

循環器診療におけるCTとMRIの役割

宇都宮 大 輔

横浜市立大学大学院医学研究科 放射線診断学

要 旨:

循環器領域は近年の画像診断のなかで最も進歩の大きかった領域の一つといえる。とくに冠動脈CTアンギオグラフィ (CTA) は心電図同期下に心臓が静止している拡張期を捉えることで良好な心臓の画像を提供するものであり、この10年でその件数は冠動脈造影に迫る勢いである。また、新たな画像再構成やFFR-CTのような解析技術が登場し、冠動脈CTAは新たな段階に入ってきた。心臓MRIは病理学的な心筋ダメージ (線維化) を正確に検出するモダリティとして心筋梗塞だけでなく、心筋症の診断および治療方針の決定に大きな役割を担っている。循環器診療を支えるモダリティとしてCTとMRIはこれからも重要度が更に増していくものと考えられる。

Key words: 冠動脈CT (coronary CT), 低電圧CT (low tube-voltage CT), 逐次近似再構成法 (iterative reconstruction technique), 心臓MRI (cardiac MRI)

はじめに

循環器診療のなかでのCTやMRIの役割は年々大きくなっている。とくに心臓を対象とした場合には心筋血流シンチグラフィ以外の印象は比較的薄いかもしれない。ひとつの理由として、まだ医学教育のなかに十分取り込まれていない点があげられ、教育と臨床の間に乖離がある領域といえる。しかし、実際の臨床のなかでは大きなウエイトを占めている。

64列多列CT (multidetector CT: MDCT) の登場以降、冠動脈CTアンギオグラフィ (CTA) は冠動脈病変評価の手法として広く用いられるようになった。「慢性冠動脈疾患診断法ガイドライン (2018年改訂版)」¹⁾ においても心筋血流シンチグラフィとともに中心的役割を担うモダリティとして位置づけられている。64列MDCTの欠点は時間分解能の低さゆえに動きのアーチファクトから評価困難となりうること、そして特にレトロスペクティブ心電図同期再構成法を用いる場合にX線被ばくが多くなってしまうことがあげられる。しかし、現在では二管球CT (2つのX線管球により2倍の速度でスキャンできる) や高速回転の256列~320列MDCT (1回転で心臓全

体のデータを取得できる) を備える病院も増えてきた。また、逐次近似画像再構成法という新しいテクニックの登場により低被ばくのスキャンから良好な画質が得られるようになってきた。近年のCT技術の進歩により高い画質と低被ばくを両立した冠動脈CTA画像を安定して得ることができるようになった²⁾。冠動脈CTAはすでに循環器科診療において欠かすことのできないモダリティであり、本邦における年間の検査数は40万件を超える。

64列MDCTにおける冠動脈病変の診断能は2008年に大規模な研究が発表され、感度は85-95%、特異度は83-90%と良好な結果が報告されている^{3, 4)}。冠動脈を非侵襲的かつ低コストに高い診断能をもって評価することができる。しかし、これらの結果は血管造影 (冠動脈造影) での解剖学的な有意狭窄 (>50%) をリファレンス・スタンダードとして診断能を算出している。冠動脈の解剖学的狭窄は必ずしも血行力学的に有意な狭窄とは一致せず、解剖学的狭窄のみで治療法の選択を行った場合、冠動脈病変の影響を過大 (有意狭窄が見られるが、心筋虚血は見られない) ないしは過小評価 (冠動脈狭窄は軽度であるが、心筋虚血が見られる) してしまう可能性がある⁵⁾。解剖学的狭窄を基準に冠動脈インターベンシヨ

ン (percutaneous coronary intervention: PCI) を行うことは患者の予後向上に十分に寄与しないことが示されており^{6, 7)}, 実際に2018年4月, 診療報酬改定に伴い安定狭心症の保険算定要件が変更され, 術前の機能的な心筋虚血評価が必須となった。したがって, 現在では機能的な心筋虚血評価法として冠血流予備量比 (fractional flow reserve: FFR) がリファレンス・スタンダードと考えられるようになってきている⁸⁾。これは冠動脈狭窄の前後における圧較差をプレッシャーワイヤで計測し, 狭窄遠位部の冠動脈圧と近位部の比が0.75~0.8以下となると「機能的な心筋虚血あり」と判定するものである。侵襲的 FFR を基準とした場合, 冠動脈CTの有意な冠動脈病変の診断能は感度81~100%, 特異度34~60%と報告されており, CTで冠動脈狭窄を観察するだけでは非常に特異度が低いことが明らかになっている⁹⁻¹¹⁾。そのなかで血行力学的に有意な冠動脈病変を検出する非侵襲的な手法として, 冠動脈CTAからFFRをシミュレーションするFFR-CTが登場し, 2019年より保険収載されることとなった。

また, 心臓のMRIは多くのシークエンスにより重要な機能情報と形態情報を提供してくれるモダリティであり, コストも安価である。とくに心臓は生検による組織の採取が簡単ではないため, 心筋の組織的ダメージを明瞭に描出できるMRIの役割は大きい。しかし, 検査に時間がかかること, 撮影および画像の読影に熟練を要すること等により未だに広く施行されているとは言いがたい現状である。

本稿では循環器診療のなかでのCTとMRIの役割について実際の症例を交えて概説する。

冠動脈CTA

1. 冠動脈CTAの原理：心電図同期

元来, CTというモダリティは動いている構造を画像化するのが苦手である。したがって, 心臓はCTにとって撮影が最も苦手な領域といってよく, 実際に診療での役割が大きくなってきたのは比較的最近のことである。心臓の動きは1心拍のなかでダイナミックに変化しており, 収縮期では全身に血液を送り出すために動きが激しい, すなわち撮像には適していない。しかし, 拡張期は心臓の動きは非常に緩やかで, ほぼ静止している時相がある。このタイミングの画像を得ることで, 「静止した心臓」のCT画像を得るわけである。具体的には患者に心電図を装着し, 心電図R-R間隔の70%~80% (拡張中期) のデータから冠動脈CTA画像を得る。それでも心拍数が高いと動きのアーチファクトが出てしまい, 診断に足る画像を得ることが出来ないため, ベータ遮断薬の内服や静脈注射を行うことで, なるだけ心拍数を低下させて撮像する必要がある (50~60bpm)。

2. 低管電圧CT

冠動脈CTAは非侵襲的に冠動脈の情報を得る有効なテクニックであるが, 被ばく量が大きくなりやすいという欠点がある。これは64列~80列のCTでは一度にスキャンできる範囲が体軸方向 (Z軸) に3~4cm程度であり, 心臓全体をカバーできないからである。そのため心電図同期CTでは収縮期~拡張期の全てのデータを取得し, 後視的 (レトロスペクティブ) に拡張期のデータだけを取り出して画像を作成する。つまり, 心電時相の全てのデータ (R-R間隔 0~99%) をとれるように連続的にX線照射しながら撮影するが, 実際に画像作成に使用するのは拡張中期 (R-R間隔 70~80%) のみである。近年は一部の施設では320列CT (スキャン範囲16cm) をはじめとする広範囲撮像の機器が出てきて, 放射線被ばくは劇的に低減されつつあるが, 現在も多くの施設において冠動脈CTAの被ばく量のコントロールは重要な課題となっている。

放射線被ばくを低減する手法としてX線管電圧を低下させる手法がある¹²⁾。X線のエネルギーが下がることで被ばくを低減することができる。通常のCTでは120kVpを用いるが, 近年のCT機種ではこれを100kVpや80kVpCTに低下させることができるようになった。しかし, ただ管電圧を低下させただけでは画像ノイズが発生してしまい, 画質の低下, 診断能の低下を招く可能性がある。したがって, 低管電圧CTの利用のためには対象の濃度を高くすることでシグナル-ノイズ比を大きくしなければならない。これらの特徴を鑑みると造影剤を用いたCTAは低管電圧技術と非常に相性がよく, 臨床的に有用である。X線減弱の機序は光電効果とコンプトン散乱と考えることができ, 造影剤 (ヨード) は光電効果主体, 水はコンプトン散乱が主体でX線の吸収が起きる。光電効果では低電圧スキャンにおいてCT値が急激に上昇することが分かっており (図1), この現象を利用するとCTAにおける血管内濃度 (ヨード造影剤) は非常に高いCT値を示す (図2)。

3. 逐次近似画像再構成

低管電圧CTにおける大きな欠点は画像ノイズが大きくなってしまうことである。低管電圧の冠動脈CTAにおいて許容できるだけの画質が得られるのは前述のごとくノイズも大きくなるが, 血管のCT値も大きくなるため, コントラスト・ノイズ比が保たれる (ノイズの上昇を補う) ためである。近年, 新しい画像再構成法 (逐次近似画像再構成法) を用いることで画像ノイズだけを低減するテクニックが臨床に導入されてきた¹³⁾。この手法は従来のCT画像再構成法 (フィルタ補正逆投影法) では簡略化されていたプロセスも考慮に入れ, 各ピクセルのCT値を繰り返し計算によって割り出していくものである¹⁴⁾。この

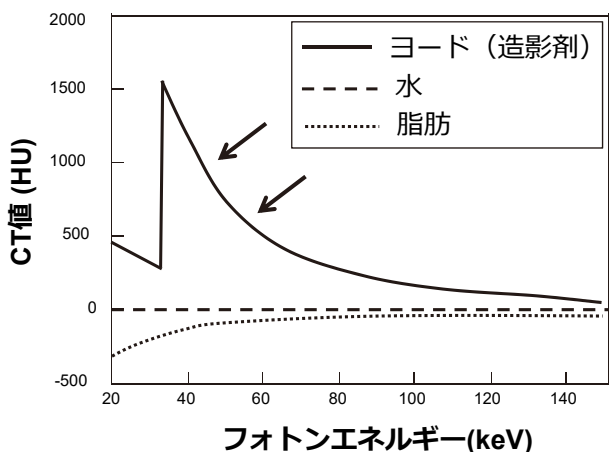


図 1：主な構成成分の管電圧と CT 値の関係。

ヨード（造影剤）は管電圧を低くすると CT 値が大きくなる（矢印）。一方、水の CT 値は管電圧の影響はほとんど受けず、脂肪成分は管電圧の低下とともに CT 値は低下していく。

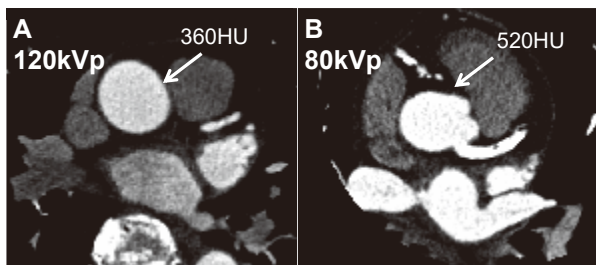


図 2：低管電圧スキャンがヨード造影剤に与える影響。

通常管電圧 CT (A, 120kVp) と低管電圧 CT (B, 80kVp) を示す。同等の体格 (BMI = 25 kg/m²) の患者に同量の造影剤 (50 mL) を使用しているが、上行大動脈の増強効果は低管電圧 CT において高い (360HU vs 520HU)。

ような画像再構成には計算に多大な時間がかかり、これまでは臨床での使用は困難であった。しかし、コンピュータの計算処理能力の向上に伴い、現在では国内の多くの CT 装置において逐次近似画像再構成を利用できるようになった。逐次近似画像再構成法では空間分解能や各構造の CT 値は保ったままノイズだけを低減させることができる (図 3)。低電圧 CT により血管内の CT 値を上昇させ、逐次近似画像再構成によりノイズを除去することで低被ばく且つ高画質の冠動脈 CTA が可能となる。画像ノイズに埋もれて評価の難しかった非石灰化プラーク、混合型プラークの性状評価が正確にできるようになったことも重要な進歩である。

心臓 MRI

1. 心臓 MRI のシーケンス

心臓の MRI には様々なシーケンスがあり、総合的に判定する。撮像には時間がかかり、全てのシーケンス

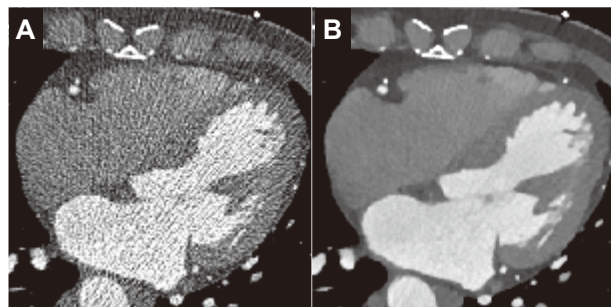


図 3：フィルタ補正逆投影法と逐次近似再構成法の画像比較。低管電圧の冠動脈 CTA において従来のフィルタ補正逆投影法 (A) よりも逐次近似再構成法 (B) を用いた方が画像ノイズの少ないクリアな画像が得られる。

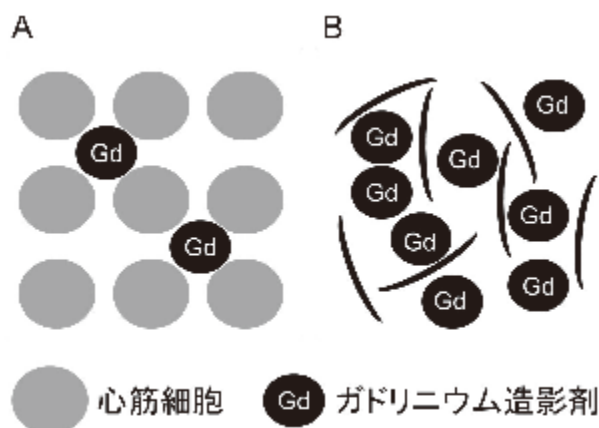


図 4：心筋傷害・線維化での遅延造影。

正常心筋部 (A) と比べて、心筋傷害・線維化巣 (B) では細胞外液腔が広く、ガドリニウムによる強い増強効果 (LGE) が見られる。

を撮像すると検査時間は 2 時間近くかかると思われ、現実的ではない。実際には評価したい目的に応じたシーケンスを選択してスキャンを進めることになる。

2. T1 マッピング, 遅延造影 MRI

近年の大きなトピックは T1 マッピングであり、心筋の T1 値を測定するものである。視覚的に T1 強調画像を見ても正確に心筋ダメージを評価することは難しいが、T1 マッピングでは定量的に評価が可能である。T1 値の延長は心筋組織のダメージ・線維化を反映する。とくに心アミロイドーシスは T1 値の延長を来す心筋症の代表である。T1 マッピングでは造影剤を使用せずに心筋性状を評価できるという利点がある。ただし、MRI 機器の制約もあり、撮像できる施設には限りがある。

一般的に心筋ダメージ・線維化を評価するには造影後 10 分間程してから撮影する遅延造影 MRI が用いられる。遅延造影 MRI は高い空間分解能をもって心筋の線維化病変を観察できる。組織の採取が困難な心臓において病理



図5：陳旧性心筋梗塞（内膜下）。遅延造影MRIにて前壁の内膜下に心内腔と同程度～より高信号の領域（*）を認め、内膜下心筋梗塞のLGE（late Gd enhancement）である。

学的な線維化に相当する部分を「遅延造影」として描出することの意義は大きい。MRIではガドリニウム（Gd）製剤を造影剤として用いる。Gd造影剤は細胞外液腔に分布する。心筋線維化巣のように細胞の脱落している領域は遅延相にてGd造影剤が多く分布し、正常心筋に比べて強い増強効果を呈する（図4）。これをLate Gd enhancement（LGE）とよび、その広がり治療方針に影響を与える。心筋梗塞（図5）や心筋症（図6）の診断と広がり評価において必須の検査となりつつある。

3. 冠動脈 MR アンギオグラフィ（MRA）

冠動脈疾患の非侵襲的評価の中心は冠動脈CTAであろう。一方で、1.5テスラ（T）のMRIでは造影剤を使用せずに冠動脈MRAを撮像可能であり（Balancedシークエンス）、状況によっては有効なテクニックとなる（図7）。ただし、撮像には時間がかかり、CTのように一回の息止めの間にスキャンできるわけではない。患者状態にも依存するが20分程度の時間は必要となることが多い。そのため呼吸同期と心電図同期を併用する。横隔膜をナビゲーションして、あらかじめ決めた範囲内に横隔膜が入っている間だけスキャンを行う。そのため呼吸状態の不安定な患者では検査は失敗する、ないしは長時間かかる可能性が高い。臨床的には川崎病冠動脈瘤のような若年者で、長期にわたって経過観察しなくてはならない患者には放射線被ばくも造影剤も使用せずに冠動脈を評価できるMRAは特に重要である。3TのMRI装置ではBalancedシークエンスが撮像できないため、造影剤を用いないと冠動脈MRAを撮像することはできない。

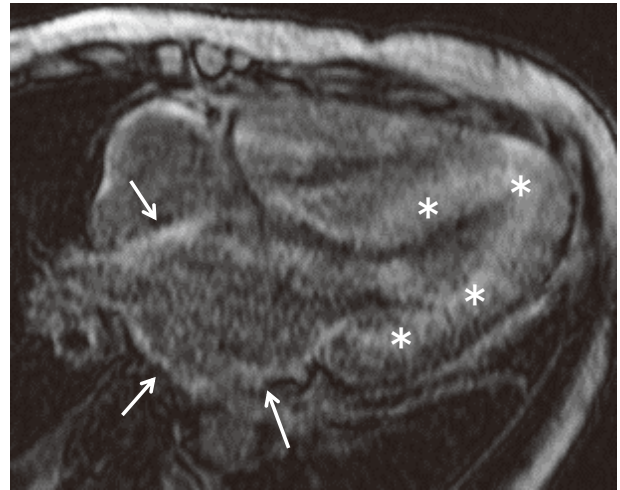


図6：心アミロイドーシス。

左室心筋は肥厚し、内膜下に全周性の境界不明瞭なLGEが見られる（*）。左心房にも遅延造影が見られる（矢印）。アミロイドーシスに典型的な遅延造影のパターンである。

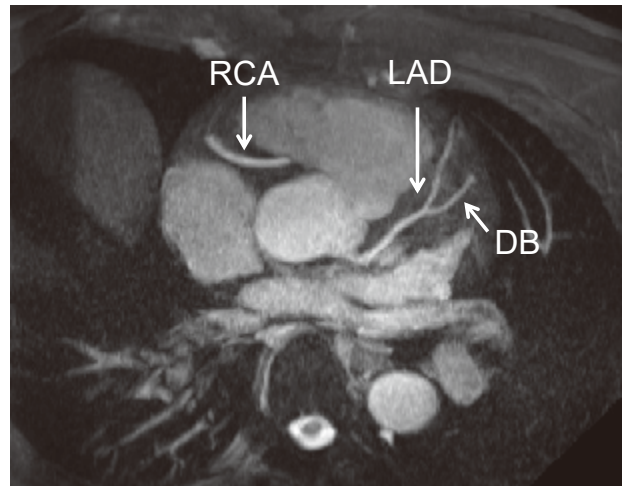


図7：冠動脈MRA。

冠動脈を「T2高信号域」として描出することで、非造影で冠動脈MRAを得ることが可能である。

LAD = 左前下行枝；DB = 対角枝；RCA = 右冠動脈

結 語

新しい技術の導入により心臓の画像診断はより非侵襲的に、より正確に行えるようになってきた。非侵襲的に冠動脈や心筋の性状を評価するうえで、CTとMRIは循環器診療を支える重要なモダリティとなっており、これからも重要度が更に増していくであろう。

文 献

- 1) 合同研究班（山岸正和 玉．慢性冠動脈疾患診断ガイドライン（2018年改訂版）．2018．

- 2) Oda S, Utsunomiya D, Yuki H, Kai N, Hatemura M, Funama Y, et al.: Low contrast and radiation dose coronary CT angiography using a 320-row system and a refined contrast injection and timing method. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, **9**: 19–27, 2015.
- 3) Miller JM, Rochitte CE, Dewey M, Arbab-Zadeh A, Niinuma H, Gottlieb I, et al.: Diagnostic performance of coronary angiography by 64-row CT. *N Engl J Med*, **359**: 2324–2336, 2008.
- 4) Budoff MJ, Dowe D, Jollis JG, Gitter M, Sutherland J, Halamert E, et al.: Diagnostic performance of 64-multidetector row coronary computed tomographic angiography for evaluation of coronary artery stenosis in individuals without known coronary artery disease: results from the prospective multicenter ACCURACY (Assessment by Coronary Computed Tomographic Angiography of Individuals Undergoing Invasive Coronary Angiography) trial. *J Am Coll Cardiol*, **52**: 1724–1732, 2008.
- 5) Meijboom WB, Van Mieghem CA, van Pelt N, Weustink A, Pugliese F, Mollet NR, et al.: Comprehensive assessment of coronary artery stenoses: computed tomography coronary angiography versus conventional coronary angiography and correlation with fractional flow reserve in patients with stable angina. *J Am Coll Cardiol*, **52**: 636–643, 2008.
- 6) Boden WE, O'Rourke RA, Teo KK, Hartigan PM, Maron DJ, Kostuk WJ, et al.: Optimal medical therapy with or without PCI for stable coronary disease. *N Engl J Med*, **356**: 1503–1516, 2007.
- 7) Group BDS, Frye RL, August P, Brooks MM, Hardison RM, Kelsey SF, et al.: A randomized trial of therapies for type 2 diabetes and coronary artery disease. *N Engl J Med*, **360**: 2503–2515, 2009.
- 8) Tonino PA, De Bruyne B, Pijls NH, Siebert U, Ikeno F, van't Veer M, et al.: Fractional flow reserve versus angiography for guiding percutaneous coronary intervention. *N Engl J Med*, **360**: 213–224, 2009.
- 9) Koo BK, Erglis A, Doh JH, Daniels DV, Jegere S, Kim HS, et al.: Diagnosis of ischemia-causing coronary stenoses by noninvasive fractional flow reserve computed from coronary computed tomographic angiograms. Results from the prospective multicenter DISCOVER-FLOW (Diagnosis of Ischemia-Causing Stenoses Obtained Via Noninvasive Fractional Flow Reserve) study. *J Am Coll Cardiol*, **58**: 1989–1997, 2011.
- 10) Min JK, Leipsic J, Pencina MJ, Berman DS, Koo BK, van Mieghem C, et al.: Diagnostic accuracy of fractional flow reserve from anatomic CT angiography. *JAMA*, **308**: 1237–1245, 2012.
- 11) Norgaard BL, Leipsic J, Gaur S, Seneviratne S, Ko BS, Ito H, et al.: Diagnostic performance of noninvasive fractional flow reserve derived from coronary computed tomography angiography in suspected coronary artery disease: the NXT trial (Analysis of Coronary Blood Flow Using CT Angiography: Next Steps). *J Am Coll Cardiol*, **63**: 1145–1155, 2014.
- 12) Oda S, Utsunomiya D, Funama Y, Awai K, Katahira K, Nakaura T, et al.: A low tube voltage technique reduces the radiation dose at retrospective ECG-gated cardiac computed tomography for anatomical and functional analyses. *Acad Radiol*, **18**: 991–999, 2011.
- 13) Oda S, Utsunomiya D, Funama Y, Yonenaga K, Namimoto T, Nakaura T, et al.: A hybrid iterative reconstruction algorithm that improves the image quality of low-tube-voltage coronary CT angiography. *AJR Am J Roentgenol*, **198**: 1126–1131, 2012.
- 14) Yuki H, Utsunomiya D, Funama Y, Tokuyasu S, Namimoto T, Hirai T, et al.: Value of knowledge-based iterative model reconstruction in low-kV 256-slice coronary CT angiography. *J Cardiovasc Comput Tomogr*, **8**: 115–123, 2014.

Abstract

CLINICAL ROLE OF CARDIOVASCULAR CT AND MRI

Daisuke UTSUNOMIYA

*Department of Diagnostic Radiology,
Yokohama City University Graduate School of Medicine*

Imaging in cardiovascular medicine has developed in this last decade. Coronary computed tomography (CT) angiography is a technique to visualize the coronary arteries by electrocardiogram-gated scanning of the heart in the diastolic phase. In Japan, the number of coronary CT angiography examinations is rapidly increasing, and it is equivalent to that of conventional coronary angiography examinations. New image reconstruction (e.g. iterative reconstruction) and analysis techniques (e.g. CT-derived fractional flow reserve: CT-FFR) are now available clinically. Cardiovascular magnetic resonance imaging (MRI) also plays an important role in the diagnosis and management of patients with myocardial infarction and various cardiomyopathies, because cardiovascular MRI can clearly visualize the myocardial damage and fibrosis. CT and MRI will become even more important in cardiovascular clinical practice.