

MRIにおける異なる非線形フィルタ処理画像の ノイズパワースペクトル比較

会田 健人^{1,2}, 宮本 宏太³, 一関 雄輝⁴, 町田 好男¹

¹東北大学大学院医学系研究科 画像情報学分野, ²仙台厚生病院

³国立病院機構仙台医療センター, ⁴東北大学病院 診療技術部

Noise Power Spectra of Various Nonlinear Filtered Magnetic Resonance Images

Kento AITA^{1,2}, Kota MIYAMOTO³, Yuki ICHINOSEKI⁴ and Yoshio MACHIDA¹

¹Department of Medical Imaging and Applied Radiology, Tohoku University Graduate School of Medicine

²Sendai Kousei Hospital

³Sendai Medical Center

⁴Tohoku University Hospital

Key words: magnetic resonance imaging (MRI), noise power spectrum (NPS), nonlinear filter

Nonlinear filters that reduce noise components while preserving edges are often used to improve MR image quality. Effects of nonlinear filters change adaptively according to the target images. Therefore, the image quality evaluation is important, but no appropriate evaluation method has been established. We have started a basic investigation to apply noise power spectra (NPS) to image quality evaluation of nonlinear filtered images, such as Non-Local Means (NLM) and Bilateral filters. However, the noise reduction effects of nonlinear filters change complicatedly with the filter parameters and the target images, and it is difficult to characterize differences in NPSs among nonlinear filters. In this study, we adjusted filter parameters so that the noise reduction effects of nonlinear filters were the same. Results showed that differences of NPSs between two nonlinear filters were apparent for low spatial frequency region. Results suggest that differences in filtered images such as image blur and edge preservation were reflected in NPS.

1. 緒 言

MRI (magnetic resonance imaging) における非線形な処理として、エッジの保存とノイズ低減を目的とした非線形フィルタなどがある。近年になって、ナイキスト周波数に満たないようなサンプリングデータから、非線形な繰り返し演算処理により画像再構成を行う圧縮センシングMRI¹⁾も

導入されている。これらの非線形処理は、対象画像に応じて適応的に処理が変化するため、それらが画質に与える影響を評価することが重要であるが、適切な画質評価法は確立されていない。

ノイズパワースペクトル (noise power spectrum: NPS) はノイズの周波数特性を表す画質指標で、実空間画像のノイズ成分をフーリエ変換した結果の絶対値を2乗することで得られる^{2,3)}。主

に X 線画像や CT 画像で標準偏差 (standard deviation: SD) よりも詳細なノイズ評価法として用いられてきた。MRI においては、もっとも基本的な収集法である直交収集の NPS がフラットな特性になることや、線形フィルタの周波数特性を反映すること等、その基本特性はある程度自明であることが知られていた⁴⁾。しかし、プロベラ法などの新しい撮像法においては、NPS が必ずしも自明でない画像のノイズ特性を反映していることが示された⁵⁻⁷⁾。これらを踏まえ我々は、線形系の扱いやすい指標である NPS を MRI における非線形処理画像の画質評価に応用することを目指している。非線形フィルタ処理に対してもフラットな NPS 特性が変化することや、その変化がフィルタの特性を反映することが分かっており⁸⁾、NPS を非線形フィルタの評価や、非線形フィルタ処理画像の画質評価に応用することが可能であると期待される。

これまでに我々は、NPS による非線形フィルタ評価の初期検討として、MR 画像を模した頭部数値ファントム画像に対して、論文等で内容が公開されている NLM (Non-Local Means) フィルタ^{9,10)} や Bilateral フィルタ^{11,12)} 処理を施し、その NPS の比較を行ってきた。その際に、対象画像やフィルタのパラメータを変化させていたが、非線形フィルタのノイズ低減効果は複雑に変化するため、両フィルタ処理後の NPS の特性を詳細に把握し、比較することは困難であった。その理由として、一般に、それぞれのフィルタ処理後の画像に残るノイズの量が異なることが挙げられると考えた。以上のことを踏まえ我々は、非線形フィルタのノイズ低減効果が同一となるように、フィルタのパラメータを調節し、その条件下でのフィルタ処理後の NPS の比較を行った¹³⁾。本研究ではさらに、複数のフィルタ強度での比較を行うことでフィルタ処理による NPS 特性の違いをより詳細に把握できるようにした。また、NPS 特性の違いと画質との関連を検討するため、フィルタ処理画像も観察した。

2. 方 法

2-1. 対象画像

画像はウェブサイト Brainweb¹⁴⁾ からダウンロードした頭部の T1 強調画像を模した数値ファントムを使用した。181×217×181 の 3 次元データでボクセルは 1 辺が 1 mm の等方性ボクセルである。そこからスライスを取り出して背景部分にゼロ詰めを行い、マトリクス数 256×256 の画像を作成した。放射線医学分野で一般的な feet 方向から見た画像表示に反転させて、白質の画素値が 100 となるように規格化した後、各画素に SD が 10 の正規ノイズ (σ_0 と定義する。) を付加した。各画素に正規ノイズを付加することは、ホワイトノイズを模擬するために MRI のシミュレーションで一般的に行われる方法である。今回の検討では、複数回の撮影を模擬するために、同一標準偏差で独立に発生させた異なる正規ノイズを付加した T1 強調画像を 10 枚作成した。これらの画像をフィルタ処理前の元画像とした (図 1)。

2-2. NLM フィルタ

NLM フィルタは、探索領域内のパターンマッチをしてから加重平均することで、エッジを保存

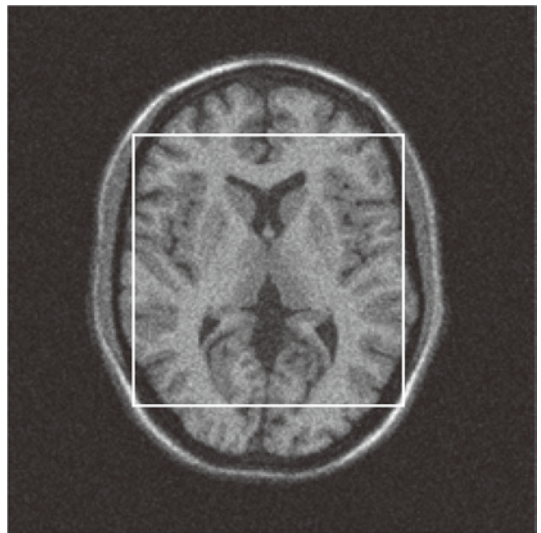


図 1. 非線形フィルタ処理に用いた元画像。正方形の ROI 内で NPS を計測した。

しつつ、ノイズを除去することができる非線形フィルタである。注目画素に対して探索領域を設定し、次に注目画素の周りを囲む類似度算出領域を設定する。探索領域内の他の画素に対しても対照用の類似度算出領域を設定する（図2）。2つの類似度算出領域の対応する画素同士の差の2乗を求め類似度の指標とし、そこから重みを算出した。重み算出の式は Manjón らの論文¹⁰⁾の式を参考にした。

$$d(p, q) = G \left\| Y(N_p) - Y(N_q) \right\|_2^2 \quad (1)$$

$$w(p) = \exp \left(-\frac{d(p, q)}{h^2} \right) \quad (2)$$

ここで Y は画像を表し、 p は注目画素、 q は探索領域内の任意の画素を表す。 N_p 、 N_q は画素 p 、 q を中心とする類似度算出領域を表す。 G は平均値0、標準偏差 σ_d のガウス関数で、ここでは、 $\sigma_d = 1$ とした。 h は類似度が重みの値に与える影響の度合いを決める定数で、フィルタ強度に影響するパラメータである。求めた重み $w(p, q)$ を用いてノイズ除去後の画素値を以下の式で算出した。

$$\text{NLM}(Y(p)) = \frac{\sum_{\forall q \in S_p} w(p, q) Y(q)}{\sum_{\forall q \in S_p} w(p, q)} \quad (3)$$

ここで S_p は探索領域を示す。

2-3. Bilateral フィルタ

Bilateral フィルタは、画素値の差と画素間の距離に重みをつけて加重平均することで、エッジを保存しつつ、ノイズを除去できる非線形フィルタである。注目画素とフィルタ内の任意の画素との画素値の差と距離に重みをつけて加重平均する。フィルタ処理後の画素値は以下の式で算出する。式に関しては Ming らの論文¹²⁾を参考にした。

$$\tilde{I}(x) = \frac{1}{C} \sum_{y \in N(x)} e^{-\frac{\|y-x\|^2}{2\sigma_d^2}} e^{-\frac{|I(y)-I(x)|^2}{2\sigma_r^2}} I(y) \quad (4)$$

ここで x は注目画素、 y はフィルタ内の任意の画素を表す。 N はフィルタの領域を表し、 C は重みを正規化する定数である。 σ_d は画素間の距離、 σ_r は画素値の差の重みの値に影響を与える定数で、フィルタ強度に影響するパラメータである。

2-4. NPS 計測

NPS の計測は、Ichinoseki らの方法に準じて行った⁵⁾。図1の元画像に対して NLM および Bilateral フィルタ処理を行い、処理後の10枚の画像から2画像間の差分画像5枚を作成した。差分画像の中心部分に 128×128 の NPS 計測用の関心領域 (region of interest: ROI) を設定し、この領域上で2次元離散フーリエ変換および絶対値の2乗処

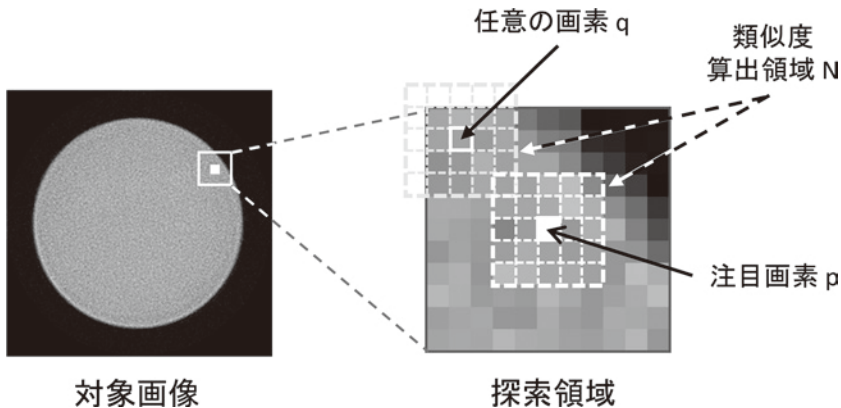


図2. NLM フィルタで設定する処理領域
注目画素に対して探索領域および類似度算出領域を設定する。探索領域内の他の画素に対しても対照となる類似度算出領域を設定する。

理を行い、5枚の処理画像の平均値を2次元NPSとした。ここで、2次元NPSの一つ一つの画素値をNPS値と呼ぶこととする。また、空間周波数が等しい同一円周上のNPS値の平均を取ることによって1次元NPSを算出した。本検討でのNPSの結果は1次元NPSのグラフで示す。

2-5. フィルタパラメータの調節

本検討では、各非線形フィルタのノイズ低減効果を同一にするために、フィルタ処理後の差分画像に設定したNPS計測ROI内のSD (σ_{filtered} と定義する。)が同一となるようにフィルタパラメータを調節した。 σ_{filtered} は差分画像5枚の各NPS計測ROI内のSDを求め、その平均値を取ることによって算出した。差分画像はノイズ成分を取り出した画像であるため、 σ_0 から σ_{filtered} を引いた値を「ノイズ低減量」とした。

NLMフィルタの h を $0.4 \times \sigma_0$, $0.8 \times \sigma_0$, $1.2 \times \sigma_0$ とした。 σ_0 はすべて10で固定である。 h は値が大きいくほどノイズ低減量が多くなり、フィルタ強度が高くなるため、 h の値が小さいほうから順に「フィルタ強度低、中、高」と呼ぶこととした。NLMフィルタの各フィルタ強度でのノイズ低減量が同一となるようにBilateralフィルタの σ_r を調節した。調節後のフィルタパラメータおよび σ_{filtered} は表1のようになった。なお、表1以外のパラメータは、両フィルタ間で類似のもののはできるだけ揃え以下の値で固定した。すなわち、NLMフィルタについては、探索領域サイズ: 11×11 , 類似度算出領域サイズ: 5×5 , $\sigma_d = 1$, Bilateralフィルタについて、フィルタサイズ: 5×5 , $\sigma_d = 1$ とした。

表1. フィルタパラメータと差分画像のSD

フィルタ強度	NLM h	Bilateral σ_r	σ_{filtered}
低	$0.4 \times \sigma_0$	$0.89 \times \sigma_0$	7.18
中	$0.8 \times \sigma_0$	$2.12 \times \sigma_0$	4.18
高	$1.2 \times \sigma_0$	$5.60 \times \sigma_0$	2.87

3. 結果

3-1. 差分画像とフィルタ処理画像

2つの非線形フィルタ処理後の差分画像とフィルタ処理画像の結果を図3にそれぞれ示す。

まずフィルタ処理画像に関して、フィルタ強度低においてはフィルタ間であまり違いは見られなかった。フィルタ強度中においては、NLMフィルタでは図の楕円ROIで示すような画像値の変化が少ない領域ではノイズが強く低減され、Bilateralフィルタでは全体的に空間的にblurが生じたいわゆるボケた画像になった。フィルタ強度高においては、フィルタ強度が中のときに見られた傾向がさらに強くなった。

差分画像に関して、NLMフィルタではエッジ部分のノイズの保存が強く、輪郭がはっきりと見えた。また、フィルタ強度が高くなるほどROIで示す領域のような均一な部分のノイズが強く低減されるため、構造を確認することができた。Bilateralフィルタでは全体的にノイズが低減される傾向があった。

3-2. 1次元NPSの比較

各フィルタ処理後のNPSをフィルタ強度間で比較したグラフを図4、各フィルタ強度でのフィルタ処理後のNPSをNLM, Bilateralフィルタ間で比較したグラフを図5に示す。

どちらのフィルタにおいても空間周波数が高くなるにしたがってNPS値が低下した。フィルタ強度間の比較では、フィルタ強度が高くなるにしたがって、NPS値の低下が大きくなった。フィルタ間でのNPSの比較では、すべてのフィルタ強度において、Bilateralフィルタの方が、空間周波数0~2.0 cycles/mm付近の低周波領域におけるNPS値の低下が抑制されて高くなっていた。またフィルタ間のNPSの差は、フィルタ強度が高くなるほど大きくなった。また、フィルタ強度中と高においてBilateralフィルタの方が0.4 cycles/mm以上の高周波領域のNPS値が低下した。

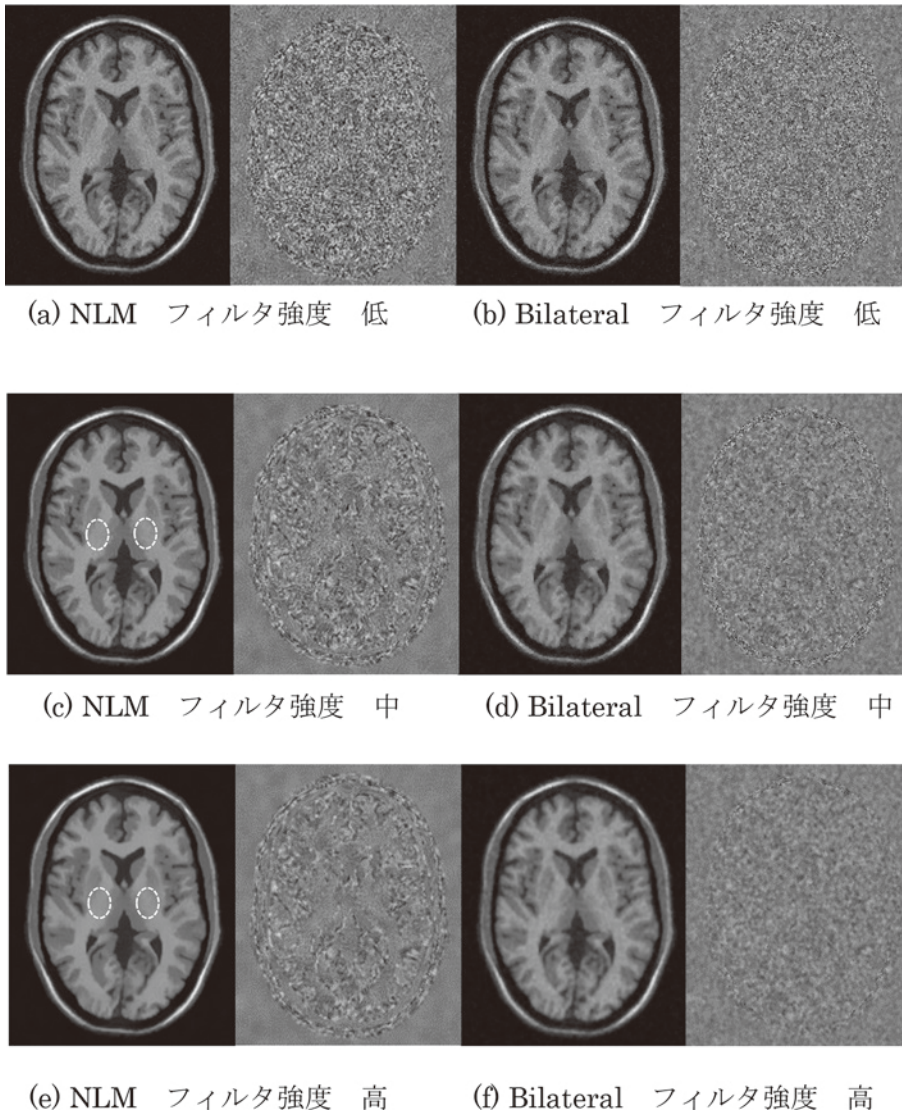


図3. NLMフィルタとBilateralフィルタの画像比較。
(a), (b)はフィルタ強度低, (c), (d)は中, (e), (f)は高のT₁強調画像におけるフィルタ処理画像と差分画像である。

4. 考 察

4-1. フィルタ処理画像と差分画像について

NLMフィルタ処理画像ではエッジの保存が強くなること, 差分画像では均一な部分のノイズが強く低減されていることが確認できた。これに対

して, Bilateralフィルタ処理画像ではエッジの保存が弱くボケた画像になること, 差分画像では全体的にノイズが低減されていることが確認できた。NLMフィルタは, 重みの計算をする際に周りの構造も考慮するため, 注目画素と周りの構造が異なる画素は重みが小さくなる。一方Bilateral

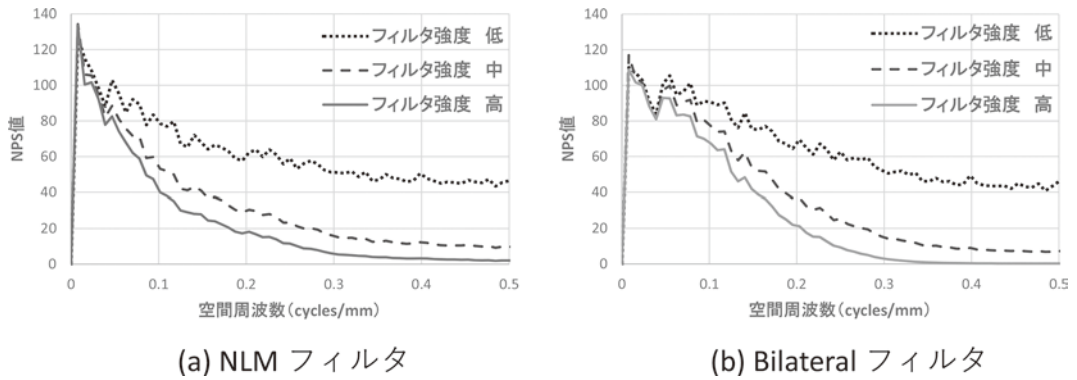


図 4. NLM, Bilateral フィルタにおけるフィルタ強度間の NPS 比較
 (a) は NLM, (b) は Bilateral フィルタの NPS をフィルタ強度間で比較したグラフである。

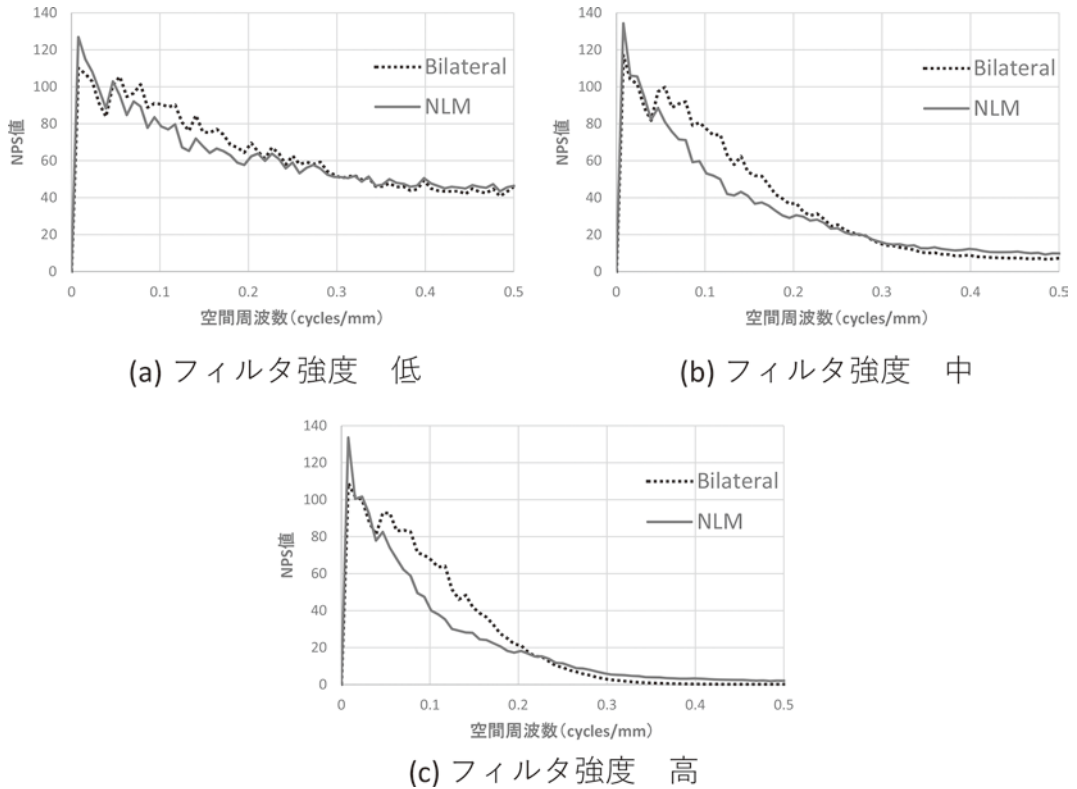


図 5. 各フィルタ強度における NLM, Bilateral フィルタの NPS 比較
 (a) はフィルタ強度低, (b) は中, (c) は高でのフィルタ処理後の NPS を NLM, Bilateral フィルタ間で比較したグラフである。

フィルタでは、周りの構造が異なっても注目画素と画素値の差が小さい画素は重みが大きくなる。エッジ付近は構造の変化が大きいため、NLMフィルタの方がエッジの保存が強くなったと考えられる。

4-2. 1次元NPSについて

NPSの比較では、特にフィルタ強度中と高においてBilateralフィルタの方が、低周波領域の1次元NPS値の低下が抑制されて高くなった。他のフィルタ処理をした場合においても、画像がボケると低周波領域のNPSが高くなる傾向になる¹³⁾。このことから、フィルタ処理により生じたボケの成分がNPSの低周波成分に含まれたことが理由として考えられる。この原因は、対象画像に対して適応的に処理内容が変化する非線形フィルタ処理により、異なるノイズを付加した2画像を差分すると、エッジ部分には、保存されたノイズに加えてボケも差分画像に残るためだと考えられる。そのため、フィルタ強度が高くなりBilateralフィルタ処理画像のボケが強くなるほど2つのフィルタ間のNPSの差が大きくなったと考えられる。また、NLMフィルタで、均一な部分のノイズが低周波成分までしっかりと低減できていることもフィルタ間のNPSの差が大きくなった理由の一つだと考えられる。なお、高周波領域において低周波領域と逆の特性を示したのは、本研究では、ノイズ低減量が一定であり、ノイズの総量が等しくなるためだと考えられる。

フィルタ強度低においては、フィルタ処理画像に違いが見られなくても、わずかではあるがフィルタ間のNPSに差が生じた。したがって、NPSによって視覚では確認が難しい画像の変化を高感度にとらえることができる可能性がある。

4-3. リミテーション

本研究において、非線形フィルタ処理の比較はNLMフィルタとBilateralフィルタに限られる。しかし、フィルタ処理画像の変化がNPSに反映されていると考えられたことから、フラットな特性からのNPSの変化を見ることで画像を評価できると考えられた。

非線形フィルタ処理画像と画質評価指標を関連づけることは困難であり、適切な画質評価指標は確立されていなかった。本研究においても、NPSとフィルタ処理画像を直接関連づけたとはいえないが、フィルタの強度を変化させることにより、フィルタ間のNPS特性に差が生じることが分かった。今後、他の非線形フィルタを用いた検討など、フィルタ処理画像とNPS特性の関係についての研究を進めていくことにより、NPSをMRIにおける非線形フィルタ処理画像の画質評価の指標として用いることが期待できると考えられる。

5. 結 語

非線形フィルタのノイズ低減量が同一となる条件下で、複数のフィルタ強度でのNLM、Bilateralフィルタ処理画像およびNPSを比較した。フィルタ強度が高くなり2つフィルタの処理画像に違いが出るほどNPSに差が生じた。またこの差は、エッジのボケ具合などのフィルタ処理画像における違いによるものであることが示唆された。今後もNPSとフィルタ処理画像の関係についての検討を進めていくことで、NPSを非線形フィルタ処理画像の画質評価に用いることが期待できると考えられた。

謝 辞

本研究の一部はJSPS科研費15K08688の助成を受けた。

文 献

- 1) Lustig, M., Donoho, D., Pauly, J.M.: Sparse MRI: The application of compressed sensing for rapid MR imaging, *Magn. Reson. Med.*, **58**, 1182-1195, 2007
- 2) 森一生, 山形仁, 町田好男: CTとMRI—その原理と装置技術—, コロナ社, 東京, 2010, 64-66
- 3) 桂川茂彦: 医用画像情報学 改訂2版, 南山堂, 東京, 2006, 24-25
- 4) McVeigh, E.R., Henkelman, R.M., Bronskill, M.J.: Noise and filtration in magnetic resonance imaging, *Med. Phys.*, **12**, 586-591, 1985
- 5) Ichinoseki, Y., Nagasaka, T., Miyamoto, K., Tamura, H.,

- Mori, I., Machida, Y. : Noise Power Spectrum in PROPELLER MR imaging, *Magn. Reson. Med. Sci.*, **14**, 235-242, 2015
- 6) 一関雄輝, 宮本宏太, 齋藤俊輝, 森一生, 町田好男 : プロペラ MR 画像の一次元ノイズパワースペクトル計測, *Med. Imag. Tech.*, **33**, 217-222, 2015
- 7) Ichinoseki, Y., Machida, Y. : Relation between one- and two-dimensional noise power spectra of magnetic resonance images, *Radiol. Phys. Technol.*, **10**, 161-170, 2016
- 8) 宮本宏太, 一関雄輝, 齋藤俊輝, 永坂竜男, 森一生, 町田好男 : NPS による適応型フィルタの効果の評価—頭部画像での検討, *日本磁気共鳴医学会雑誌*, **34-S**, 370, 2014
- 9) Buades, A., Coll, B., Morel, J.M. : A review of image denoising algorithms, with a new one, *Multiscale Model Simul.*, **4**, 490-530, 2005
- 10) Manjón, J.V., Carbonell-Caballero, J., Lull, J.J, García-Martí, G., Martí-Bonmatí, L., Robles, M. : MRI denoising using non-local means, *Med. Image. Anal.*, **12**, 514-523, 2008
- 11) Tomasi, C., Manduchi, R. : Bilateral Filtering for Gray and Color Images, *Proceedings of the Sixth international Conference on Computer Vision*, 839-846, 1998
- 12) Zhang, M., Gunturk, B.K. : Multiresolution Bilateral Filtering for Image Denoising, *IEEE Transactions on Image Processing*, **17**, 2324-2333, 2008
- 13) Aita, K., Miyamoto, K., Machida, Y. : Evaluation of nonlinear processed magnetic resonance images using noise power spectra, *European Congress of Radiology 2018, Vienna, 2018*, C-1818
- 14) McGill University : BrainWeb : Simulated Brain Database, <http://brainweb.bic.mni.mcgill.ca/brainweb> (2019年10月31日閲覧)