臨床技術

造影剤濃度と注入プロトコルの違いが
前立腺 dynamic contrast enhanced MRI に与える影響牧野佑也¹ 秋元 聡¹ 星野広史²論文受付
2017 年 12 月 13 日論文受理
2018 年 4 月 18 日

Code No. 261

¹ 独立行政法人地域医療機能推進機構札幌北辰病院放射線部² 独立行政法人地域医療機能推進機構札幌北辰病院放射線部

(現 独立行政法人地域医療機能推進機構北海道病院放射線部)

緒言

前立腺癌の診断には prostate-specific antigen (PSA)測定を中心としたスクリーニング、生検による確定診断、画像診断による病期診断という三つの段階が存在する。病期診断は治療方針の決定にも大きく影響を与えるとされ、原発巣の評価(T-病期診断)に関しては magnetic resonance imaging(MRI)が最も信頼性が高いと位置付けられている¹⁾。形態を評価する T₂ 強調画像に、機能的な情報が得られる拡散強調画像や

dynamic contrast enhanced magnetic resonance imaging(DCE-MRI)を加えた multiparametric MRI による総合的な評価は、腫瘍の検出、局在診断、悪性度評価において有用性が高いことが示されている²⁻⁵⁾。2000 年から 2016 年にかけての前立腺 MRI 検査を対象とした systematic review によると、T₂ 強調画像のみを用いて診断した場合は感度 75%、特異度 60%であるが、T₂ 強調画像に拡散強調画像と DCE-MRI を組み合わせて診断した場合には感度 81%、特異度 84%

Influence of Different Contrast Agent Concentrations and Injection Protocols on Dynamic Contrast Enhanced MRI of Prostate: Equimolar Comparison of 1.0M Gadobutrol and 0.5M Gadolinium Chelates

Yuya Makino,^{1*} Satoru Akimoto,¹ and Hirobumi Hoshino²¹ Department of Radiological Technology, Japan Community Health care Organization (JCHO) Sapporo Hokushin Hospital² Department of Radiological Technology, Japan Community Health care Organization (JCHO) Sapporo Hokushin Hospital (Current address: Department of Radiological Technology, Japan Community Health care Organization (JCHO) Hokkaido Hospital)

Received December 13, 2017; Revision accepted April 18, 2018.

Code No. 261

Summary

The purpose of this study was to evaluate the enhancement profile of 1.0M gadobutrol (high concentration: HC) in comparison to 0.5M gadopentetate dimeglumine and gadoterate meglumine (low concentration: LC) in dynamic contrast enhanced magnetic resonance imaging (DCE-MRI) of prostate. In total, 48 patients who were diagnosed with prostate cancer by radiologist were included. Each patient was examined after intravenous injection of 0.1 mmol/kg body weight contrast agent with flow rate of 1.5 (HC) or 3.0 mL/s (LC). Circular regions of interest were placed at prostate cancer (PCa) and normal peripheral zone (normal PZ) in DCE-MRI. The enhancement curves were calculated as a relative enhancement. Statistical analysis was performed by Mann-Whitney U test ($p < 0.05$ were considered significant). As a result, the enhancement at first phase of HC was significantly lower compared with LC in PCa (HC, 0.47; LC, 0.85; $p=0.029$), and in normal PZ (HC, 0.12; LC, 0.22; $p=0.033$). The enhancement of HC in PCa was significantly higher compared with LC at late phase. Although not significant, a similar tendency was observed in normal PZ. The present study suggested that the enhancement profile with HC was higher at late phase but the rise of the enhancement curve with HC tended to be delayed.

Key words: pelvic, prostate, dynamic-imaging, contrast agent, gadobutrol

*Proceeding author

Table 1 Patient background

	High concentration		Low concentration		<i>p</i> -value
	Mean±SD	Range	Mean±SD	Range	
Age (years)	73.8±6.3	55–84	74.0±9.0	56–90	0.91
Height (cm)	162.9±6.7	151.0–174.0	163.5±5.8	152.5–174.5	0.80
Weight (kg)	65.1±10.4	48.0–84.0	67.0±10.3	46.7–92.0	0.60
BMI (kg/m ²)	24.5±3.2	18.7–30.3	25.1±4.0	20.1–37.3	0.60
PSA (ng/mL)	74.2±181.3	5.5–824.8	42.0±93.8	6.2–472.0	0.44

にまで上昇する⁶⁾。更に臨床的意義のある前立腺癌の検出と読影レポートの標準化を目的として制定された prostate imaging reporting and data system version 2 (PI-RADS v2)⁷⁾では、multiparametric MRIにおけるT₂強調画像、拡散強調画像、そしてDCE-MRIの所見の組み合わせから臨床的意義のある癌の存在する可能性を5段階で評価するため、DCE-MRIの担う役割は大きい。前立腺癌のDCE-MRI評価法のコンセンサス確立には至っていないが、腫瘍内の血流動態を評価するためには早期濃染と洗い出しを捉えることが重要であるとされている^{5,8)}。

前立腺DCE-MRIで用いる造影剤としては、従来gadopentetate dimeglumineおよびgadoterate meglumineが広く用いられていたが、2013年3月にgadobutrolが本邦にて承認されたことにより、当院では前立腺DCE-MRIにおいてgadobutrolを採用している。GadobutrolはT₁緩和度を表す指標であるr1値が高いため優れたT₁短縮効果を示すことが特徴であり、1.5 Tの磁場での37℃の血漿におけるr1値は、gadobutrolが5.2 mmol⁻¹s⁻¹、gadopentetate dimeglumineが4.1 mmol⁻¹s⁻¹、gadoterate meglumineが3.6 mmol⁻¹s⁻¹となる⁹⁾。腹部動脈を対象とした造影MR angiography¹⁰⁾や脳腫瘍を対象とした造影MRI¹¹⁾、そして前立腺を対象としたDCE-MRI¹²⁾において、gadopentetate dimeglumineやgadoterate meglumineに比べてgadobutrolのほうが造影効果が高かったと報告されているが、これらはr1値が高いことが原因であると考えられている。

更にgadobutrolは従来のgadopentetate dimeglumineおよびgadoterate meglumineに比べて2倍のモル濃度(1.0 mol/L)を有する。gadobutrolの注入法としては、前立腺DCE-MRIに限らずさまざまな部位の検査において、単位時間あたりに体内に投与されるガドリニウム量を従来と同一にすることを目的として、体重あたりの投与量(mL/kg)と投与速度(mL/s)を従来の半分とするプロトコルが一般的に用いられてお

り^{12,13)}、当院でもそのプロトコルを採用している。

しかし当院の前立腺DCE-MRIにおいてgadobutrolを使用したところ、造影早期の造影効果が従来の造影剤よりも視覚的に低くなっているように感じられ、そのために腫瘍の早期濃染を画像所見として捉えられなくなり、診断能が低下する可能性が懸念された。そこで今回、前立腺DCE-MRIにおいて、上記の投与量と投与速度を従来の半分に設定するプロトコルを用いた場合のgadobutrol(1.0 mol/L、以下、高濃度造影剤)の造影効果と、従来使用していたgadopentetate dimeglumineおよびgadoterate meglumine(0.5 mol/L、以下、低濃度造影剤)の造影効果の違いを定量的に比較評価した。

1. 方法

1-1 対象

本研究は2013年3月から2017年1月に当院で施行された前立腺DCE-MRI検査91件のうち、放射線診断専門医の読影にて前立腺癌と診断された48件を調査の対象とした後ろ向き研究である。対象患者のうち高濃度造影剤を使用した検査が23件、低濃度造影剤を使用した検査が25件(gadopentetate dimeglumine 21件、gadoterate meglumine 4件)であった。造影剤の循環動態に著しく影響を及ぼすような重篤な心疾患などを有する患者はいなかった。なお、患者の年齢、身長、体重、body mass index(BMI)、PSAの各項目についてStudent's *t* test(有意水準 $p<0.05$)を用いて有意差検定を行い、高濃度もしくは低濃度造影剤を使用した両患者群において、体格等の患者背景因子に差がないことを確認している。有意差検定の結果をTable 1に示す。

1-2 造影剤注入プロトコル

いずれの造影剤も患者の体重をもとにして投与量を設定した。高濃度造影剤は0.1 mL/kg body weight、低濃度造影剤は0.2 mL/kg body weightであり、同じ

Fig. 1 The schematic of DCE-MRI protocol.

体重であれば体内に投与されるガドリニウムの量は等しくなる (0.1 mmol/kg body weight). 更に単位時間あたりに体内に投与されるガドリニウムの量を等しくするため、高濃度造影剤の投与速度は従来の低濃度造影剤で使用していた 3.0 mL/s の半分である 1.5 mL/s とした. どちらの造影剤も静注にはインジェクタを用いた. 造影剤のボラス注入に続いて生理食塩水 30 mL を造影剤と同じ速度で注入した.

静脈確保は検査時の体位 (肘を軽く曲げて上腹部に乗せる体勢) を考慮して、肘関節部を避けて右前腕の静脈に 20 ゲージの留置針を刺すことを第一選択とした. また造影剤を使用する際には腎機能に配慮し、すべての症例において estimated glomerular filtration rate (eGFR) の値が 30 mL/min/1.73 m² 以上であることを確認してから造影剤を使用した.

1-3 使用機器および撮像条件

撮像には 1.5 テスラ MR 装置 (EXCELART Vantage, キヤノンメディカルシステムズ) を使用し、コイルは腹部胴体用の 8 ch phased-array coil (TORISO Coil) を使用した. 造影剤注入はインジェクタ (ソニックスショット 50, 根本杏林堂) に造影剤用耐圧チューブ (輸液キット, 東海メディカルプロダクツ, 内容量 4.3 mL) と延長チューブ (エキステンションチューブ, メディキット, 内容量 1.3 mL) を接続して使用した. 鎮痙剤などの前処置薬は使用していない.

DCE-MRI は自由呼吸下にて撮像した. 撮像シーケンスには fast field echo (FFE) quick 3Ds を使用し、繰り返し時間 5.9 ms, エコー時間 2.7 ms, フリップ角度 15 度, 撮像視野 280×280 mm, 撮像マトリクス 160×256, スライス枚数 30 枚, スライス厚 4.0 mm, 加算回数 1.0, parallel imaging factor 2.0 とした. 1 相の撮像にかかる時間 (以下, 時間分解能) は 16.4 秒であった.

DCE-MRI 撮像プロトコルの概略を Fig. 1 に示す. DCE-MRI は造影前の単純画像を撮像後に 5 相撮像した. 造影剤注入開始後 25 秒から第 1 相と第 2 相を連続して撮像し、その後は間隔をあげながら撮像した. 各相の開始時間は 25.0 秒, 41.4 秒, 67.8 秒, 97.8 秒, 174.2 秒である. また、コントラスト決定時間に関しては、k-space の充填法が、スライス面内は k-space の中心行から充填していく centric 法、スライス方向は k-space の最上段から順次充填していく sequential 法であるため、時間分解能の半分 (8.2 秒) がコントラストの中心となる. 各相のコントラスト中心は 33.2 秒, 49.6 秒, 76.0 秒, 106.0 秒, 182.4 秒である.

1-4 評価方法

DCE-MRI の画像解析方法を Fig. 2 に示す. 画像解析には ImageJ (ver. 1.50i, National Institutes of Health)¹⁴⁾ を用いた. 前立腺癌の結節 (prostate cancer: PCa) と正常辺縁域 (normal peripheral zone: normal PZ) に直径 10 pixel 程度の円形 region of interest (ROI) を設定し信号強度を測定した. 解剖学的に正しい位置で測定するために T₂ 強調画像や拡散強調画像を参照しながら ROI を設定した. 正常辺縁域の測定に関しては、腫瘍の位置にかかわらず正常辺縁域への ROI 設定が容易となるスライスを選んだため、腫瘍と同じスライスで測定した症例と別スライスで測定した症例の両方が含まれる. ROI 設定は MRI 検査に携わる診療放射線技師 1 名 (著者, 経験年数 10 年) が行い、それぞれ 3 回ずつ測定した平均値を用いた. その際、各症例が高濃度造影剤の群と低濃度造影剤の群のどちらに属するのか判断できないように配慮して測定を行った. 造影効果は relative enhancement (RE) で評価した¹⁵⁾. RE は同一チューニング内で行われる DCE-MRI の造影効果を定量的に相対評価するために、多くの臨床研究で

Fig. 2 Image analysis method for dynamic contrast enhanced-MRI.
A black arrow indicates PCa foci.

用いられている指標である。RE は造影後の各時相の信号強度から造影前の信号強度を減算したものを造影前の信号強度で除算することで求めた。得られた PCa と normal PZ の各時相における RE を高濃度造影剤の群と低濃度造影剤の群で比較し、Mann-Whitney の U 検定 (有意水準 $p < 0.05$) により統計学的にも評価した。

なお画像を含む医療情報の使用には、生命倫理に十分配慮し、当院の倫理委員会の承認を得ている。画像は匿名化した DICOM データを使用した。解析データは氏名を研究用 ID に置き換え、個人を識別することができる記述をすべて削除した。対応表は CD-R に出力した後、解析用 PC から削除し、CD-R は院内に施錠管理している。研究が終了次第、対応表の CD-R は院内の情報セキュリティマニュアルに沿って廃棄する予定である。

2. 結果

PCa における全時相の RE と normal PZ における全時相の RE を Fig. 3 に示す。そのうち PCa における第 1 相の RE と normal PZ における第 1 相の RE を Fig. 4 に示す。更に全時相の RE の平均値および標準偏差を Table 2 に示す。

PCa では第 1 相において高濃度造影剤のほうが低濃度造影剤に比べて RE は有意に低い値となった (高濃度造影剤 0.47, 低濃度造影剤 0.85, $p = 0.029$)。PCa

の第 3 相 (高濃度造影剤 1.54, 低濃度造影剤 1.32, $p = 0.029$) と第 4 相 (高濃度造影剤 1.49, 低濃度造影剤 1.25, $p = 0.015$) と第 5 相 (高濃度造影剤 1.37, 低濃度造影剤 1.11, $p = 0.005$) においては、高濃度造影剤のほうが低濃度造影剤に比べて RE は有意に高い値となった。

一方、normal PZ では第 1 相において高濃度造影剤のほうが低濃度造影剤に比べて RE は有意に低い値となった (高濃度造影剤 0.12, 低濃度造影剤 0.22, $p = 0.033$)。Normal PZ の第 3 相 (高濃度造影剤 0.82, 低濃度造影剤 0.76, $p = 0.42$) と第 4 相 (高濃度造影剤 0.95, 低濃度造影剤 0.85, $p = 0.22$) と第 5 相 (高濃度造影剤 1.01, 低濃度造影剤 0.89, $p = 0.22$) においては、高濃度造影剤のほうが低濃度造影剤に比べて RE は高い値となったが、有意差はみられなかった。

3. 考察

前立腺 DCE-MRI において、体重あたりの投与量と投与速度を低濃度造影剤の半分に設定するプロトコルを用いた場合の高濃度造影剤の RE と、従来の低濃度造影剤の RE を比較評価した。その結果、前立腺癌結節と正常辺縁域の両組織において、高濃度造影剤は後期相では高い造影効果が得られるものの、早期相の造影効果はむしろ低くなる傾向にあることが確認された。

高濃度造影剤の造影効果が早期相で低くなったのは、高濃度造影剤を低容量かつ低速で注入したことが関与していると考えられる。MRI 用造影剤の注入速

Fig. 3 Relative enhancement (a) in prostate cancer (PCa) and (b) normal peripheral zone(normal PZ).
*Significant difference ($p<0.05$).

Fig. 4 Box-and-whisker plot of relative enhancement (a) in prostate cancer (PCa) and (b) normal peripheral zone (normal PZ) at first phase.

Whiskers indicate minimum and maximum values. The relative enhancement of high concentration contrast agent was significantly lower compared with low concentration contrast agent in PCa and normal PZ at first phase.

*Significant difference ($p<0.05$).

Table 2 Means and standard deviations of relative enhancement in prostate cancer (PCa) and normal peripheral zone (normal PZ)

Phase	Relative enhancement in PCa (Mean $\pm$ SD)			Relative enhancement in normal PZ (Mean $\pm$ SD)		
	High concentration	Low concentration	p -value	High concentration	Low concentration	p -value
1st	0.47 ± 0.44	0.85 ± 0.57	0.029^*	0.12 ± 0.19	0.22 ± 0.20	0.033^*
2nd	1.37 ± 0.41	1.30 ± 0.42	0.31	0.54 ± 0.29	0.60 ± 0.33	0.58
3rd	1.54 ± 0.34	1.32 ± 0.33	0.029^*	0.82 ± 0.31	0.76 ± 0.33	0.42
4th	1.49 ± 0.33	1.25 ± 0.31	0.015^*	0.95 ± 0.32	0.85 ± 0.33	0.22
5th	1.37 ± 0.34	1.11 ± 0.28	0.005^*	1.01 ± 0.31	0.89 ± 0.31	0.22

*Significant difference ($p<0.05$).

度と大動脈の信号強度の関係については佐久間の報告¹⁶⁾がみられるが、造影剤濃度と投与量の違いによる影響については言及されていない。一方、computed tomography(CT)においては、造影剤注入時間、単位時間あたりに体内に投与されるヨード量および総投与ヨード量が同一の場合でも、低濃度造影剤を高速注入した場合よりも高濃度造影剤を低速注入した場合のほうが、大動脈のCT値のピークは有意に低くなり、造影効果曲線の立ち上がりも遅くなると報告されている^{17,18)}。この原因としては、腕頭静脈などのデッドスペースに停滞するヨード量は高濃度造影剤のほうが多

くなること、造影剤投与速度(mL/s)が遅いほど大動脈内の血液を置換する際の均一性が低下すること、造影剤容量(mL)が少ないために造影剤が末梢まで到達しづらくなり末梢の血管の造影効果が低くなることが考えられている¹⁸⁾。よってこの知見を前立腺DCE-MRIに適用させると、本研究において高濃度造影剤早期相の造影効果が低くなったのは、高濃度の造影剤を使用したことでデッドスペースに停滞するガドリニウム量が多くなり、低速で造影剤を注入したことで大動脈内の造影剤置換率が低下し、造影剤容量が少なかったために下膀胱動脈より栄養される前立腺¹⁹⁾へ到達

Table 3 Injection protocols of this study and previous study¹²⁾

	This study		Previous study ¹²⁾	
	Gadobutrol	Gadopentetate dimeglumine Gadoterate meglumine	Gadobutrol	Gadopentetate dimeglumine
Concentration (mol/L)	1.0	0.5	1.0	0.5
Dosage (mL/kg)	0.1	0.2	0.1	0.2
Flow rate (mL/s)	1.5	3.0	2.0	4.0

できる造影剤の量が減少したからであると考えられる。一方、高濃度造影剤において、後期相の造影効果が高くなる傾向がみられたことについては、緒言にて述べたように、gadobutrol の r1 値が高いことによる優れた T₁ 短縮効果によるものであることが知られている^{10~12)}。

本研究と同様に前立腺 DCE-MRI における高濃度造影剤と低濃度造影剤の造影効果を比較検討した Durmus らの研究¹²⁾では、高濃度造影剤における早期相の造影効果の低下はみられず、すべての時相において低濃度造影剤に比べて高濃度造影剤のほうが有意に造影効果が高くなったと報告し、それは高濃度造影剤の優れた T₁ 短縮効果によるものであると考察している。この先行研究と本研究を比較した場合に、本研究における早期相の造影効果の低下に対して特に大きく影響を及ぼした要因として挙げられるのは、造影剤注入プロトコルの違いである。本研究と先行研究¹²⁾の造影剤注入プロトコルを Table 3 に示したが、本研究と先行研究で異なっている点は、造影剤の投与速度の違いのみである。よって高濃度造影剤を本研究のように 1.5 mL/s で注入した場合には上記の血液置換の均一性の低下がみられたが、先行研究のように 2.0 mL/s で注入した場合にはこの現象が起こらなかったか、あるいは gadobutrol の r1 高値による T₁ 短縮効果の促進により打ち消される程度であったため、早期相における造影効果の低下はみられなかったのではないかと推察できる。ただし、本研究と先行研究を比較する際には、対象とする患者群の違いや、RE 算出法などの解析方法の違い、更に使用した MR 装置の性能の差異による撮像条件の違いにも注意を払う必要がある。なかでも先行研究において時間分解能が 3.9 秒であることは大きな違いであり、先行研究のように時間分解能の優れたシーケンスで連続的に取得した計測データと、本研究のように早期相が造影剤注入後およそ 30 秒経過した時点における、時間分解能が 15 秒程度の計測データとでは、早期相における造影効果が少なからず異なることも予想される。

臨床においては、早期相の造影効果低下や立ち上が

り遅延によって、前立腺癌結節の早期濃染を視覚的に認識し難くなり、診断能を低下させる恐れがある。造影剤注入プロトコルにおける対策としては、前述の 2.0 mL/s 程度まで投与速度を速くすることや、後押し生理食塩水の投与速度を速くすることが挙げられる。生理食塩水高速注入の有用性については CT において報告されており、造影剤よりも高速で生理食塩水を注入すると、造影剤から生理食塩水に切り替わる時点での造影剤投与速度が速くなることで最大 CT 値が高くなり、更に実際の造影剤注入持続時間が短くなることで立ち上がり時間と造影効果持続時間が短くなるとされる²⁰⁾。一方で MRI における報告は少ない。よって生理食塩水の後押し速度の違いによる造影効果曲線の変化についても検討する余地があると考えられる。撮像方法における対策としては、造影剤の立ち上がり遅延により至適撮像タイミングが後ろにずれる可能性を考慮し、撮像開始時間を遅らせることや、腹部大動脈等のモニタリングによるボーラストラッキング法を用いることが挙げられる。しかしこれら撮像方法の変更では早期相の造影効果低下そのものを防ぐことはできないため、早期相の造影効果低下と立ち上がり遅延の両方を改善するためには、造影剤注入プロトコルを変更することが妥当であると考えられる。

本研究の限界としては、1 相の撮像時間が長いこと、Gleason score によるグレード分類を行っていないこと、正確な ROI 設定が困難であることの 3 点が挙げられる。1 点目の撮像時間の長さについては、使用した MR 装置の性能限界もあり、空間分解能と信号雑音比を腫瘍検出に十分な程度にまで保つために 1 相の撮像時間を 16.4 秒と比較的長く設定しているため、計測点が少なく、造影効果曲線の形状から造影剤到達時間の評価を行うことができなかった。2 点目のグレード分類については、今回調査した対象症例の中にはさまざまな組織学的グレードの腫瘍が混在していると思われるが、造影効果曲線の形状は腫瘍のグレードによって異なることが知られている¹²⁾。Gleason score によりこれらをグループ分けすることで、より正確な造影効果曲線の評価が可能となる。最後に、ROI 設定は

T₂強調画像などを参照しながらできる限り解剖学的に正しい位置に設定するよう努めたが、特に辺縁域は加齢による移行域の肥大により菲薄化していくため²¹⁾、直径10 pixel程度の小さなROIでも設定が難しくなる。正常辺縁域においては後期相の造影効果に有意差がみられなかったが、これはROI設定が正しく行われていないことによる影響である可能性も考えられる。

以上のように、前立腺DCE-MRIにおいて高濃度造影剤を使用した場合に造影早期の腫瘍濃染が視覚的に低く感じられたため検討を行った結果、定量的に造影効果が低くなっていることが確認された。その原因として造影剤注入プロトコルの影響が考えられた。高濃度造影剤の投与量と投与速度を従来造影剤の半分に設定するプロトコルを用いた際に、投与速度が1.5 mL/s

程度まで遅くなると、早期相の造影効果が従来造影剤よりも低くなってしまう可能性があるため、造影剤注入速度の設定には注意を要する。

4. 結 語

高濃度造影剤(gadobutrol)は従来の造影剤に比べ、高いr1値により優れた造影効果をもたらす。しかし本研究によって、高濃度造影剤の投与量(mL)と投与速度(mL/s)を単純に従来造影剤(0.5 mol/L)の半分に設定するプロトコルを用いた場合に、投与速度が1.5 mL/s程度まで遅くなると、早期相の造影効果が従来の造影剤よりも低くなることが示唆された。

なお、本研究の要旨は第45回日本放射線技術学会秋季学術大会(2017年、広島)にて発表した。

参考文献

- 1) 日本泌尿器科学会 編. 診断方法(マーカー, 画像, 生検). 前立腺癌診療ガイドライン 2016年版. メディカルレビュー社, 東京, 2016: 70-81.
- 2) 玉田 勉, 曾根照喜, 山本 亮, 他. 前立腺におけるマルチパラメトリックMRI. 画像診断の治療への貢献—CT/MRIを中心に— 8. 日獨医報 2015; 60(1): 89-106.
- 3) Pedler K, Kitzing YX, Varol C, et al. The current status of MRI in prostate cancer. Aust Fam Physician 2015; 44(4): 225-230.
- 4) Thompson LC, Pokorny MR. Multiparametric MRI in the diagnosis of prostate cancer - a generational change. Aust Fam Physician 2015; 44(8): 597-602.
- 5) Durmus T, Baur A, Hamm B. Multiparametric magnetic resonance imaging in the detection of prostate cancer. Rofo 2014; 186(3): 238-246.
- 6) Fusco R, Sansone M, Granata V, et al. A systematic review on multiparametric MR imaging in prostate cancer detection. Infect Agents Cancer 2017; 12: 57.
- 7) Hassanzadeh E, Glazer DI, Dunne RM, et al. Prostate imaging reporting and data system version 2 (PI-RADS v2): a pictorial review. Abdom Radiol (NY) 2017; 42(1): 278-289.
- 8) Tan CH, Hobbs BP, Wei W, et al. Dynamic contrast-enhanced MRI for the detection of prostate cancer: meta-analysis. AJR Am J Roentgenol 2015; 204(4): W439-448.
- 9) Rohrer M, Bauer H, Mintorovitch J, et al. Comparison of magnetic properties of MRI contrast media solutions at different magnetic field strengths. Invest Radiol 2005; 40(11): 715-724.
- 10) Hadizadeh DR, Von Falkenhausen M, Kukuk GM, et al. Contrast material for abdominal dynamic contrast-enhanced 3D MR angiography with parallel imaging: intraindividual equimolar comparison of a macrocyclic 1.0 M gadolinium chelate and a linear ionic 0.5 M gadolinium chelate. AJR Am J Roentgenol 2010; 194(3): 821-829.
- 11) Attenberger UI, Runge VM, Morelli JN, et al. Evaluation of gadobutrol, a macrocyclic, nonionic gadolinium chelate in a brain glioma model: comparison with gadoterate meglumine and gadopentetate dimeglumine at 1.5 T, combined with an assessment of field strength dependence, specifically 1.5 versus 3 T. J Magn Reson Imaging 2010; 31(3): 549-555.
- 12) Durmus T, Vollnberg B, Schwenke C, et al. Dynamic contrast enhanced MRI of the prostate: comparison of gadobutrol and Gd-DTPA. Rofo 2013; 185(9): 862-868.
- 13) Loewe C, Arnaiz J, Krause D, et al. MR angiography at 3 T of peripheral arterial disease: a randomized prospective comparison of gadoterate meglumine and gadobutrol. AJR Am J Roentgenol 2015; 204(6): 1311-1321.
- 14) 石田隆之 編. ImageJによる表示と操作. C言語で学ぶ医用画像処理. オーム社, 東京, 2006: 29-33.
- 15) 宮地利明 編. DCE-MRIにおける血流評価の応用. 標準MRIの評価と解析. オーム社, 東京, 2012: 127-129.
- 16) 佐久間肇. 心臓領域におけるMRI用造影剤の実際の使用方法. 日本医放会誌 2002; 62(12): 682-689.
- 17) シヤミマ スルタナ, 中山義晴, 林田佳子, 他. ヘリカルCTによる腹部のダイナミックCT: 高用量造影剤と高濃度造影剤の意義について. 映像情報 Med 2002; 34(10): 1022-1025.
- 18) 市川智章 編. 固定造影剤注入時間を用いたプロトコルにおける造影剤濃度の選択. CT造影理論. 医学書院, 東京, 2004: 158-162.
- 19) 河島長義. 前立腺の動脈造影に関する研究 第1編: 前立腺栄養血管の検討. 泌紀 1979; 25(4): 309-315.
- 20) 室賀浩二, 八町 淳, 大塚 亨, 他. 造影剤注入持続時間および生理食塩水後押し方法の違いにおける生理食塩水後押し効果の検討. 日放技学誌 2012; 68(6): 711-719.
- 21) 山下康行 編. 前立腺の解剖と鑑別. 知っておきたい泌尿器のCT・MRI. 学研メディカル秀潤社, 東京, 2008: 200-203.

問合先

〒004-8618 札幌市厚別区厚別中央2条6丁目2番1号
独立行政法人地域医療機能推進機構札幌北辰病院放射線部 牧野佑也