下し、空間分解能の劣化が確認された。このことから、slice resolutionを80%に設定することで撮像時間を約20%短縮しつつ、MPR画像の空間分解能を維持できることが明らかとなった。この最適化により、撮像時間の短縮による患者の負担軽減や、他のシーケンスの画質向上に活用できる可能性が示唆された。また、ラダー法を用いた空間分解能評価は、他の撮像条件や再構成技術の違いを評価する際にも応用可能であると考えられた。

最後に、ラダー法の評価値  $LI$  と臨床画像との関係を明らかにするため、前立腺MR画像に着目し、解像特性が異なる条件下で、評価値  $LI$  と同条件で得られたボランティアの前立腺MR画像の視覚評価を比較した。その結果、ラダー法の評価値  $LI$  と臨床画像の視覚評価のいずれにおいても、解像特性の違いを判別可能であった。特に  $LI$  が0.5および0.1と一致する空間周波数(50% $LI$ および10% $LI$ )を用いた評価において、視覚評価スコアと高い相関が認められた。これにより、視覚評価を補完する手法としてラダー法を用いた評価が有用となることが明らかになった。

本研究が提示したラダー法のフレームワークは、MRIの空間分解能評価における標準的な手法として普及し、診断プロトコルの最適化や新しい撮像技術の評価精度向上に大きく貢献する可能性を秘めている。この標準化された評価法が確立されることで、将来的には患者ケアの質の向上に繋がるものと確信する。

## 博士論文の審査の要旨

令和 8 年 2 月 17 日

研究審査委員会委員長 渡部晴之  
審査委員 下瀬川正幸  
審査委員 川村 拓  
外部審査委員 宮地利明

研究課題名

「MRI の空間分解能評価におけるラダー法の有用性に関する研究」

所属・氏名 診療放射線学研究科診療放射線学専攻 博士後期課程 竹内友一

令和 7 年 11 月 26 日（水）、予備審査用の博士論文が提出され、各審査委員は個別に予備審査を開始した。

令和 7 年 12 月 9 日（火）に、Microsoft Teams を用いて第 1 回審査委員会が開催された。本審査委員会では、竹内氏による約 20 分間のプレゼンテーションが行われ、引き続き約 50 分間の質疑応答が実施された。審査委員からは、研究の新規性、研究方法の妥当性、および得られた研究成果の信頼性を確認するための質問がなされた。特に信頼性の検討においては、本研究で使用されたデータの確認を行うとともに、得られた結果から導かれる結論に矛盾がないかを精査した。具体的な指摘事項は以下の通りである。

- ・文章表現に誤用があるため修正を要する。
- ・専門用語の詳細を補足すること。
- ・論文全体を通じて文体の一貫性を整えること。
- ・タイトルの英語表記の変更について
- ・業績リストの記載について
- ・関心領域の形状による誤差について
- ・解像特性の位置依存性についての考察への加筆

第2回審査委員会は最終試験を目的として、令和8年2月13日（金）18時40分、公聴会終了後に画像情報処理室にて開催された。公聴会において最終プレゼンテーションが確認済みであったため、本委員会では再度の発表は行わず、約40分間の口頭試問を実施した。口頭試問では、研究の新規性・有用性・信頼性に関して説明を求め、いずれについても適切かつ良好な回答を得た。さらに研究方法の詳細について説明を求めるとともに、博士後期課程で取り組んだ定量評価法の重要性や、将来的な発展的応用の可能性についても意見交換を行った。