

「整形外科領域の撮影技術向上を目指して」

～診療に役立つ膝関節 CT のススメ～

上尾中央総合病院

井田 篤

1. はじめに

近年の CT 装置の進歩は著しく、各科領域において質の高い診断・治療を行うために、今や不可欠なものといっても過言ではない。整形外科領域においても無論同様であり、横断像、矢状断、冠状断といった多方向からの目的部位の評価や、XP 撮影では不明瞭で微細な骨折線や骨片の描出、さらには volume rendering 法を用いた画像構築による手術支援など、多岐に渡り CT は活躍している。従って、我々診療放射線技師が提供する画像は、常に診療補助の最適なツールでなければならない。本稿では、整形外科領域、中でも膝関節にフォーカスを当て、撮影法や画像構築法などから、診療に役立つ膝関節 CT を考えていく。

2. 膝関節 CT の意義

2-1 膝関節の解剖

膝関節は大腿と下腿の間にある荷重関節の一つであり、人体で最も大きな関節である。膝関節の構成要素は、大腿骨、脛骨、膝蓋骨の3つであり、大腿骨と脛骨の間にはクッションの役割をなす半月板が存在する。また、膝関節の安定性の供給と関節運動の中心軸を形成するために、ACL（前十字靭帯）、PCL（後十字靭帯）、MCL（内側側副靭帯）、LCL（外側側副靭帯）などがある。（図1）



図1 膝関節周囲の解剖

2-2 膝関節 CT の撮影意義

膝関節における CT 撮影では、微細な骨折線や骨形態などの描出が求められるが、膝関節周囲に生ずる疾患はさまざまであり、撮影法や再構成法、特に提供画像は多様である。そこで我々診療放射線技師が最重要視すべき点は、各疾患に応じた診療に最も役立つ画像の提供である。従って、提供画像に直結する撮影体位と撮影プロトコルを適切に選択する“撮影技術”と、各疾患の病態を把握する“医学的知識”を備える必要がある。

3. 撮影条件と撮影プロトコルの構築

3-1 撮影体位

検側の膝関節を伸展し、非検側は屈曲するように整位する。非検側を屈曲する事で、ストリークアーチファクトの軽減につながるが、屈曲した非検側の膝関節がガントリに接触する恐れがある為、寝台移動の際には十分に注意する必要がある。また、分解能向上の為、なるべく体全体を検側に寄せ、検側の膝関節をガントリ中心に配置する事が望ましい。（図2）



図2 膝関節撮影の撮影体位

3-2 撮影プロトコル

当院では、Revolution CT (GE 社製：256 列)、DiscoveryCT 750HD (GE 社製：64 列) が 2 台の計 3 台が稼働している。以下に、当院の膝関節 CT における撮影プロトコルを示す。(表 1)

表 1 当院における膝関節の撮影プロトコル

装置	Scan Type	Recon Type	Coverage (mm)	Thickness (mm)
Revoluton	Axial(1.0sec) One volume	Bone Plus	160	2.5
750HD	Helical(0.5sec) Pitch 0.516:1	Bone Plus	20	2.5

kV	mA (max mA)	N.I	ASiR-V(%) ASiR(%)	Recon Option
120	100	14	40	Full
120	150	14	60	Full

256 列数を搭載する Revolution CT においては、最大 160mm の One volume scan が可能になる。この事により、撮影時間が格段に向上し、motionartifact の軽減、また、ヘリカルスキャン時に生じるオーバーラップ部分の被ばくがなくなる為、被ばく低減にもつながる。

3-2-2 高分解能モードの選択

前項 (3-1) で前述したが、高分解能を担保するために、検側はガントリ中心に配置する事が望ましい。しかし、疼痛が強い患者や身体的に整位が難しい患者もいる。このように検側が off-center になってしまう場合、当院では高分解能モード (以下、Hi-Res Mode と示す) を積極的に選択している。Hi-Res Mode とは、X 線ビームに焦点偏向を使用するものであり、Normal Mode と比較し、およそ 2.5 倍の view 数を確保する事が可能になる。検側をガントリ中心に配置し、撮影を行う事が最も理想的であるが、物理的に不可能な場合でもこのようなモードを選択し、off-center でもガントリ中心時と同等の画像を獲得する工夫が重要であると言える。

4. 提出画像と統一化

4-1 提出画像

当院では、以下の画像の提出を行っている。

1. 横断像 (スライス厚：2.5mm)
2. 矢状断像 (スライス厚：2.5mm)
3. 冠状断像 (スライス厚：2.5mm)

4. VR 画像 (オーダーに応じて)

4-2 提出画像の統一化

当院では、約 25 名が CT 業務を担当しており、経験年数も数カ月から 15 年以上と幅広い。そのため、少なからず再構成画像の作成基準がまちまちとなってしまう現状があった。そこで、作成者間に関係なく、一律な画像を作成出来るようなマニュアルを運用している。(図 3,4)

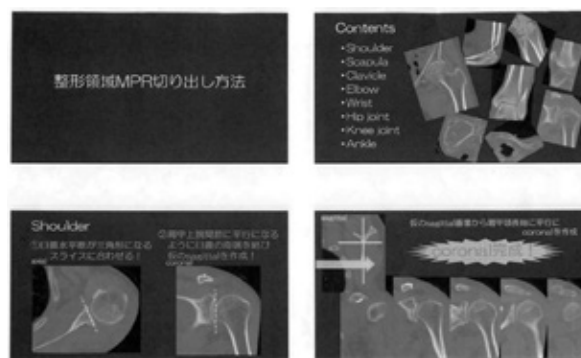


図 3 当院の MPR 切り出しマニュアル

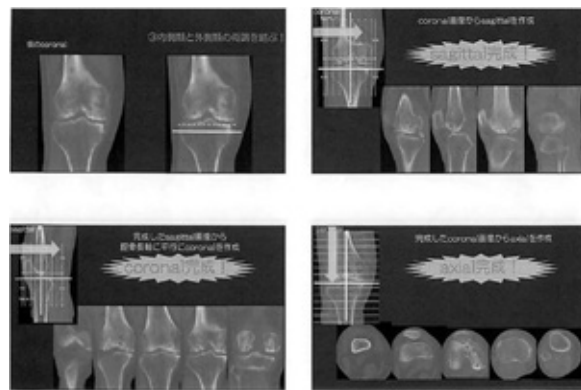


図 4 膝関節の MPR 切り出しマニュアル

このマニュアルは、整形外科領域における各部位と撮影目的に即した基準が明記されている。この事で、作成者間での画像の差異を無くし、診療に役立つ質の高い画像の提供を行う事が可能になる。

5. 各疾患とポイント

ここからは、各疾患の特徴と画像構築のポイントを示す。

5-1-1 変形性膝関節症

膝軟骨や半月板が、長期に亘りすり減る事で生

ずる病態の事を指す。筋力低下や加齢、肥満などにより膝関節の機能が低下し、関節軟骨がすり減る事で、痛みや運動障害を引き起こす。

5-1-2 撮影・画像構築のポイント

変形性膝関節症では、変形の進行具合を評価するために①骨棘が形成されているか、②骨硬化が起きているか、③関節の裂隙が狭小化しているか、といった、細かい所見を描出する事が求められる。そのため、骨棘などを観察できるように、矢状断像や冠状断像など多方向からの画像を作成する。また、関節の裂隙をより明瞭にするために、通常のVR画像に加え、下腿を透過させたVR画像も作成している。(図5)



図5 変形性膝関節症のVR画像

5-2-1 膝蓋骨骨折

膝関節を構成する膝蓋骨の骨折を指す。多くは直達性骨折によって起こり、受傷年齢は若年者から高齢者まで幅広いのも特徴の一つである。膝蓋骨骨折には、骨折の形態によって①縦骨折、②横骨折、③粉碎骨折の3つに分類される。

5-2-2 撮影・画像構築のポイント

膝蓋骨骨折では、強い疼痛と腫脹が特徴的であり、それに伴い膝を伸ばせなくなる症状も起きる。ここで、膝を無理に伸展させて整位を行うと、大腿四頭筋の収縮による骨片を引っ張る力と、膝蓋靭帯の牽引による作用で、骨折部がさらに離開してしまう。(図6)。従って、膝蓋骨骨折が疑われる場合は無理な整位を避けなければならない。

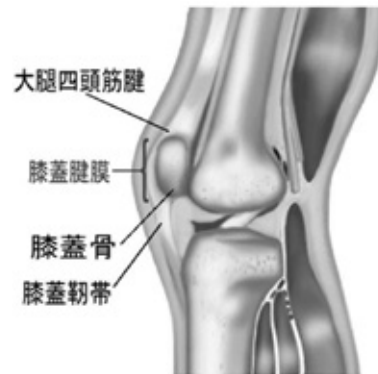


図6 膝蓋骨を支える周辺部位の解剖

前項(5-2-1)でも前述したが、膝蓋骨骨折は骨折の形態によって分類される。また、骨折によって発生した骨片、さらには関節内骨片の描出が重要となる。そのため、基本的な3方向からの画像はもちろんだが、VR画像の作成も有用である。

5-3-1 前十字靭帯断裂・損傷

前十字靭帯(Anterior Cruciate Ligament: 以下、ACL)は、大腿骨と脛骨を繋ぐ強力な靭帯であり、大腿骨に対して脛骨が前へ移動しない制御と捻った方向に対して動きすぎない制御を担う。ACLが断裂、損傷した場合、ACLの付着部である脛骨と大腿骨にトンネル(骨孔)を作成し、その中に腱を通し、両端をスクリューなどで固定する再建術(図7)が施行される。

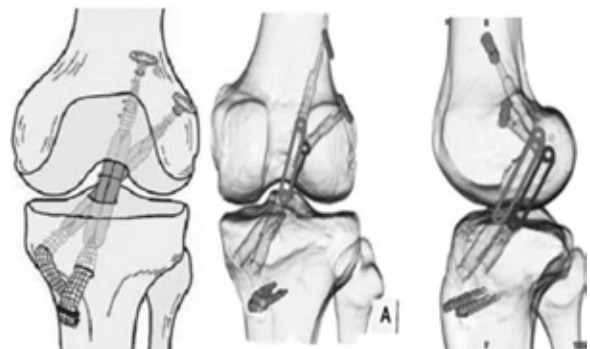


図7 ACL再建術とスクリュー留置位置

5-3-2 撮影・画像構築のポイント

靭帯の損傷具合などはCTではなく、MRIが選択される為、CTではACL再建術後の骨孔、留置したスクリューの位置確認の目的で活用される。そのため、外果の骨孔が見えるよう、大腿骨

を矢状面で切ったり、脛骨面の骨孔が見えるよう、大腿骨を透過させるなど工夫したVR画像を作成する。(図8)

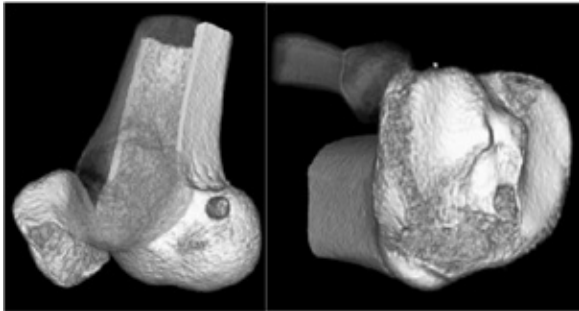


図8 ACL再建術後のVR画像

6. 膝関節 Dynamic 撮影

6-1 Dynamic 撮影とは

主に腹部領域などで一般的な撮影法であり、造影剤を急速静注し、同部位を多時相に分けて撮影を行う事で、経時的な変化を画像にするものである。しかし、膝関節におけるDynamic撮影は造影剤を使用せず、同体位、同条件下で膝の屈曲具合を変化させ、複数回撮影する。この事により、膝の屈曲具合による撮影部位の変化を捉える事が可能となる。

6-2 適応疾患

Dynamic撮影の適応疾患は膝蓋骨脱臼である。膝蓋骨脱臼は、膝蓋骨が膝蓋大腿関節から逸脱する事により生じる。外側脱臼の割合が高く、高確率で骨挫傷を伴う。

6-3 撮影・画像構築ポイント

6-3-1 撮影体位

膝の屈曲具合を完全伸展位(0°)、屈曲位(10°、20°)の3段階変化させ、撮影する。(図9)この時、屈曲角度ごとで下肢の内旋具合に差異が出ないように、注意をする。本撮影では、撮影体位が最も重要となるため、当院では撮影補助具を使用している。(図10)下肢を正確に伸展するための背板、屈曲角度を決定する発泡スチロール、体動抑制のタオルを使用する。

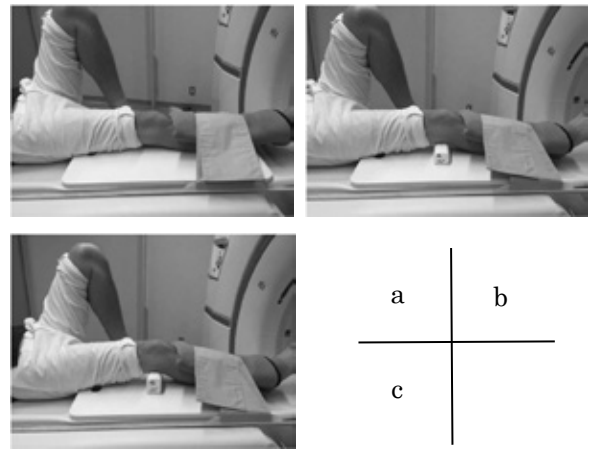


図9 撮影体位/屈曲度0° (a) 屈曲度10° (b) 屈曲度20° (c)



図10 撮影補助具

6-3-2 画像の特徴とポイント

膝関節脱臼では、屈曲角度の増加に伴い膝蓋骨が外側へ変位していく(図11)それと同時に、脱臼の際に生じた挫傷痕にも着目する必要がある。

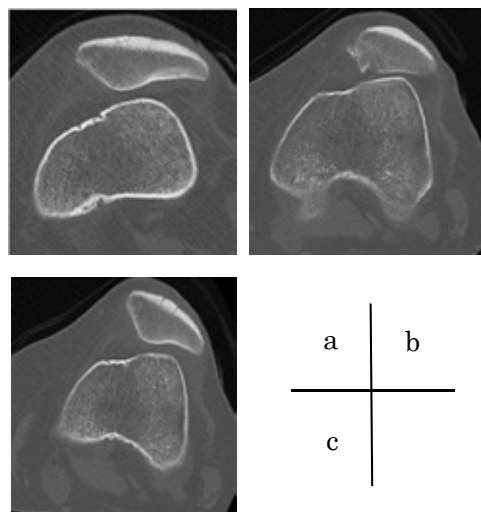


図11 撮影画像/屈曲度0° (a) 屈曲度10° (b) 屈曲度20° (c)

7. さいごに

ひとえに膝関節 CT といっても、病態はさまざまであり、治療計画や評価に必要な画像もさまざまである。

従って、常に診療に役立つ画像を提供する為には病態、術式を学び、提出画像の統一化を図る事が重要となる。膝関節 CT に留まらず、質の高い画像を提供する事は、診療放射線技師の責務であり、常に意識しなければならない事である。本稿の内容が、日々の検査の一助になれば幸いである。

8. 参考文献

1. 入門人体解剖学 改訂 4 版
藤田恒夫 著 南江堂
2. X 線 CT 撮影における標準化「～ガイドライン GuLACTIC～」
公益社団法人 日本放射線技術学会
3. 前十字靭帯 (ACL) 損傷診療ガイドライン 2012
日本整形外科学会 監修 南江堂

「膝関節立位荷重撮影について」

～画像所見の取り方から撮影条件の最適化まで～

渋江 美美香

1. はじめに

高齢化社会を迎え、骨関節の加齢変化を基盤とした変形性膝関節症（osteoarthritis：OA）は増加傾向にあり、整形外科診療において最も多い疾患といえる。膝関節立位荷重撮影は変形性膝関節症などの診断に欠かせない撮影法の一つである。

膝関節立位荷重撮影は、非荷重時では描出し得ない関節間隙の狭小化を描出し、下腿アライメントの変化を捉えることが可能である。

本稿では膝関節立位荷重撮影の撮影時の注意点と画像所見の撮り方、当院での撮影条件の設定について紹介する。

2. 撮影方法

2-1. 正面撮影

検側下肢の膝関節を中心に下肢全体が、正面に位置するように体位をとる。

特に変形性膝関節症の人は下腿軸が内側変形していることが多いため下腿軸だけでなく下肢全体を正面に整位するよう注意が必要である。

荷重方法には、いくつか種類があり、非検側に宙に浮き、完全な片脚立位で最大荷重とする肢位（図 1.a）、非検側下肢を足台に乗せる肢位（図 1.b）、両足立位で検側に荷重を移動する肢位（図 1.c）、両足に荷重を分散する肢位（図 1.d）がある。

画像としては最大荷重となる完全な片脚立位（図 1.a）が望ましいがふらつきや転倒のリスクが高まる荷重方法であるため、完全な片脚立位が難しい患者に対しては、両足立位に切り替えるなどの判断が必要である。

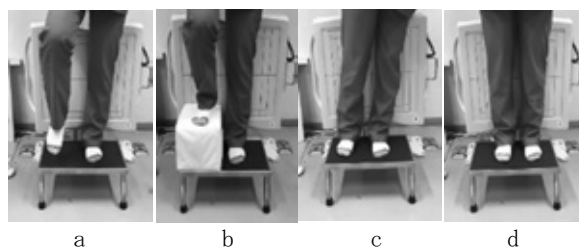


図1 正面撮影荷重方法

2-2. 側面撮影

膝関節を中心とし軽度屈曲位をとる。側面像では、関節間隙の程度から膝蓋骨面と大腿骨顆部の間隙を観察する。

側面撮影の荷重方法にも種類があり、両足に荷重を分散する肢位（図 2.a）、非検側下肢を前方に出す肢位（図 2.b）がある。側面撮影も正面撮影時同様患者の状態によって使い分ける必要がある。

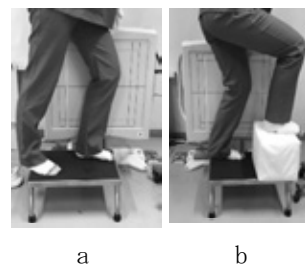


図2 側面撮影荷重方法

3. 有用疾患

3-1. 変形性膝関節症

変形性膝関節症とは、関節軟骨の老化によることが多い。加齢によって、関節軟骨が弾力性を失い、その状態で負荷がかかる事で摩擦し、関節が変形する疾患である。また、肥満や素因（遺伝子）も関与しており、骨折、靭帯や半月板損傷などの外傷、化膿性関節炎などの感染の後遺症として発症することもある。

男女比は1：4で女性に多くみられ、高齢者になるほど罹患率は高く、主な症状としては膝の痛みがあげられる。

変形性膝関節症の分類方法として kelling-lawrence 分類 (図 3) があり、正常をグレード 0、軟骨がすり減り骨が直接ぶつかっている状態をグレード 1、関節裂隙が 3 ミリ以下にすり減った状態をグレード 2、関節裂隙の閉鎖または亜脱臼状態をグレード 3、荷重面の摩耗や欠損が生じその程度が 5 ミリ以下の状態をグレード 4、摩耗の程度が 5 ミリ以上の状態をグレード 5 と分類される。

このうちグレード 2 以上を変形性膝関節症として診断され多くはグレード 3 以上で手術適応となる。

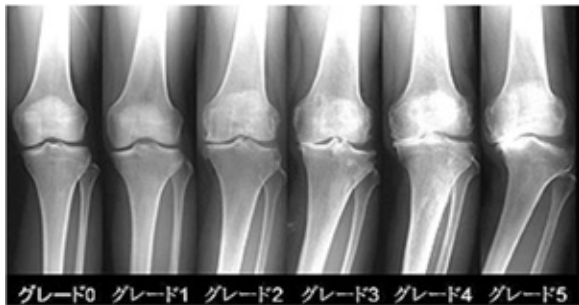


図 3 kelling-lawrence 分類

変形性膝関節症を診断する際、一般撮影では軟骨は写らないため、骨と骨の隙間から軟骨の厚さを判断する。さらに変形性膝関節症では、骨棘 (図 4.a ➡) や骨硬化像 (図 4.a ○) がみられる。骨棘は軟骨が摩耗し、骨同士が直接ぶつかり合う事で、微細な骨折や骨硬化の修復が過剰に行われた結果生じる。また、一般的に多い内側変形の場合はグレードが上がるにつれて下腿軸が内側に変形していくところも特徴の一つとなる。(図 4.a)

3.2. 関節リウマチ

関節リウマチとは、関節が炎症を起こし、軟骨や骨が破壊されて関節の機能が損なわれ、放っておくと関節が変形してしまう疾患である。

他の関節の病気とは異なり、腫れや激しい痛みを伴い、関節を動かさなくても痛みが生じる。手足の関節で起こりやすく、左右の関節で同時に症状が生じやすいことも特徴となる。その他にも発熱、体力低下の傾向、食欲減退などの全身症状が生じ、関節の炎症が肺や血管など全身に広がることもある。

関節リウマチを診断する際、関節周囲の骨粗鬆所見、関節の隙間の狭小化 (図 4.b ○)、骨びら

ん (図 4.b ➡) などがみられる。変形性膝関節症とは異なり、内側外側ともに均等に狭くなるのが特徴である。(図 4.b)

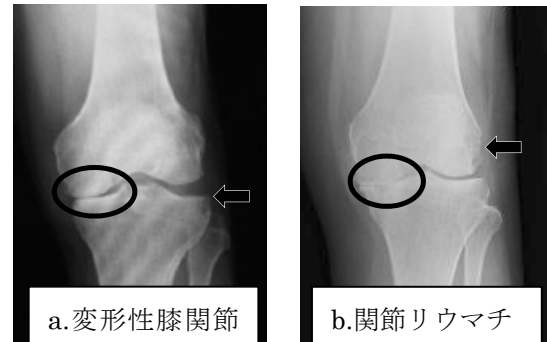


図 4 変形性膝関節症と関節リウマチ

3.3. 変形性膝関節症と関節リウマチの見分け方

変形性膝関節症の場合は、図 5.a 上の膝関節内側の隙間が、外側に比べて狭くなっている。これは、立った時や歩くときに内側に体重の負荷がかかりやすいので、徐々に軟骨が減ってきているものと考えられている。また、図 5.a で下腿骨に沿って引かれている線は下腿骨軸を示しており、少し内側に傾いている。

一方、関節リウマチの場合は、図 5.b 上の膝関節内側と外側共に隙間が狭くなっている。これは、内側と外側の軟骨が破壊されつつあると考えられている。また、内側部分で、写真濃度低下領域が確認できる。これは骨の一部も破壊されつつある証である。膝を全体的にみると、内側変形の傾向も少ないようである。

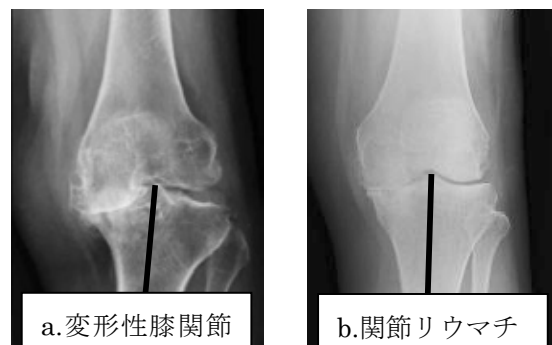


図 5 変形性膝関節症と関節リウマチの見分け方

4. 治療方針

変形性膝関節症と関節リウマチの治療の中には外科的手術による高位脛骨骨切り術や人工関節置換術などがある。この治療の適応を決める基準と

して大腿骨脛骨角 (femoro-tibial-angle : FTA) (図6) がある。大腿骨脛骨角とは、大腿骨と脛骨のなす角度のことをいい、大腿骨軸と脛骨軸に線を引き、その交点の外側角度を表す。大腿骨脛骨角の計測により、膝関節が内反 (O脚) しているのか、外反 (X脚) しているのかがわかる。大腿骨脛骨角の正常角度は男性 178°、女性 176°といわれている。この角度が 180°より大きいものを内反膝 (O脚)、170°より小さいものを外反膝 (X脚) という。

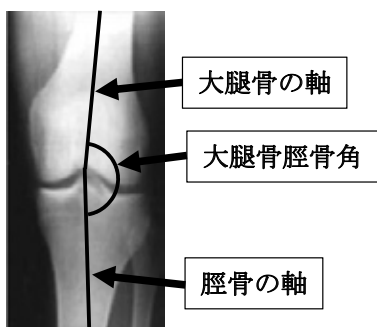


図6 大腿骨脛骨角 (femoro-tibial-angle : FTA)

5. 撮影条件の最適化

当院では、カセットホルダーを使用して臥位と同条件で撮影を行っていたが、機器更新により立位ブッキーが変更になり、カセットホルダーの装着ができなくなったため立位ブッキーを用いての条件設定を行った。

現在、グリッド比 10 : 1、集束距離は 180cm の立位ブッキーを使用している。そこで、入射表面線量と CNR、IQF を用いて、臥位での撮影と同等画質を得られる撮影条件を検討した結果 70kVp、7.1mAs となった。

臥位での撮影と立位ブッキーを使用した画像を

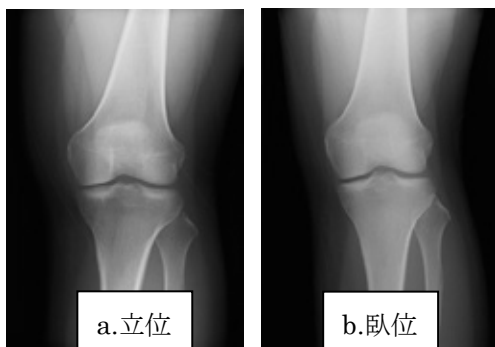


図7 立位・臥位比較画像

比較すると (図7)、両者とも関節腔や骨質が明瞭に描出された。

6. さいごに

今日では技術が発達し CT や MRI など、より詳細な画像を描出できる検査機器が多く開発されているが、人本来の姿勢である立位の状態を検査できるのは唯一一般撮影だけである。故に、今回の膝関節撮影のように人体に自然な負荷をかけた状態で撮影することができる一般撮影は、今もなお有用な検査方法であると考えられる。

「病変把握がポイント！手関節 MRI」

埼玉医科大学病院
堀切 直也

1. はじめに

手関節の MRI では臨床的に想定される疾患に応じて至適な撮影法が大きく異なる。至適なシーケンスを選択するには、依頼医師が疑っている疾患を踏まえて、どのような画像が必要なかを把握し撮影する事が重要となる。特に手関節は微細な構造の評価が必要な疾患もあり、断面の選択のみならずスライス厚や撮像範囲の適切な選択も重要となる。

本稿では、手関節 MRI のポイントに加えて病変把握のポイントも挙げ、依頼医師が画像でみたい所を把握でき撮像へフィードバックができることを目的とする。また、当院で行われている精査を目的とした撮像シーケンスの紹介も行う。

2. 手関節の概論

2.1. 手関節とは

手関節は手の動きとともに指の動きを調整する重要な関節である。手関節は多くの骨により構成されており、加えてきわめて複雑な構造を有している関節であり、診断を困難としている。

2.2. 症状

手関節疾患の症状としては、手関節痛、運動制限、腫脹・熱感・発赤の有無、握力低下などがある。

- 手関節痛：運動時の痛みであればどの方向に動かした時に、どの部位に痛みがあるか、安静時の痛みがあるか。
- 運動制限：どの方向の運動が最も制限されているか。

2.3. 診断

一般的に手関節痛の診断では重要なランドマー

ク（目印となる部位）を触診・視診により確認し進めていき、その後画像診断へと移行する流れとなる。

3. 手関節の画像診断

3.1. 単純 X 線撮影

骨疾患の除外のためには基本となる画像である。正側 2 方向撮影が基本であり、手根骨の配列（正面像の Gilula's lines、側面像の DISI 変形、VISI 変形、尺骨の突き上げ（バリエーション）、骨折線の有無、石灰化、骨化の有無を確認する。

3.2. CT 検査

任意の再構成画像が得られ、3D 画像も容易に作成でき、骨折・変形など術前の手術計画にはなくてはならないモダリティとなっている。

3.3. MRI 検査

非侵襲的かつ質的診断が可能で詳細な骨軟部疾患の画像が得られることは整形外科分野において無くてはならないモダリティとなっている。

3.4. 関節造影検査、超音波検査、核医学検査など

4. 手関節 MRI の撮像

4.1. コイル

- 手関節専用コイル
- 汎用サーフェスコイル

4.2. 撮像体位

当院ではシーメンス社製 3T MRI MAGNETOM Skyra を使用し手関節専用コイルを用いて撮像を行っている。（図 1）

仰臥位にて手を立てた状態（手刀の形）でコイルに固定し可能な限り中心にコイルが位置するようにしている。参考書によっては腹臥位にて手を

頭の上に挙上した状態（superman position）でのポジショニングを紹介していることもある。



図1 手関節専用コイル

4.3. シーケンス

プロトン密度強調画像、T1 強調画像、T2 強調画像、T2* 強調画像が主に使われる。脂肪抑制法も適宜併用する。今回は特に靭帯・関節軟骨・関節唇の描出におけるシーケンス選択について記載する。

4.3.1.

① T1 強調画像を撮るならプロトン密度強調画像に近い画像を！

- T1 強調画像よりプロトン強調画像では周囲の靭帯・軟骨・関節液とのコントラストが付きやすい。
- TR を 1000 ~ 2000ms、TE を 20 ~ 40ms。
- ETL はブレを防止するために最大でも 5 ~ 6 に抑える。

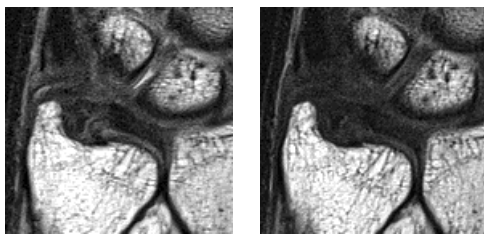


図2 PDWI (左) と T1WI (右)

4.3.2.

① T2* 強調画像は高分解能画像として有効である！

- T2* 強調画像は靭帯の変性・断裂に有用でありコントラストが高く微細病変の描出に非常に有用である。
- 関節液と軟骨、関節液と関節唇とのコントラストが良好である。

- 3D 撮像も含め、短時間かつ高分解能な画像の獲得に威力を発揮する。

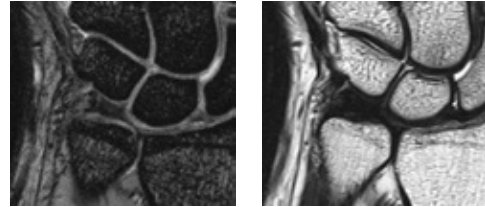


図3 T2*WI (左) と T2WI (右)

4.3.3.

① 靭帯の変性・断裂の描出において使用する脂肪抑制画像は？

- 当院では靭帯の変性・断裂の描出において使用する脂肪抑制像はプロトン密度強調画像の脂肪抑制像を使用している。
- 脂肪抑制画像である STIR では SN の低下や血管の高信号が問題となってくる。このため当院では磁場の不均一時などに使用するオプションの撮像としている。

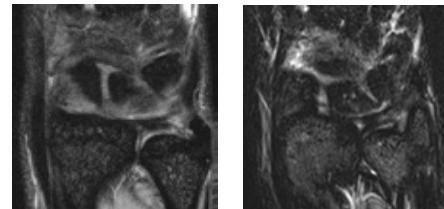


図4 PDWI-fs (左) と STIR (右)

4.4. スライス厚

- 先にも述べたとおり、手関節は TFCC をはじめとして微細な構造の評価が必要な疾患がありスライス厚の選択も重要となる。
- スライス厚は画質を担保できる可能な限り薄いスライス厚が靭帯の評価に有用である。
- 当院では TFCC の描出において 1.5mm のスライス厚を使用している。

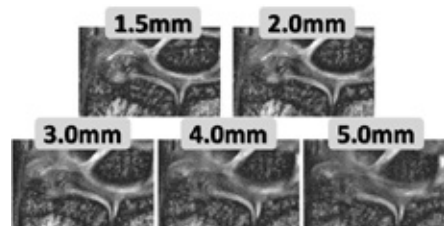


図5 スライス厚による TFCC 描出の違い

5. 手関節 MRI の症例

今回は手関節痛をきたす代表疾患の中でも特に当院にて撮像件数が多い5つの疾患に焦点を当て各疾患について記載する。

5.1. 舟状骨骨折

5.1.1. 正常解剖

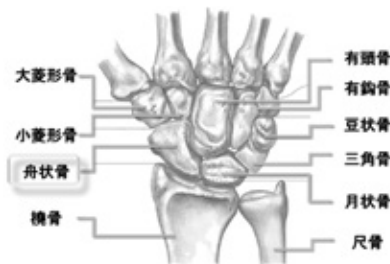


図6 舟状骨の解剖図

5.1.2. どんな疾患？

- 手根骨骨折の約70%が舟状骨骨折である。
- 初期に発見しにくい。
- 血行が悪いため癒合しにくく偽関節になりやすい。
- 治療する段階で約半数が既に偽関節となっている。
- 若い人に多い。(高齢の方が手をつくると橈骨遠位端骨折になりやすい。)

5.1.3. きっかけは？

- 転倒時に手をつくことで生じる。
- 手首を反る頻度が高いスポーツに多い。

5.1.4. 症状は？

- 手首を動かした時の痛みや握力低下。
- 嗅ぎタバコ窩の痛み。(図7)



図7 嗅ぎタバコ窩

5.1.5. 病期が進むと？

- 急性期を過ぎると痛みが軽減する。
- 陳旧化し偽関節になっていくと可動域制限が生じ安静時でも滑膜炎による痛みが生じる。
- さらに経過すると手根骨の配列異常 (DISI変形) を生じる。

- 最後には手関節全体の変形性関節症 (SNAC wrist) に移行する。

5.1.6. 画像診断

単純X線撮影 初期の骨折であると骨折線が写らないことがある。数週後に再度撮影すると骨吸収のため骨折が明らかになる。

CT検査 骨折診断、骨癒合の評価、転位や骨片の評価に有用である。多断面像や3D像により転位を正確に判定できる。

MRI検査 舟状骨骨折の早期診断に最も有用な検査である。X線で診断困難であっても骨折線をとらえられ骨折に至らない骨挫傷も描出できる。

5.1.7. 分類

Herbert分類

Type A：新鮮安定型骨折

Type B：新鮮不安定型骨折

Type C：遅延治癒

Type D：偽関節

Typeの中の値 (1~5)の違い

骨折の位置、脱臼の有無、転位・動きの有無、偽関節の種類 (線維性 or 骨硬化性)

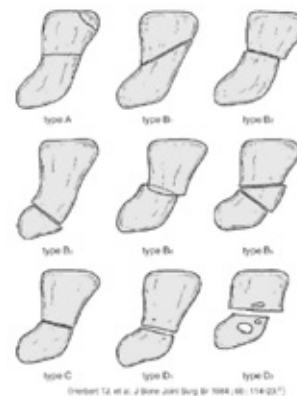


図8 Herbert分類

5.1.8. 当院のシーケンス

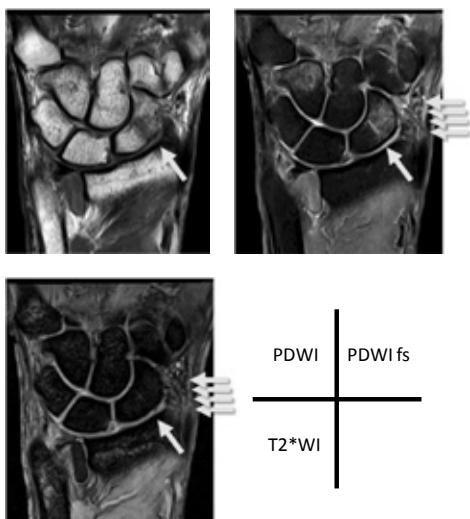
表1 舟状骨 MRI ルーチン

	Orientation	FOV	Thickness	Pixel Size	Time
PDW I	Coronal	100mm	3.0mm	0.2×0.2	4:18
PDW Ifs	Coronal	100mm	3.0mm	0.2×0.2	4:24
T2*W I	Coronal	100mm	3.0mm	0.2×0.2	5:58
T2*W I	Sagittal	100mm	3.0mm	0.2×0.2	5:58
T1W I	Transverse	100mm	3.0mm	0.3×0.3	2:41

5.1.9. 症例

依頼目的 左舟状骨骨折および橈骨遠位端骨折の合併の検索。

Key 画像



レポート 左舟状骨の中央部に横断性の骨折を認め、外側部に PDWI-fs で不均一な高信号が見られる。骨折周囲の軟部組織に PDWI 及び T2WI で高信号域を認め、浮腫を示唆する所見である。

診断 左舟状骨骨折。橈骨遠位端骨折の合併なし。

5.2. Kienbock 病 (キーンバック病)

5.2.1. 正常解剖

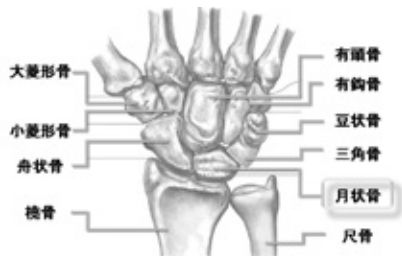


図9 月状骨の解剖図

5.2.2. どんな疾患?

- 月状骨の骨萎縮・骨硬化・圧排・分節化をきたす。
- 何らかの反復性小外傷による虚血性変化が原因と考えられる。
- 利き手側に好発する特徴がある。

5.2.3. きっかけは?

- 大工など手を酷使する職業の人に多い。
- 若年者や高齢の女性に発症することもあり、若年者では明らかな外傷を契機としており月状骨骨折との関連が指摘されている。

5.2.4. 症状は?

- 手関節背部の圧痛や運動時の痛みがある。
- 痛みは激烈なものではなく、労作時の鈍痛が多い。
- 外傷が契機の場合は痛みが強い。

5.2.5. 病期が進むと?

外傷が契機の場合は痛みが強く病期の進行が速く、可動域制限や握力低下が進行していく。

5.2.6. 画像診断

単純 X 線撮影 Lichtman の stage 分類の病期に従った萎縮・硬化・圧潰の所見を呈する。stage I では異常所見が認められない。

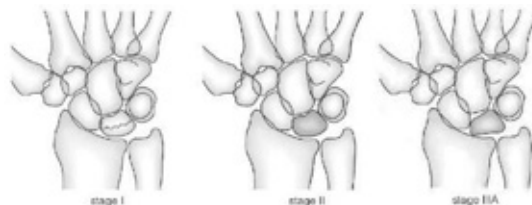
CT 検査 形状の評価に有用。

MRI 検査 Lichtman 分類 stage I において T1 強調画像にて低信号域を認められる。

5.2.7. 分類

Lichtman 分類

- stage I : X 線上では異常がなく MRI や骨シンチで診断可能
- stage II : 萎縮や硬化像を認めるが圧潰はない時期
- stage III : 圧潰や分節化を認める時期
- stage IV : 月状骨周囲に関節症変化を認める時期



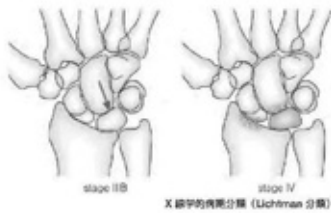


図11 Lichtman分類

5.2.8. 当院のシーケンス

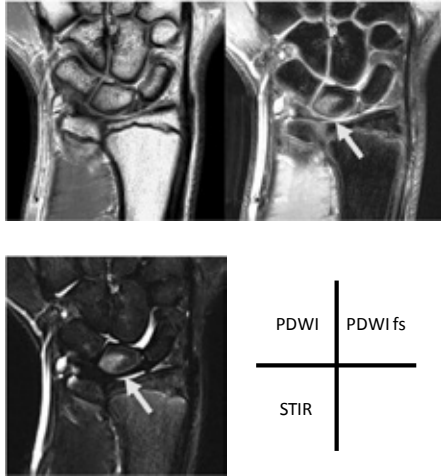
表2 Kienbock病 MRI ルーチン

	Orientation	FOV	Thickness	Pixel Size	Time
PDW I	Coronal	100mm	3.0mm	0.2×0.2	4:18
PDW Ifs	Coronal	100mm	3.0mm	0.2×0.2	4:24
T2*WI	Transverse	100mm	3.0mm	0.2×0.2	5:52
T2*WI	Sagittal	100mm	3.0mm	0.2×0.2	5:58
T2-STR	Coronal	100mm	3.0mm	0.4×0.4	5:28

5.2.9. 症例

依頼目的 左手関節痛。Kienbock病やオカルト
 ガングリオンなどの検索。

Key 画像



レポート 月状骨に高信号域を認める。骨の萎縮
 はない、もしくはあってもわずかである。初期の
 Kienbock病に矛盾しない。手関節部や手根骨部
 に少量の液体貯留がある。ガングリオンを疑う所
 見はない。

診断 初期の Kienbock 病。

5.3. TFCC 損傷

TFCC とは関節円板と半月板（メニスカル）
 類似体と周辺の靭帯の総称を指し、三角線維軟骨

複合体とよぶ。（Triangular Fibrocartilage
 Complex）

5.3.1. 正常解剖

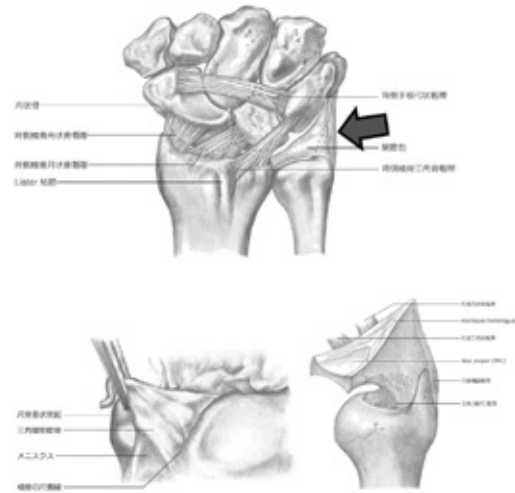


図12 TFCCの解剖図

5.3.2. どんな疾患？

三角線維軟骨複合体（TFCC）の変性・靭帯断
 裂・穿孔・高度の変性断裂をきたす。

5.3.3. きっかけは？

- 外傷性損傷および加齢変性に伴って発生する
 頻度が高い。
- 尺骨の相対長が橈骨よりも長い plus variance
 を呈する尺骨突き上げ症候群に併発するこ
 とが多い。

5.3.4. 症状は？

- 尺側部の痛みは安静時痛及び運動痛がある。
 とくにタオルを絞る動作、ドアノブを回す動
 作など手首をひねる動作にて疼痛を訴える。
- 回内回外の可動域制限が 10～20° 生じる。

5.3.5. 病期が進むと？

回内回外の運動がほとんどできなくなり、重度
 になってくると手を使ってものを渡す際に手が抜
 ける感じ（stack）を呈する。

回内回外の動作以外ではあまり疼痛がないこと
 も特徴である。

5.3.6. 画像診断

単純 X 線撮影 靭帯の損傷に伴い橈尺間の関節裂
 隙が開大し橈尺関節解離を生じる。

回内回外も撮影し健側よりも開大している場合は陽性と判断する。



図13 TFCC 損傷時の単純 X 線像

MRI 検査 SE 系の T1 強調や T2 強調では TFCC の描出は困難。脂肪抑制 T1 強調や GRE 系の T2* 強調が有用である。

5.3.7. 当院のシーケンス

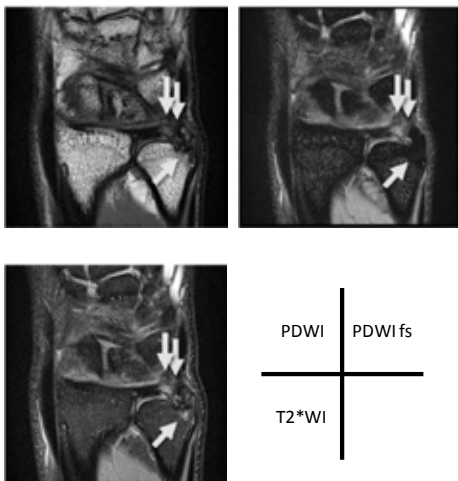
表3 TFCC 損傷 MRI ルーチン

	Orientation	FOV	Thickness	Pixel Size	Time
PDW I	Coronal	70mm	1.5mm	0.2×0.2	3:05
PDW I fs	Coronal	70mm	1.5mm	0.2×0.2	3:31
T2*W I	Coronal	70mm	1.5mm	0.2×0.2	4:44
T2*W I	Transverse	70mm	1.5mm	0.2×0.2	3:56
PDW I fs	Sagittal	70mm	1.5mm	0.2×0.2	3:38

5.3.8. 症例

依頼目的 右茎状突起の骨折後。TFCC 損傷の疑い。

Key 画像



レポート TFCC は PDWI 及び T2*WI にて高信号を示し境界が全体に不明瞭となっている。TFCC 損傷に矛盾しない。茎状突起皮質や骨髓の異常信号があり骨折後と思われる。

診断 TFCC 損傷。尺骨茎状突起の骨折後。

ガングリオンとは？

骨間靭帯、関節包、腱鞘から発生する囊腫様腫瘍で無色透明のゼリー状の液体を含んでいるもの。手に発生する腫瘍の中では最も頻度が高く、手関節の背側中央、掌橈側、指屈筋腱鞘が好発部位である。また体表面から見えないガングリオンをオカルトガングリオンという。



図14 ガングリオンの発生頻度

5.4. 手根管症候群

5.4.1. 正常解剖

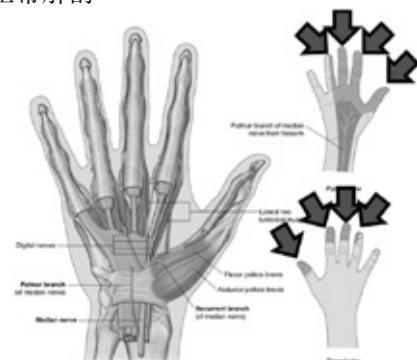


図15 手根管症候群により痺れを感じる部位

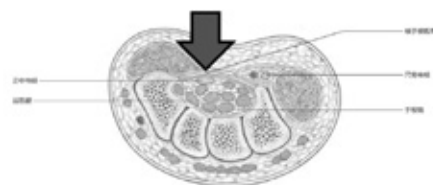


図16 正中神経

5.4.2. どんな疾患？

手指のしびれや疼痛を主訴とする絞扼性神経障害で上下肢の絞扼性神経障害の中では最も多い疾患である。手根管の中を走行する正中神経が絞扼されるために生じる。

5.4.3. きっかけは？

特発性 本症の多くは原因が解明されていないもの。

長期透析 10年以上の透析ではアミロイド沈着により生じる。

占拠性病変 頻度は低いがガングリオンや腫瘍により生じる。

外傷 橈骨遠位端骨折後や手関節外傷によって生じる。

腱滑膜炎 滑膜炎に伴ったものがある。

妊娠、内分泌疾患、Kienbock病なども原因。

5.4.4. 症状は？

- 主訴はしびれ感や疼痛であり、しびれを感じるのには正中神経領域であるが全てがしびれていると感じることもある。
- 一般的には中指と環指のしびれが強い、これは第3指間の神経束が最も拳側に位置するため自転車のハンドル、傘を持つ、電話の受話器を持つなどの動作によりしびれ感が増強することもある。

5.4.5. 病期が進むと？

重症化すると母指球筋の麻痺により母子の筋力が低下し運動障害が出現する。コインがつかみにくい、ボタンが留めにくい、箸が使いにくいなどの症状が現れる。

5.4.6. 画像診断

単純X線撮影 橈骨遠位端骨折、月状骨脱臼などの外傷が分かる。石灰化沈着、Kienbock病なども異常所見が見られる。特に手根管撮影は診断的意義が高い。

MRI検査 占拠性病変、とくにガングリオンでは診断的価値が高い。

5.4.7. 当院のシーケンス

表4 手根管症候群 MRI ルーチン

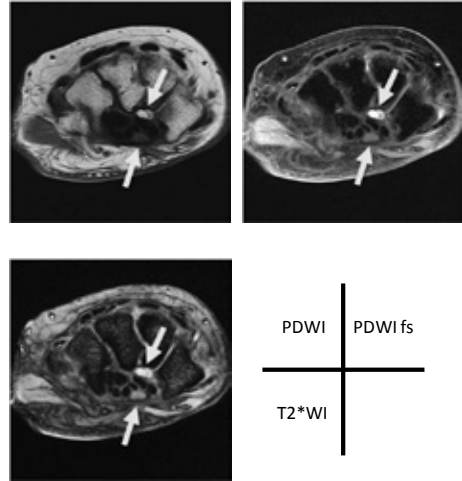
	O rientation	F OV	Th ickness	P ix e S ize	T ime
PDW I	Transverse	100mm	3.0mm	0.2×0.2	4:18
PDW I fs	Transverse	100mm	3.0mm	0.2×0.2	4:24
T2*W I	Transverse	100mm	3.0mm	0.2×0.2	5:41
T2*W I	Sagittal	100mm	3.0mm	0.2×0.2	5:58
PDW I fs	Coronal	100mm	3.0mm	0.2×0.2	4:24

5.4.8. 症例

依頼目的 示指の手根管と A1 プーリーの間の屈

筋腱に沿って疼痛あり。腫瘍炎症の検索。

Key 画像



レポート 正中神経の近位部での軽度拡大と遠位部での扁平化があり手根管症候群を考える。このレベルの屈曲腱に接して直径5mmのT2高信号域を認める。ガングリオンを考える。

診断 手根管症候群：ガングリオン

5.5. Guyon 管症候群

5.5.1. 正常解剖

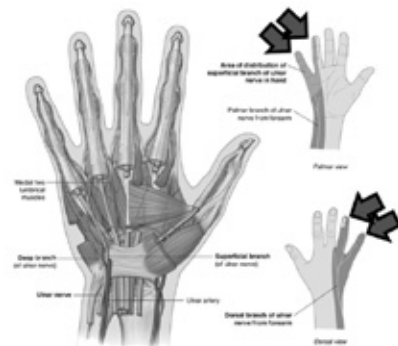


図17 Guyon 管症候群により痺れを感じる部位

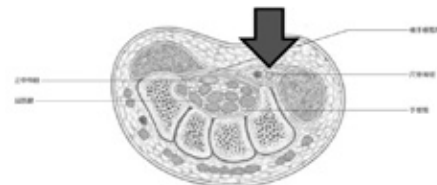


図18 尺骨神経

5.5.2. どんな疾患？

尺骨管（Guyon 管）において何らかの原因で尺骨神経に障害が発生し尺骨神経麻痺を呈する。

尺骨神経麻痺を呈する疾患の中で代表的なものは肘部管症候群であるが、これよりは頻度は低い。

5.5.3. きっかけは？

占拠性病変 本症の原因ではガングリオンが最も多く、脂肪腫、偽性動脈瘤、破格筋などもある。

圧迫 慢性小外傷による小指球部の圧迫、小指球でドライバーを押し付ける、蕎麦を打つなどの行為や自転車のグリップによる圧迫 (cyclist's palsy) とも関連がある。

外傷 転倒時に手掌尺側への直達外力による麻痺。

5.5.4. 症状は？

感覚麻痺 小指と環指尺側にしびれを訴える。手背に感覚障害を訴えることはない。

運動麻痺 箸が使いにくい、ボタンが留めにくいなどの訴えがある。

5.5.5. 画像診断

単純 X 線撮影 手根管撮影による有鉤骨の骨折や豆状骨の骨折に有用である。

CT 検査 発症原因である有鉤骨の骨折や豆状骨の骨折の判断に有用である。

MRI 検査 ガングリオンの診断が可能である。体表からは触知できない小さい病変も捉えることが可能である。

5.5.6. 当院のシーケンス

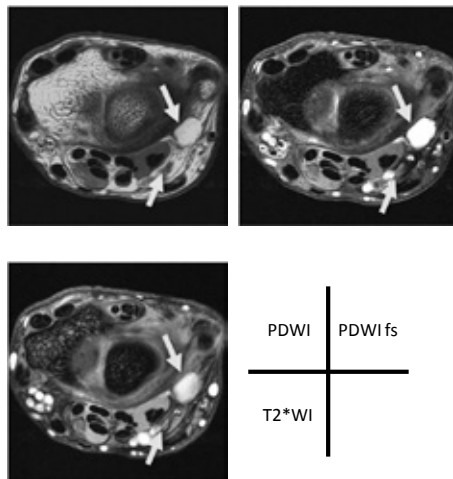
表 5 Guyon 管症候群 MRI ルーチン (占拠性病変：ガングリオン)

	Orientation	FOV	Thickness	Pixel Size	Time
PDW I	Transverse	100mm	3.0mm	0.2×0.2	4:18
PDW Ifs	Transverse	100mm	3.0mm	0.2×0.2	4:24
PDW I	Coronal	100mm	3.0mm	0.2×0.3	4:18
Diffusion	Coronal	100mm	3.0mm	0.8×0.8	2:23
T2*WI	Sagittal	100mm	3.0mm	0.2×0.2	5:58
T1WI	Sagittal	100mm	3.0mm	0.3×0.3	2:41

5.5.7. 症例

依頼目的 右ギオン管症候群の疑い。占拠性病変の検索。

Key 画像



レポート 尺骨頭、三角骨、豆状骨に囲まれた部位に径 10mm 程の嚢胞性病変を認めガングリオンを疑う。直接の接触は無いが尺骨神経は軽度圧排されており、ギオン管症候群の所見としても矛盾しない。

診断 右ギオン管症候群の疑い

6. さいごに

手関節の MRI では微細な構造の評価が必要な疾患もあり臨床的に想定される疾患に応じて撮影法が異なるため至適なシーケンスを選択することが重要となってくる。いずれの検査にも当てはまることであるが、依頼医師が疑っている疾患を把握し、また患者さんと症状についてコミュニケーションを図ることで、より正確で良い検査へとつながると考えられる。また近日さまざまな高速撮像技術が実用化されており、短時間で解像度の高い 3D 撮像も実現可能となりつつあるため、今後検討を行っていきたいと思う。

本稿でまとめた手関節 MRI のポイントが明日からの業務の一助になれば幸いである。

7. 参考文献

- 新津 守. 関節 MRI 撮像のコツとアトラス. メジカルビュー社. 2006 年
- 土屋弘行. 今日の整形外科治療指針第 7 版 医学書院. 2016 年

「MRI の性能評価」

～ SNR の測定方法～

済生会栗橋病院¹⁾，獨協医科大学埼玉医療センター²⁾

渡邊 城大¹⁾，大谷 真由美¹⁾，宿谷 俊郎²⁾

1. はじめに

第3回目の今回は「SNR の測定」について解説する。SNR の測定は、装置の精度管理や撮像パラメーターの最適化など、種々の性能評価法の中で最も利用頻度の高いものの1つである。しかし、その測定手順や計算方法はNEMA (National Electrical Manufacturers Association)、AAPM (American Association of Physicists in Medicine)、EUなどで標準化されているものから、汎用的に用いられているものなどいくつかある。

2007年にIEC (International Electrotechnical Commission)から、2008年にはNEMAから測定手順に関するドキュメントが発行されている。また、Parallel Imagingを用いた場合のSNR測定法なども提唱されており、今後も新たな測定方法が期待される。しかし、現状において標準的なSNRの測定方法は差分法であると考えてもよい。

今回は専門技術者認定を取得するための測定法である差分法の手順ならびに注意点などについて解説し、さらにNEMAに記載されているいくつかのSNR計算方法を紹介する。

2. 測定手順

専門技術者試験におけるSNR測定は、標準的なNEMA法で行うこととなっている。以下に専門技術者試験におけるSNR測定で要求されている測定条件およびNEMA Standard Publication MS1-2008に記述されている内容のなかで最低限必要と思われる箇所を抜粋して実際の測定手順を記す。

2-1 受信コイルおよびファントム

- (a) 受信コイルは頭部用またはBody用のシングルチャンネルのボリュームコイルを使用する。
- (b) ファントムの大きさは、頭部用コイルで直

径10cm以上の円形、Body用コイルで20cm以上の円形のものを用いる。

(c) ファントムの内容物は使用するMR装置の静磁場強度において、 $T1 < 1200\text{msec}$ 、 $T2 > 50\text{msec}$ とする。また、3Tなどの高磁場装置では油など、水を除いた素材の使用が望ましい。

2-2 撮像条件および方法

- (a) ファントムは受信コイルの中心におく。
- (b) 検査室およびファントムの温度は $22 \pm 4^\circ\text{C}$ とする。
- (c) SE法： $TR/TE = 800/14 \sim 20\text{ms}$ 、Matrix = 256×256 。
- (d) GER法： $TR/TE = 150/4 \sim 8\text{ms}$ 、Matrix = 256×256 。
- (e) スライス厚は10mm以下でシングルスライス。
- (f) FOVは受信コイル径の110%を超えない大きさ。
- (g) Parallel Imagingは用いない。
- (h) 画像フィルタ、補間は用いない。
- (i) 5分以内に同一条件で2回撮像する。

上記の条件で撮像し、不適格なアーチファクトがないことを確認する。ファントム設置後すぐに撮像を行うとファントム内の溶液が動き、アーチファクトが出現するので、ファントム設置後は十分に静置しておく。

SNRの測定法は差分法を用いるため、同一断面を連続して撮像する。この際、撮像間でプリスキャンが行われないように注意する。(装置メーカーによって撮像方法が異なるので確認する)

2-3 計算・解析方法

SNR信号値と雑音値から計算されるが、計算方法は次式のようにシンプルである。

$$\text{SNR} = \text{Signal/Noise} \cdots (1)$$

NEMA の中では差分法以外にもいくつかの計算方法が記載されているが、信号値 (S) の求め方は共通で、ファントム内の関心領域 (ROI) の信号強度の平均値である。

しかし、雑音値 (N) の求め方は計算方法ごとに異なる。以下に専門技術者試験で指定されている NEMA 法の中から 3 種類を挙げる。

(a) 差分法 (図 1)

$$\text{Noise} = N_{\text{sub}} / \sqrt{2}$$

$$\text{SNR} = \sqrt{2S / N_{\text{sub}}} \dots (2)$$

S: ファントム内に設定した ROI の平均信号値

N_{sub} : ファントムを 2 回連続して撮像し、その画像から差分画像を作成。その差分画像に S と同一に設定した ROI の標準偏差

(b) 空中雑音法 (図 2)

$$\text{Noise} = N_{\text{air}} / (2 \cdot \pi / 2)^{1/2}$$

$$\text{SNR} = (2 \cdot \pi / 2)^{1/2} \cdot S / N_{\text{air}} = 0.66 \times S / N_{\text{air}} \dots (3)$$

S: ファントム内に設定した ROI の平均信号値

N_{air} : ファントム外 (4 隅) の空中に設定した ROI の標準偏差の平均値

なお、ROI はファントムの位相方向にかぶらないように設定する。

(c) 空中信号法 (図 2)

$$\text{Noise} = S_{\text{air}} / (\pi / 2)^{1/2}$$

$$\text{SNR} = (\pi / 2)^{1/2} \cdot S / S_{\text{air}} = 1.25 \times S / S_{\text{air}} \dots (4)$$

S: ファントム内に設定した ROI の平均信号値

S_{air} : ファントム外の空中に設定した ROI の平均信号値

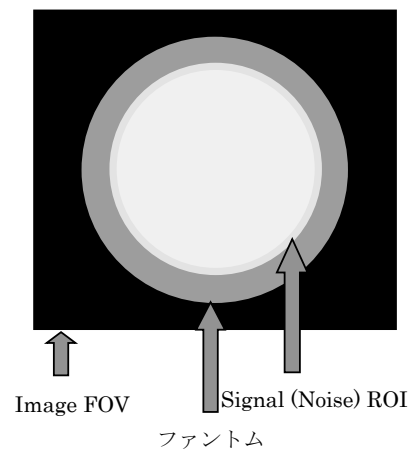


図 1 差分法による ROI 設定

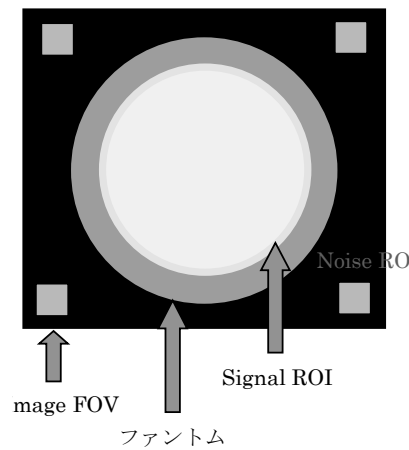


図 2 空中雑音 (信号) 法による ROI 設定

SNR の計算方法は差分法を用いる。計算に必要な手順は、ほとんどの場合 MR 装置の解析ソフトで可能である。また、汎用の画像処理ソフトを用いてもかまわない。

2-4 差分画像の作成

連続して撮像した画像から差分画像を作成する。この際、差分結果がマイナスになった場合に「0」とする処理を行うかマイナスの値を保持するか選択できる装置もあるため、必ずマイナスの値を保持するようにする。

2-5 信号値の測定および SNR の計算

差分画像を作成するために使用した 2 つの元画像のいずれか 1 つと、差分画像のそれぞれの同じ位置に ROI を設定する。ROI はファントム面積

の75%を含む大きさで、中心に設定する。元画像のROI内の平均信号値(S)と差分画像のROI内の標準偏差(NSUB)を式(2)に代入してSNRを求める。

2-6 差分の結果がマイナスの場合に「0」となる場合の差分法の計算方法

差分画像を作成する際に、差分の結果がマイナスとなった場合に「0」としてしまう装置の場合には、以下の補正式を用いて本来の差分処理の標準偏差(N_{SUB})を算出し、差分法による計算を行うことも可能である。

$$NSUB = \{(N_{SUB1-2})^2 + (N_{SUB2-1})^2 + 2 \cdot (SI_{SUB1-2}) \cdot (SI_{SUB2-1})\}^{1/2} \dots (5)$$

N_{SUB1-2}：画像1から画像2を差分し得られた差分画像の標準偏差

N_{SUB2-1}：画像2から画像1を差分し得られた差分画像の標準偏差

SI_{SUB1-2}：画像1から画像2を差分し得られた差分画像の平均信号値

SI_{SUB2-1}：画像2から画像1を差分し得られた差分画像の平均信号値

2-7 差分法以外の計算方法

差分画像を作成する際に、差分の結果がマイナスとなった場合に「0」としてしまう装置の場合には、簡易法として空中雑音法、または空中信号法を用いてもかまわない。

3. 測定手順のまとめ

3-1 Spin echo 法

ファントム	頭部用コイルでは直径10cm以上の円形 Body用コイルでは20cm以上の円形
ピクセルあたりの帯域幅 (Hz/pixel)	規定なし (例：150-300)
撮像視野	受診コイル径の110%を超えない大きさ
撮像マトリックス	256 × 256
スライス厚	10 mm 以下 (3-8 mm)

スライス枚数	1
TR：繰り返し時間 (msec)	800
TE：エコー時間 (msec)	14-20
NAQ：信号加算回数	1
FRコイルの種類	頭部用またはBody用のシングルチャンネルのボリュームコイル
ファントム温度および室温 (°C)	18-26
その他	10分以上経過後スキャン開始
撮像断面	横断像
測定ROI	ファントム面積の75%を含む大きさで、中心に設定

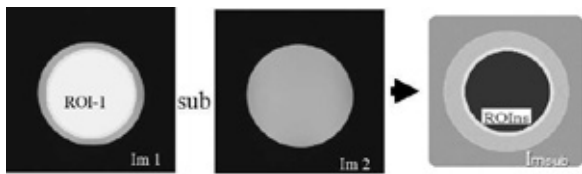
3-2 Gradient echo 法

ファントム	頭部用コイルでは直径10cm以上の円形 Body用コイルでは20cm以上の円形
ピクセルあたりの帯域幅 (Hz/pixel)	規定なし (例：150-300)
撮像視野	受診コイル径の110%を超えない大きさ
撮像マトリックス	256 × 256
スライス厚	10 mm 以下 (3-8 mm)
スライス枚数	1
TR：繰り返し時間 (msec)	150
TE：エコー時間 (msec)	4-8
NAQ：信号加算回数	1
FRコイルの種類	頭部用またはBody用のシングルチャンネルのボリュームコイル
ファントム温度および室温 (°C)	18-26

その他	10分以上経過後スキャン開始
撮像断面	横断像
測定 ROI	ファントム面積の75%を含む大きさで、中心に設定

4. 例題

4-1 差分法（差分画像にマイナス表示がされている）

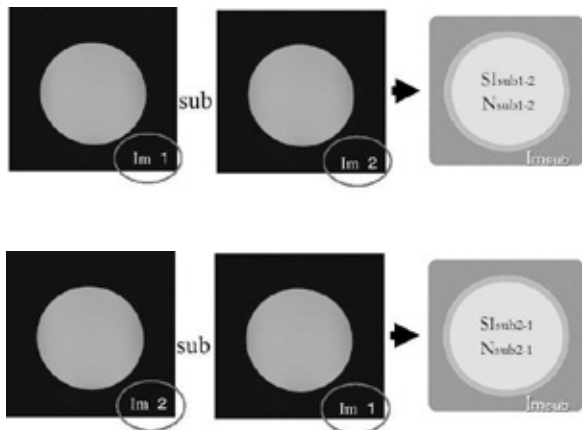


$$SNR = S / (N_{sub} / \sqrt{2}) =$$

S (ファントム内の信号平均強度の平均値) =

N_{sub} (差分画像の信号強度の標準偏差) =

4-2 差分法（差分画像の最小値が0の場合）



$$N_{sub} = \{(N_{sub1-2})^2 + (N_{sub2-1})^2 + 2 \cdot (SI_{sub1-2}) \cdot (SI_{sub2-1})\}^{1/2} =$$

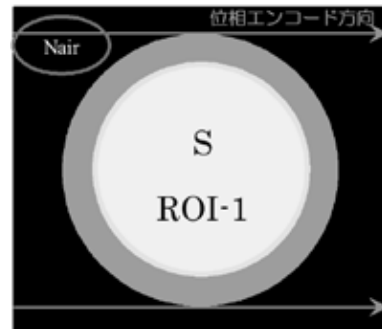
N_{sub1-2} (画像1-画像2の差分画像の標準偏差) =

N_{sub2-1} (画像2-画像1の差分画像の標準偏差) =

SI_{sub1-2} (画像1-画像2の差分画像の平均信号値) =

SI_{sub2-1} (画像2-画像1の差分画像の平均信号値) =

4-3 空中雑音法

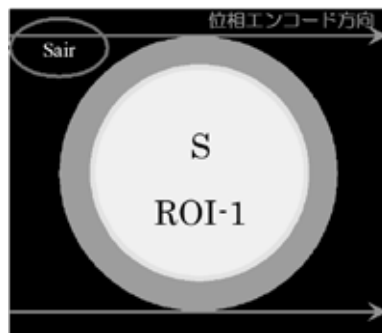


$$SNR = (2 \cdot \pi / 2)^{1/2} \cdot S / N_{air} =$$

S (ファントム内の信号強度の平均値) =

N_{air} (ファントム外の ROI の信号強度標準偏差) =

4-4 空中雑音法



$$SNR = (\pi / 2)^{1/2} \cdot S / S_{air} =$$

S (ファントム内の信号強度の平均値) =

S_{air} (ファントム外の ROI の信号強度の平均値) =

5. 資料（専門技術者試験に記述されている項目）

- 1) 標準的な NEMA 法で測定する。
- 2) ファントムについて
 - ・頭部：最小寸法は撮像面内で直径 10cm の円または保証範囲の 85% のうち大きい方を満たすも

の。

・体幹部：最小寸法は撮像面内で直径 20cm の円または補償範囲の 85% のうち大きい方を満たすもの。

・T1 値<1200ms、T2 値> 50ms

・頭部と体幹部の 2 種類の大きさのファントムを使用すること。

3) 撮像条件

・ファントムはアイソセンターに置かれた RF 受信コイルの中心に配置する。

・室温およびファントム温度は $22 \pm 4^{\circ}\text{C}$ 。

・Spin echo (SE) 法が望ましいが、必ずしもこの限りではない。

・ $\text{TR} \geq 3 \times \text{T1}$ 、TE は一般的に臨床に使用される範囲。

・シングルスライスで、撮像面は Axial。

・FOV は面内において RF コイルの最大径の 110% を超えないこと。

・スライス厚 $\leq 10\text{mm}$

・表面コイルは使用できない。

・Parallel imaging を使用してはいけない。

・ROI は画像断面の 75% は少なくとも囲むこと。

4) 測定結果の基になった数値と計算式を記載する。また、その数値が何を表しているのかも示す。

5) 差分 (subtraction) ができない装置は簡易法を用いても構わない。

6. 参考文献

・National Electric Manufacturers Association : Determination of signal-noise ratio (SNR) in diagnostic magnetic resonance images, NEMA Standard Publication, MS1 (2008)

・宮地利明 編：標準 MRI の評価と解析. 32-40, オーム社, 2012

・東京都診療放射線技師会監修：MRI 集中講座 MRI 専門技術者認定試験にチャレンジするためのテキスト 改訂版. 1-8, 三恵社, 2016

・日本磁気共鳴専門技術者認定機構 <http://plaza.umin.ac.jp/~JMRTS/exam/exam2.html>, (accessed 2018-5-26)