

心臓と冠動脈の画像診断： CT & MRI —— 変わりつつある循環器診療における役割

佐久間 肇 三重大学医学部附属病院中央放射線部

第37回断層映像研究会が2008年10月3日(金)、4日(土)の2日間、アクロス福岡において開催された。10月4日に行われた東芝メディカルシステムズ(株)共催のランチョンセミナーでは、宮崎大学医学部放射線医学講座の田村正三氏が座長を務め、三重大学医学部附属病院中央放射線部の佐久間 肇氏が、「心臓と冠動脈の画像診断：CT & MRI —— 変わりつつある循環器診療における役割」と題して講演を行った。

心臓の画像診断において、マルチスライスCT (MSCT) は冠動脈内腔の狭窄、冠動脈プラークの診断、左室収縮機能の診断といった、主に形態的な診断における有用性が高い。一方、MRIは、パーフュージョンMRIによる心筋血流の評価、心筋梗塞やバイアビリティの描出、また、左室収縮機能および拡張機能も含めたより詳細な機能診断に有用である。しかし、今日では、MSCTとMRIの適応分野の垣根が徐々になくなってきており、その役割も変化してきている。本講演では、心臓と冠動脈の診断における、MSCTとMRIの現状と展望について述べたが、ここではMSCTを中心に報告する。

冠動脈CTの有用性

冠動脈診断に使用するMSCTは、現在では64列以上がミニマムスタンダードとなっており、一般的にはβブロッカーによる心拍抑制やニトログリセリン投与による冠動脈拡張、ヨード造影剤の肘静脈急速注入を行うのが標準的である。

MSCTによる冠動脈狭窄の診断については、日本を含めた非常に多くの施設からシングルセンタースタディによる

報告が行われており、メタアナリシスの報告も増えている。2007年のRadiologyに掲載されたメタアナリシス¹⁾の論文では、16列では感度97%、特異度81%であるのに対し、64列では感度99%、特異度93%と、非常に良好な結果が得られている。

マルチセンタースタディによる冠動脈CT診断能に関するエビデンスも明らかになりつつあり、ACCURACYにおける患者別の狭窄度50%以上の検出における診断能を見ると、感度93%、特異度82%、陰性的中率(negative predictive

value : NPV) 97%となっている(表1)。

また、東芝社がサポートする64列MSCTによるマルチセンタースタディ“CorE64”では、感度85%、特異度90%、NPVは患者別に見ると83%、主要冠動脈別では89%となっている(表2)。このNPVは、ACCURACYと比べると低いように思われるが、これはcoronary artery disease (CAD) の頻度が56%と高いために、陽性的中率(positive predictive value : PPV)が高く、NPVが低くなっている。この2つのマルチセンタースタディは、冠動

表1 ACCURACYにおける冠動脈CTの検討
(Min, J., et al. RSNA2007)

・16施設 ・229例の胸痛患者				
	感度	特異度	PPV	NPV
狭窄度>50%患者別	93%	82%	63%	97%
狭窄度>50%主要冠動脈別	84%	91%	51%	98%
狭窄度>70%患者別	91%	84%	49%	98%
狭窄度>70%主要冠動脈別	85%	92%	33%	99%
CAD頻度=24%(狭窄度>50%), 15%(狭窄度>70%)				

表2 CorE64における冠動脈CTの検討
(Miller, J., et al. AHA2007)

・9施設 ・291例のCAD疑い患者 (calcium score<600)				
	感度	特異度	PPV	NPV
狭窄度>50%患者別	85%	90%	91%	83%
狭窄度>50%主要冠動脈別	76%	93%	82%	89%
CAD頻度=56%				

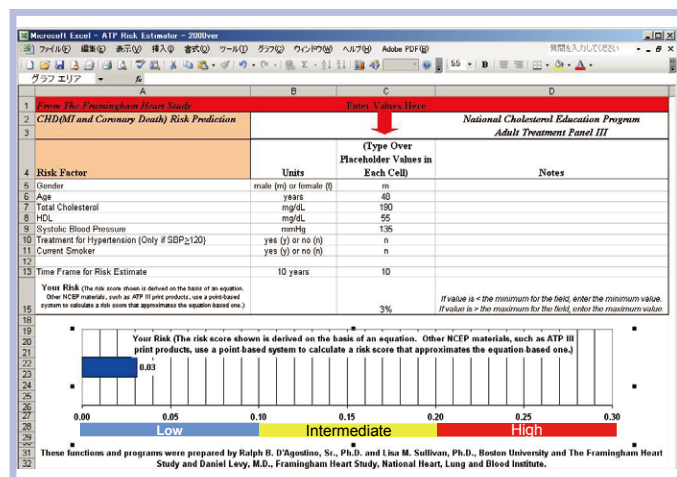


図1 Framingham Risk Score
(<http://hp2010.nhlbihin.net/atpiii/riskcalc.htm>)

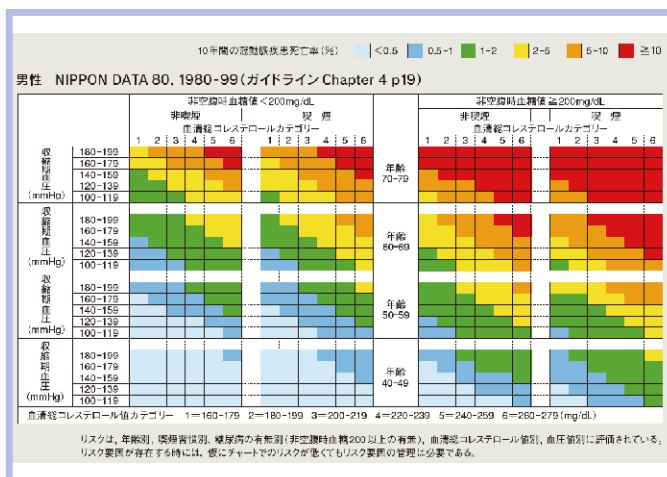


図2 日本における冠動脈疾患死亡のリスクチャート
(NIPPON DATA80より引用)
日本人の冠動脈疾患発症率は米国の約1/4で中等度リスク人口が少ない。

脈CTの虚血性心疾患の診断における有効性を示す重要な報告である。

冠動脈CTの臨床適応

● 冠動脈カルシウムスコアリング

欧米では、CTの冠動脈カルシウムスコアリングによる検診が広く行われている。冠動脈疾患のリスク判定法としてはFramingham Risk Score (図1)があるが、年齢、性別、コレステロールなどの各項目に必要事項を入力すると、10年間に心筋梗塞を起こす確率が算出される。これに冠動脈カルシウムスコアリングを加えることによって、予後予測能が有意に改善する。特に、Framingham Risk Scoreの値が10～20%の中等度リスク群のうち、無症状症例においては、カルシウムスコアリングは冠動脈イベントの予測にきわめて有用である²⁾。また、冠動脈カルシウムスコアリングは、中等度リスク群における治療方針、つまり、スタチン投与による積極的脂質低下療法の開始の決定などにおいても有用な指標とされており、中等度リスク群が冠動脈CTの最も良い適応となる。

では、冠動脈CTの対象となる中等度リスク群は、日本ではどのくらいの割合なのだろうか。実は、日本では意外に少なく、米国の1/4程度とされている。日本人の10年間の冠動脈疾患による死亡率をまとめたリスクチャート“NIPPON DATA80” (図2) によると、50歳代で耐糖能が正常かつ血圧が160以下

であれば、冠動脈イベントが起こる確率は10年間で0.5%、50歳未満では0.1%以下の人がほとんどである。冠動脈カルシウムスコアリングによるスクリーニングが欧米のように広がらない理由の1つは、働きざかりの40歳代、50歳代の冠動脈死亡リスクが欧米よりも低いことも一因ではないかと思われる。

● CTによるプラーク診断

CTによるプラークの診断については、急性冠症候群 (acute coronary syndrome: ACS) を起こしやすいプラークをスクリーニングし、予防できるのではないかということが、大いに期待されている (図3)。ACSを起こしやすいプラークの特徴をレトロスペクティブに検討した報告³⁾では、ポジティブ・リモデリング、プラークのCT値が30HU以下、点状石灰化などが、破綻しやすいプラークの特徴とされている。

いまのところ、ACSの発症リスクを予測するために造影CT検査を行うということの有用性については、まだ十分なエビデンスが得られておらず、冠動脈造影CTを無症状の患者のリスク判定に用いることは、現段階では推奨されていない。プロスペクティブスタディによる今後の研究結果が期待されている。

心臓CTの臨床適応

● CTによる左室機能評価

MSCTでは、心電図同期を行うことですべての時相のデータが収集できるた

め、左室の容積曲線を見たり (図4)、3Dでカテーテルの動きと冠動脈とを重ねたような画像を作ることでもできる。CTによる左室収縮機能の評価の精度は高く、心臓CTとシネMRIの比較では、拡張終期容量 (EDV)、収縮終期容量 (ESV)、駆出率 (EF) について非常に良い相関が得られている⁴⁾。これは、超音波やSPECTとの比較においても同様である。

ただし、心臓CTを左室機能評価に用いる場合には、撮影時にβブロッカーを使用したか否かに注意が必要である。βブロッカーを使用すると、ESVの値が大きく、心拍出力 (CO) の値が小さくなり、MRI等による安静時の値が違ってしまいうからである (表3)。これは、βブロッカーによって心拍数が下がり、末梢抵抗が変わってしまうことが原因である。このため、MRIやエコーとβブロッカー使用CTの左室容積を経時的に比較することは避けるべきである。

欧米における冠動脈CTAの臨床適応

冠動脈CTAの臨床適応については、米国ではACC (American College of Cardiology) が2006年に心臓CTと心臓MRIの適応コンセンサスガイドライン“Appropriateness Criteria”を策定し⁵⁾、欧州ではそれを基に2008年、ESC (European Society of Cardiology) がガイドラインを策定している⁶⁾。

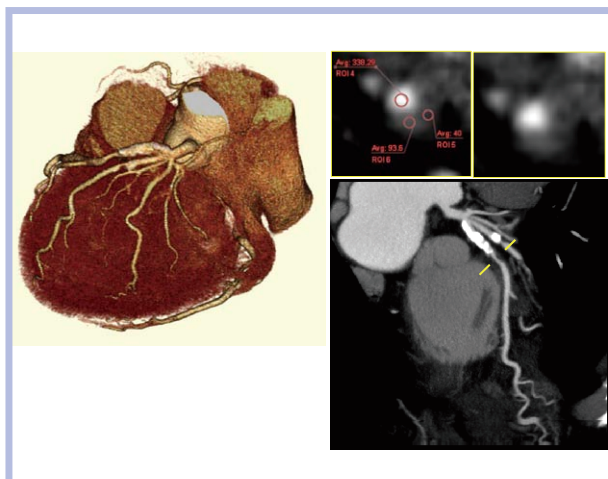


図3 MDCTによる冠動脈プラークの評価
(三重大学医学部附属病院, 使用装置: Aquilion 64)

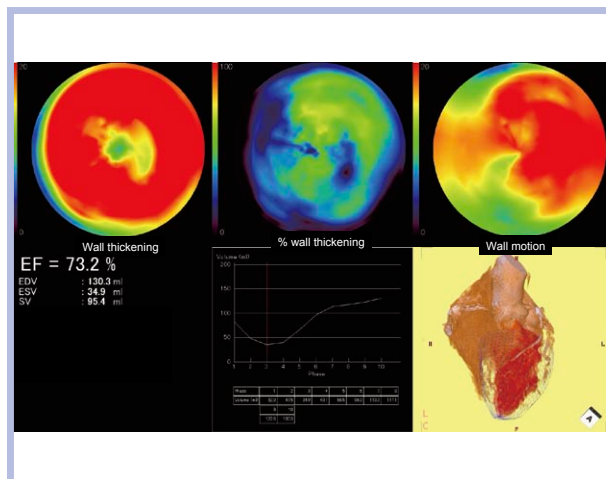


図4 MDCTによる左室機能評価
(三重大学医学部附属病院, 使用装置: Aquilion 64, ZIOSTATION)

表3 MSCTとMRIによる左室機能評価の比較
(Schlosser, T., et al. *Acta Radiologica* 2007;48:30-35より引用)

β ブロッカー投与により心機能が変化することに注意!

Summarized data of MR and MDCT values

	EDV, ml	ESV, ml	SV, ml	EF, %	CO, ml
MR	144.2±46.7	63.8±47.3	80.3±15.6	59.3±15.4	5755±1267
MDCT	164.2±52.5	77.3±46.6	86.8±18.1	55.4±11.8	4822±779
P	<0.05	<0.05	0.44	<0.05	<0.05

Comparison between MR and MDCT values of a 54-year-old female

	HR, bpm	EDV, ml	ESV, ml	SV, ml	EF, %	CO, ml
MR	80	124.0	36.3	87.7	70.7	6911
MDCT	53	172.5	72.4	100.1	58.1	5303

[Appropriateness Scores]

Appropriate for Indication 7~9
Uncertain for Indication 4~6
Inappropriate for Indication 1~3

●症状(労作時胸痛, etc)のある症例

- ・中等度のCADリスク (Framingham risk score) 7
負荷心電図判定困難or運動負荷不能
- ・中等度のCADリスク 5
負荷心電図判定困難and運動負荷可能
- ・高度のCADリスク 2

●無症状の症例

- ・高度のCADリスク (Framingham) 4
- ・中等度のCADリスク 2
- ・軽度のCADリスク 1

●虚血診断目的の負荷検査が行われている症例

- ・負荷検査の結果が判定困難/equivocal 8
- ・負荷検査で心筋虚血(+) 2

●急性胸痛の患者

- ・中等度のCADリスク (Framingham) 7
心電図変化なしand血清酵素陰性
- ・高度のCADリスク 6
心電図変化なしand血清酵素陰性
- ・軽度のCADリスク 5
心電図変化なしand血清酵素陰性

●PCI・CABG後-症状のある場合

- ・冠動脈バイパスグラフトと冠動脈の評価 6
- ・冠動脈ステント再狭窄の評価 5

●PCI・CABG後-無症状

- ・冠動脈バイパスグラフトの評価 2
CABG後5年以内
- ・冠動脈バイパスグラフトの評価 3
CABG後5年以上
- ・冠動脈ステント内再狭窄の評価 3

図5 Appropriateness Scoresによる冠動脈CTAの症例別のスコア判定

Appropriateness Criteriaでは, Appropriateness Scoreという基準が設けられているが, これは必ずしもエビデンスに基づく客観的なものではなく, 複数のエキスパートが冠動脈CTAの適応をどの程度を妥当と考えているのかを示すものである。妥当性を示すスコアは1~9までであり, 7以上については冠動脈CTAの積極的な実施を推奨, 6~4は要検討, 3~1は適応外を意味している。

図5は, 冠動脈CTAの妥当性をまとめたものだが, 労作時胸痛などの症状がある症例のうち, 中等度のCADリス

クがあり, 負荷心電図での判定困難, もしくは運動負荷が行えない症例や, 虚血診断目的の負荷検査が行われている症例で負荷検査の結果が判定困難な場合などは, 冠動脈CTAの良い適応となる。また, ガイドラインが策定された当時はエビデンスの不足からスコア5や6とされた項目についても, エビデンスの集積や放射線被ばくの低減が進めば, 冠動脈CTAの適応になっていくものがあると考えられる。

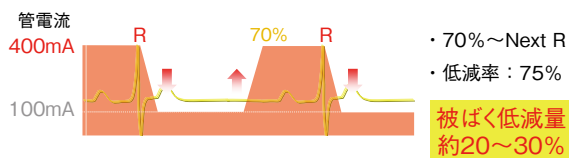
現在のところ, 冠動脈CTAの適応は原則として胸痛のある症例に限られ, 無

症状の症例は適応とならない。しかし, Appropriateness Criteriaは, 64列MSCTの被ばく線量が10~20mSvと比較的多いことが前提となっており, 今後の冠動脈CTの適応拡大は, 被ばく低減技術の進歩と密接にかかわってくる。

冠動脈CTAの適応範囲を広げるさまざまな被ばく低減技術

放射線被ばくという観点から冠動脈CTを見ると, ほかの体部CT撮影と違うのは, 16~20cmという限局した範

被ばく低減を目的に心電図の波形（R-R間）において管電流(mA)を変調させてECG同期ヘリカルスキャンを行う。



- ・収縮期に低線量，拡張期に通常線量で撮影
- ・線量低減率も任意に変更可能
- ・変調位相を任意に設定可能

図6 ECG DoseModulationの原理

心電同期ヘリカル撮影時に，従来よりも高速ヘリカルピッチを適用し，さらに至適心位相にのみX線曝射することにより，被ばくを大幅に低減。

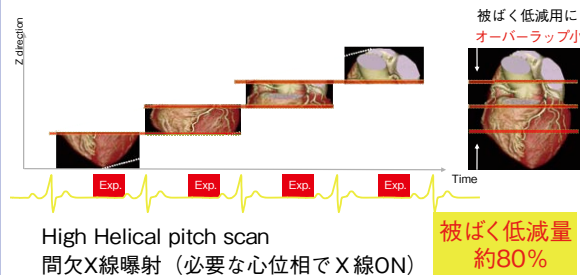


図7 Prospective ECG Gating Flash Helical Scanの原理

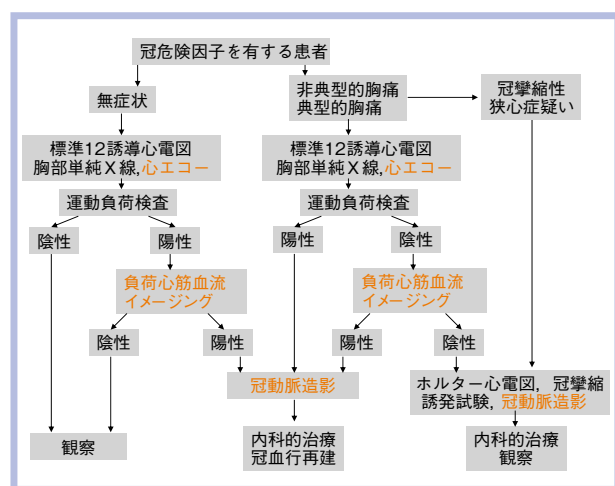


図8 心筋虚血の診断手順

(日本医師会編：心臓病の外來診療S117より引用)

ことで，20～30%の被ばく低減が可能となる（図6）。また，Prospective ECG Gating Flash Helical Scanは，心電図同期によるヘリカル撮影時に，従来よりもヘリカルピッチを高速化し，かつ至適心位相にのみX線を曝射することで，撮影のオーバーラップを最小限に抑え，最大約80%の被ばく低減が可能である（図7）。

心臓CTによる 虚血診断の可能性

虚血性心疾患の診断にあたっては心筋虚血の評価が不可欠であり，負荷心筋血流イメージング（SPECT）が広く用いられている（図8）。最近では，SPECTと冠動脈CTのフュージョン画像による冠動脈狭窄と心筋虚血の統合評価も行われ，高い有用性が示されているが，検査コストや被ばくが比較的大きいという問題も指摘されている。

MSCTで心筋虚血が評価できれば，1回のCT検査で治療方針を決定できる可能性があるが，Georgeら⁸⁾は，イヌのLAD狭窄モデルによって，アデノシン負荷心筋造影CTで虚血が評価できると発表している。当院においても，東芝社のAquilion 64によって，アデノシン負荷造影CTを施行し，虚血と冠動脈の同時評価の検討を行っている。

囲にCT撮影が行われることである。JAMAの論文⁷⁾では，CT撮影1回の全身被ばく線量が15mSvの場合であっても，心臓周辺臓器の被ばく線量（organ doses）は，肺が最大91mSv，乳房が最大80mSvに達する場合があるとしている。20歳の女性では，乳房の発がんリスクが約0.3%高まると試算している。冠動脈CTによって発がんリスクが本当に高まるのか否かについては，さまざまな意見があるが，被ばく低減技術を用いずに冠動脈CTを行うと，肺や乳腺の被ばく線量が低線量被ばく（0～100mSv）の上限近くに及ぶ場合もあることには，十分注意する必要がある。

冠動脈CTの適応を考える際には，患者ごとのリスク度を考慮する必要がある。日本人の冠動脈疾患死は欧米より

も少ないものの，NIPPON DATA80（図2）で黄色から赤で表示される高リスク患者については，10年間で10%以上死亡することを考えると，冠動脈CTAを行うメリットの方が被ばくによるリスクよりはるかに大きいと言える。そのため，Framingham Risk Score等でリスクを判定した上で，その患者がNIPPON DATA80の黄色から赤に該当するような中～高リスク例であれば，積極的に冠動脈CTAを診断・治療に活用していくべきではないかと考える。また，CTによる被ばく低減が図られれば，その適応症例の範囲はより広がっていく。

東芝社の被ばく低減技術には現在，さまざまなものがある。ECG Dose Modulationは，心電図同期の波形に応じて管電流を変調させてスキャンを行う

図9は、アデノシン負荷造影CTと心筋パーフュージョンMRIによる虚血部位を比較したものであるが、2つのモダリティの所見が非常によく一致しているのがわかる。われわれは、心筋パーフュージョンMRIをゴールドスタンダードとしてアデノシン負荷造影CTと比較してみたが、感度88%、特異度80%、PPV88%、NPV80%、Accuracy85%と、いずれも高い値が得られており(Ishida, M., RSNA 2008)、MSCTによる心筋虚血の評価は、診断法としての大きな可能性を秘めていると考えている。

ただし、64列MSCTでは、放射線被ばくの制約から、負荷時と安静時の両方を撮影することはできない。また、ATP・アデノシンを使用すると心拍数が増えるため、冠動脈CTの画質が低下するほか、撮影時相が心臓の上部と下

部で異なるなど、いくつかの問題がある。

これらの問題を解決してくれるのが、東芝社のArea Detector CT「Aquilion ONE」である(図10)。

● Aquilion ONEによる さまざまな可能性

Aquilion ONEは、スキャンスピード0.35秒/回転、検出器幅は0.5mm×320列(160mm)であり、心臓全体を1回転で撮影できる(図11)。そのため、ヘリカルスキャンに起因するアーチファクトが低減し、画質の大幅な向上が期待できる。また、従来の64列MSCTでは、心臓の上部と下部で造影タイミングがずれてしまうため、定量評価が難しいという問題があったが、1回転で心筋全体をカバーできれば、心筋血流の定量評価も可能になる(図12)。撮影方法もさまざまであり、Calcium Score(石灰化ス

コア、位置決め用)、CTA/CFA(1心拍以上の連続撮影)、Prospective CTA(あらかじめ決められた心位相のみ曝射)などによって大幅に被ばくが低減できるため、心臓CTの臨床適応分野がさらに拡大すると思われる。心臓CT、特に冠動脈狭窄と負荷心筋パーフュージョンCTによる虚血評価のone-stop-shopが可能になれば、虚血性心疾患の診断樹が大きく変わる可能性があり、正確な診断が早く行えることにより、診療の質の向上と医療コストの低減に結びつくものと期待を寄せている。

心臓MRIの有用性と課題

●心臓MRIの適応

心臓MRIは、シネMRIによる左室機能や局所壁運動の評価、負荷心筋パーフュージョンMRIによる心筋梗塞や心

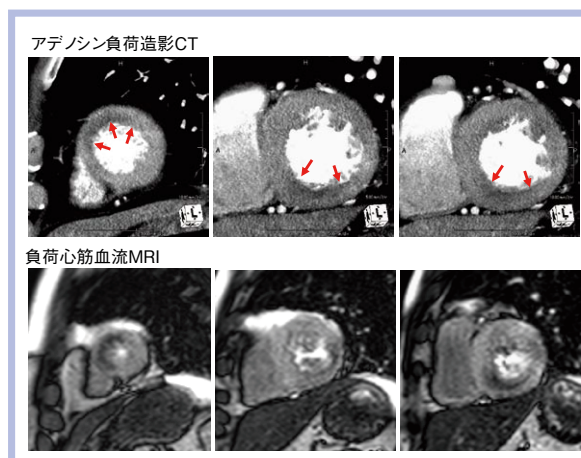


図9 アデノシン負荷造影CTと心筋パーフュージョンMRIによる虚血部位の比較(三重大学医学部附属病院)



図10 Aquilion ONEの主な仕様

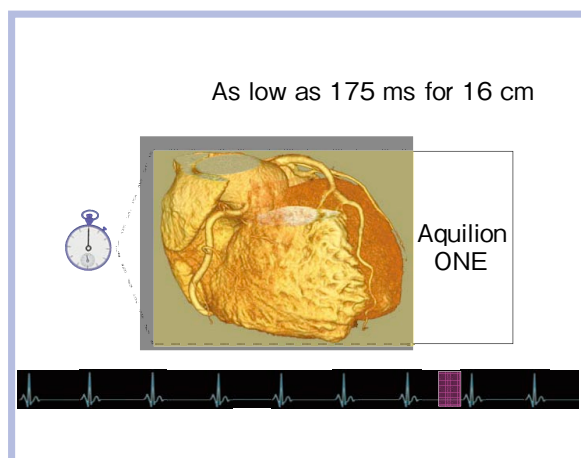


図11 Dynamic Volume Cardiac

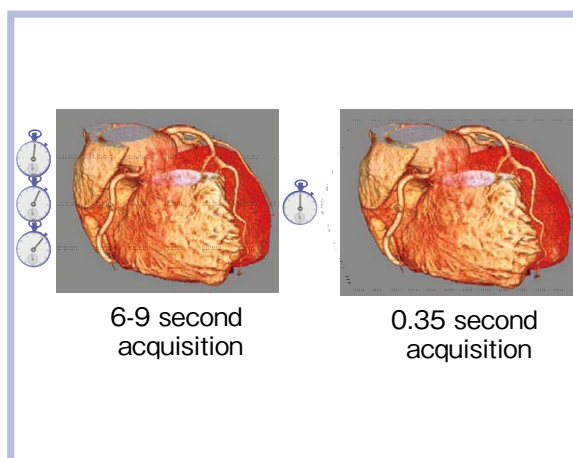


図12 Aquilion ONEによる心筋血流の定量評価の可能性

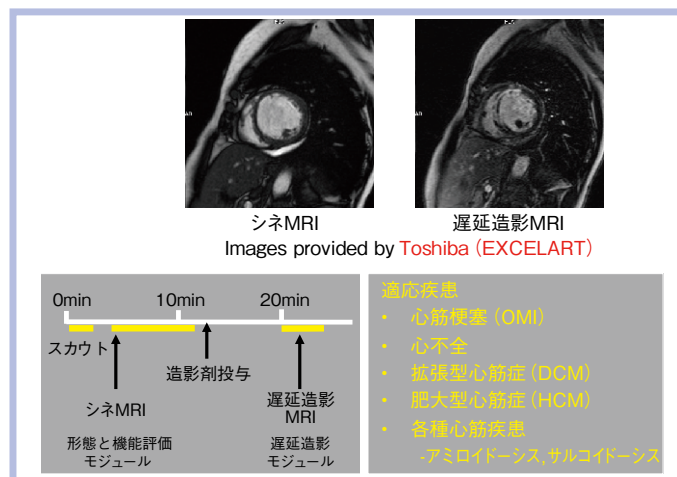


図13 シネMRIと遅延造影MRIを中心とした心臓MRI
(使用装置：EXCELAT Vantage 1.5T)

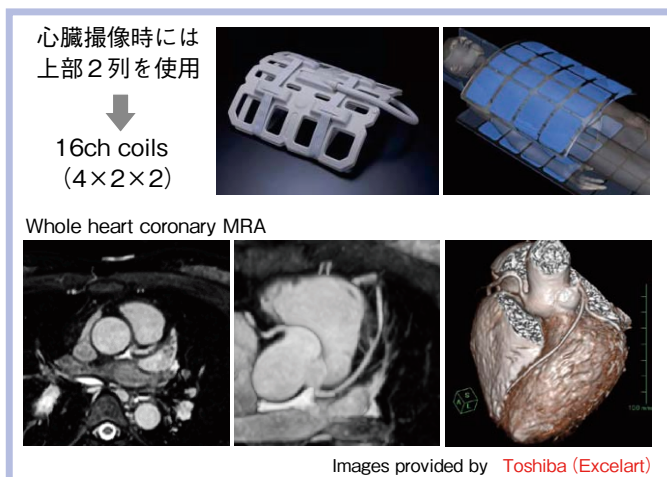


図14 Toshiba Atlas SPEEDER
(32 elements)

筋虚血の評価，遅延造影MRIによる心筋バイアビリティの評価，冠動脈MRAによる冠動脈狭窄の評価が可能である。

心臓MRIの適応度を見ると，負荷パーフュージョンMRIと遅延造影MRIについては，かなり幅広いケースで Appropriateness Scoresが7以上となっている。しかし，冠動脈MRAについては，MRAを安定して撮像できる装置が少ないため，冠動脈奇形の評価のみがスコア8であり，冠動脈狭窄の評価については適当でないとされている⁵⁾。

図13は，東芝社製のEXCELART Vantage 1.5TによるシネMRIと遅延造影MRIを中心とした心臓MRIだが，この2つの撮像法は，全国の病院でぜひ行っていただきたい撮り方である。心筋梗塞，心不全，拡張型心筋症，肥大型心筋症などが主な適応となる。

特に，遅延造影MRIについては心筋バイアビリティ診断の感度，特異度ともSPECTと比較して高く，CAD疑い症例の予後予測に非常に有用性が高いとの報告も相次いでいる。CTと比べると梗塞・正常心筋のコントラストに優れているため，遅延造影についてはMRIが第一選択の検査法である。冠動脈MRAについては，検査時間10～20分，感度78～96%，特異度68～96%との報告がなされている。また，このような撮像時間の長い検査では，多チャンネルコイルが撮像時間短縮に非常に役立つ。東芝社製のMRIの場合には，32チャンネル

コイルのうち，上半分の16チャンネル分を使用することで，高精細なwhole heart coronary MRAを得ることができると発表されている(図14)。また，負荷心筋パーフュージョンMRIによる心筋虚血の描出能は非常に高く，当院の検討では，負荷心筋SPECTよりも有意に診断能が高いとの結果が得られている。

●心臓MRIの課題と展望

心臓MRIをルーチンで行うためには，高度な撮像技術が要求される，診断目的に応じた撮像法の標準化がなされていない，撮像に時間がかかるため(約30～60分)検査枠の確保が困難，などといった課題が数多くある。しかし，心筋梗塞と心筋虚血の有無を判断することで冠動脈イベントのリスクを判断することが可能であることを考えると，負荷心筋パーフュージョンMRI，遅延造影MRIと冠動脈MRAを行って，虚血・梗塞と冠動脈狭窄を総合的に評価できることはメリットが非常に大きいと言える。今後はより多くの施設で，心臓MRIが施行されることが望まれる。

●参考文献

- 1) Vanhoenacker, P.K., et al. : Diagnostic performance of multidetector CT angiography for assessment of coronary artery disease ; meta-analysis. *Radiology*, **244**・2, 419～428, 2007.
- 2) Arad, Y., et al. : Coronary calcification, coronary disease risk factors, C-reactive protein, and atherosclerotic cardiovascular disease events ; The st francis heart study. *J. Am. Coll. Cardiol.*, **46**, 158, 2005.

Coll. Cardiol., **46**, 158, 2005.

- 3) Motoyama, S., et al. : Multislice computed tomographic characteristics of coronary lesions in acute coronary syndromes. *J. Am. Coll. Cardiol.*, **50**, 319～326, 2007.
- 4) Sugeng, L., et al. : Quantitative assessment of left ventricular size and function ; Side-by-side comparison of real-time three-dimensional echocardiography and computed tomography with magnetic resonance reference. *Circulation*, **114**, 654～661, 2006.
- 5) Hendel, R.C. : Appropriateness criteria for CCT and CMR working group ; ACCF/ACR/SCCT/SCMR/ASNC/NASCI/SCAI/SIR. *J. Am. Coll. Cardiol.*, **48**, 1475, 2006.
- 6) Schroeder, S. : CCT indications, applications, limitations, and training requirements working group of ESC and european council of nuclear cardiology, *Eur. Heart J.*, **29**, 531, 2008.
- 7) Einstein, A.J., et al. : Estimating risk of cancer associated with radiation exposure from 64-slice computed tomography coronary angiography. *JAMA*, **298**, 317, 2007.
- 8) George, R.T., et al. : Multi-detector computed tomography myocardial perfusion imaging during adenosine stress. *J. Am. Coll. Cardiol.*, **48**, 153～160, 2006.

座長

田村 正三

宮崎大学医学部放射線医学講座教授

佐久間 肇

三重大学医学部附属病院中央放射線部准教授

1985年，三重大学医学部卒業。同年，同附属病院研修医。福井医科大学附属病院放射線科助手，三重大学附属病院放射線科助手，カリフォルニア大学サンフランシスコ校放射線科MRI部門，三重大学附属病院放射線科講師などを経て，98年から現職。