

## 画像診断の進歩と血管内治療：MDCT の進歩と PCI

川崎 友裕 福山 尚哉 古賀 伸彦

**要 旨：**MDCT は空間分解能，時間分解能に優れるため，冠動脈壁の構造，プラークの鮮明な描出が可能である。その情報量は心臓カテーテル検査(CAG)に比べ格段に多く，有用性は CAG を凌駕する。またその非侵襲性のため，外来において病変スクリーニング，病変の評価，さらには治療方針の決定までもが可能となってきた。今回，MDCT 時代を迎えた現在の，カテーテル治療(PCI)における MDCT の役割・活用について概説する。(J Jpn Coll Angiol, 2011, 51: 95-104)

**Key words:** percutaneous coronary intervention, multi-detector row computed tomography

### はじめに

Multi-detector row computed tomography(MDCT)による心臓血管画像の撮影技術の進歩は目覚ましい。近年急速に普及している 64 列 MDCT は冠動脈の 3 次元構築が可能で，空間分解能に優れているため，冠動脈の解剖学的異常や冠動脈壁に存在するプラーク病変の鮮明な描出ができるようになった。その情報量は従来の冠動脈造影検査(coronary angiography; CAG)による情報量をはるかに凌駕するため，外来レベルにおいて冠動脈病変のスクリーニングや病変の性状評価，さらには治療方針の決定までもが可能となってきた。今回，MDCT 時代を迎えた現在の，PCI の治療戦略決定における MDCT の役割・活用について概説する。

### MDCT による冠動脈病変の評価の進歩

現在最も普及している心臓 CT(64 列 MDCT)では約 0.6 mm 程度の空間分解能を持ち，ガントリー回転速度の高速化(0.33~0.35 sec)および画像再構成法の進歩がもたらす時間分解能の向上により鮮明な冠動脈画像の撮影が可能となった。さらに近年では，多列化の推進(最大で 320 列)，ガントリー回転速度のさらなる向上(最速で 0.27 sec)や dual source システムの導入，high resolution コンセプトなどの導入により従来よりも motion artifact, banding artifact の低減，時間分解能の向上，空間分解能

の向上がもたらされるなど，冠動脈病変の描出性能はさらに向上してきた。

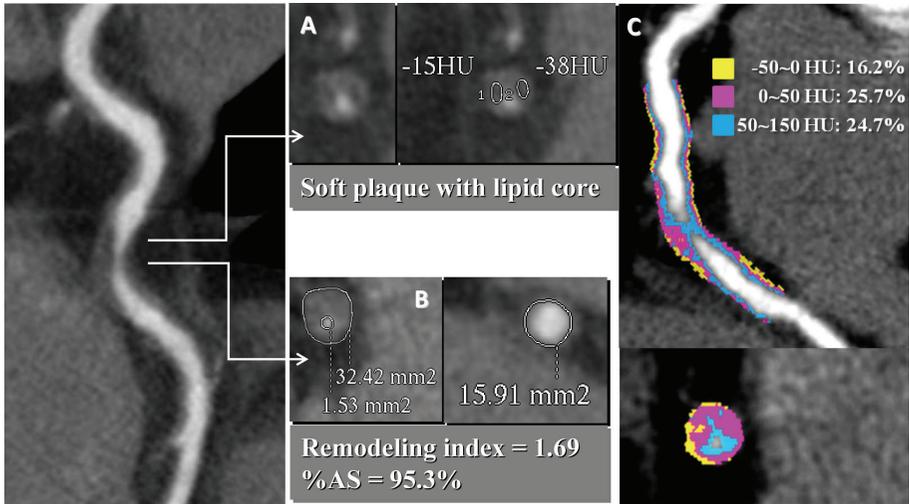
### 冠動脈病変の検出

心臓 CT 撮像後の画像再構成は基本的に VR(volume rendering)像，CPR(curved multi-planar reconstruction)像，MIP(maximum intensity projection)像を作成する。

作成された画像は 3 次元的な構成要素を含むため，解剖学的構造や形態学的異常の把握が容易で，病変部分の血管径や病変長および分岐角度に関してはかなり正確な測定が可能である。また通常冠動脈造影検査で行われる場合と同様の角度での血管の描出やそれ以外の任意の角度での血管の描出も可能となる。病変の検出は CPR 画像で行い，病変部分の性状評価は CS(cross section)画像を用いて狭窄度やプラークの詳細を検討することとなる(後述)。心臓 CT による冠動脈病変の診断精度は Sensitivity 86~99%，Specificity 83~97%，Positive predictive value(PPV)64~87%，Negative predictive value(NPV)98~100%と極めて高く<sup>1-5)</sup>，安定型狭心症のスクリーニングのみならず，不安定狭心症や非 ST 上昇型心筋梗塞などの救急疾患の診断にも大きな威力を発揮する。

### PCI に至るまでのプロセスの簡略化

心臓 CT 導入後の日常臨床における虚血性心疾患の診療体系も大きく変化してきた。事前の問診や冠動脈危険



**Figure 1** Evaluation of the coronary plaque. A, B: CS image shows the characterization of the coronary plaque (minimum CT value:  $-38$  HU  $-15$  HU, remodeling index 1.69 in this case), C: Color code mapping visualizes the plaque composition and its proportion clearly. CS, cross section; HU, hounsfield unit

因子の有無、心電図検査などで事前確率が高いと判断されれば、次のステップとして心臓 CT により非観血的に冠動脈病変の評価を行い、その後の方針を決定することが増えてきている。すなわち診断のための CAG が省略可能であり、心臓 CT 所見に基づいた十分なインフォームドコンセント、抗血小板剤などの介入を事前に行っておけば、予め心臓 CT による病変情報が得られているためいわゆる ad-hoc PCI ではなく、elective PCI に近い感覚で手技に臨むことができるようになった。心臓 CT 導入後、PCI の 80% 程度がこの簡略化されたプロセスで PCI が行われ(新古賀病院データ)、経済的、肉体的ストレスの軽減にも有効である。このように臨床現場への心臓 CT の導入は、虚血性心疾患領域における診断・治療の体系を大きく変化させるほどの恩恵をもたらすこととなった。

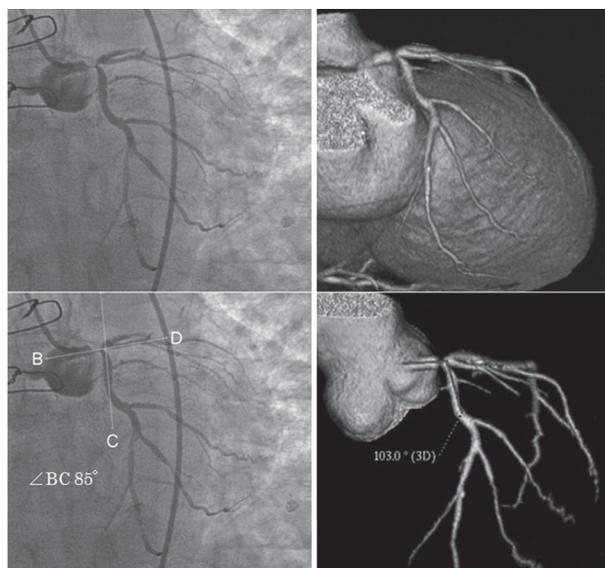
### 治療戦略の決定

#### 1. プラーク病変の評価

CAG の最大の欠点は冠動脈壁内に存在するであろうプラークの局在を同定困難なことであり、そこに心臓 CT の大きな利点がある。現在主流となっている 64 列心臓 CT では  $0.5\sim 0.6$  mm 程度の空間分解能がある。通常プラークの同定は CPR 画像により行い、CS 画像により詳

細な検討を行う。心臓 CT では大まかな病変長や血管径の計測およびプラークの性状評価が可能である。CPR 画像は 3 次元的な構成要素を含むため、病変部分の血管径や病変長に関してはかなり正確な測定が可能である。PCI の際に使用するステントのサイズバリエーションが多くなった現在、事前のサイズ予測に関して必要性が薄らいできている部分もあるが、治療方針の一助となることは間違いない。また CS 画像では IVUS 様の画像表示が可能で、プラークの形態(石灰化か非石灰化か、求心性か偏心性か、プラークの組成、リモデリングの程度など)が容易に判断可能である。さらに CT 値に応じてプラーク性状を表示することも可能で(color code mapping)、視覚的にプラーク性状が容易に把握できる。

**Fig. 1** にプラーク評価の実例を示す。病変部分での CS 画像から形態的には内部に最低 CT 値  $-38\sim -15$  hounsfield unit の脂質コアを有する最大プラーク面積  $31$   $\text{mm}^2$ 、remodeling index 1.69 の positive remodeling プラークであることがわかる。また color code mapping を行うと、プラークの組成とその分布・割合が視覚的に明瞭に表示可能となる。本症例のように低 CT 値を伴う positive remodeling を呈するプラークは近年の研究から ACS に移行する可能性の高い不安定プラークの特徴であることが明らかとなってきた<sup>6,7)</sup>。



**Figure 2** Discrepancy of bifurcation angle between CAG and CTA.<sup>10)</sup>

CAG showed the 85 degree of LMT-LCx bifurcation angle (left), in contrast, CTA showed the 103 degree (right). The measurement by CAG is underestimated in comparison with that by CTA.

CAG, coronary angiography; CTA, computed tomographic angiography; LMT, left main trunk; LCx, left circumflex

**Table 1** Results for each bifurcation angle<sup>10)</sup>

	∠LMT-LAD	∠LMT-LCx	∠LAD-LCx
Average	143°	121°	72°
Maximum	178°	168°	156°
Minimum	102°	63°	33°
	∠LAD-Diagonal	∠LAD-OM	
Average	138°	134°	
Maximum	170°	176°	
Minimum	62°	63°	
	∠RCA-4AV	∠RCA-4PD	∠4AV-4PD
Average	152°	137°	61°
Maximum	178°	168°	128°
Minimum	114°	82°	29°

## 2. 分岐部病変の評価

分岐部病変の治療における重要な情報として、分岐角度とプラークの分布が挙げられ、CTによる情報が有用である。

### 1) 分岐角度

分岐部治療における問題点のひとつとしてステントの留置方法が挙げられる。昨今の分岐部治療におけるステント留置は基本的にシングルステント(+同時拡張)法が推奨されているが、臨床の場においては時に2本のステント留置を必要とするような病変に遭遇する。しかしステントの留置方法によってはステント間にgapを生じる、側枝側のストラットの拡張が不十分となるなど、分

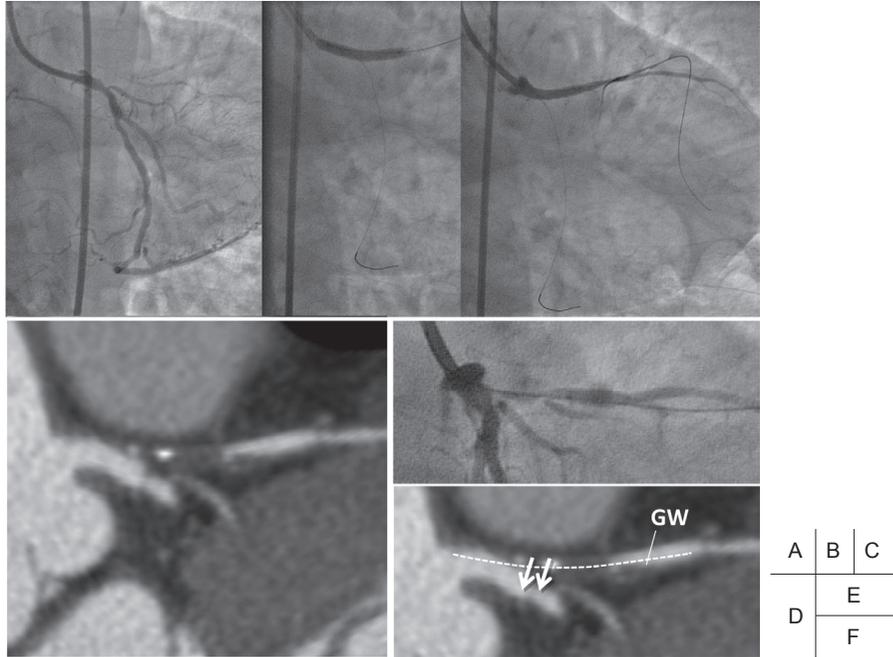
岐角度がステント留置の際の重要なポイントとなる<sup>8,9)</sup>。

この分岐角度の把握において心臓CTの情報が非常に有用となる。すなわち従来のCAGでの分岐角度の測定は2次元的评价であるため不正確(過小評価)であったが、CTAは3次元的评价法であり検者間での測定誤差も少なく、このため正確な分岐角度の評価が可能である(Fig. 2)。Table 1に当院で行った連続209症例における冠動脈主要分岐部の分岐角測定の結果を示す<sup>10)</sup>。

### 2) プラーク分布

分岐部病変の治療を行う際、分岐部周囲のプラークの分布状況は治療結果に大きな影響を及ぼすことがあり非常に重要となる。以下にプラーク分布の違いが治療結果に大きく影響を及ぼした典型的な2症例を示す。

症例1は70歳代の男性、最近発症の前壁梗塞あり。冠動脈造影上は左前下行枝(LAD)入口部で完全閉塞しており、左回旋枝(LCx)入口部にも軽度の狭窄を認めた(Fig. 3A)。本症例ではバルーンで前拡張を行った後、左主幹部(LMT)からLADにかけて3.5×28 mmの薬剤溶出性ステントを留置したが、ステント留置後にLCxが完全閉塞してしまった(Fig. 3B, C)。前壁梗塞の症例であり、LCx閉塞を生じたため血行動態が不安定化したが、幸いLCx方向にGWを留置していたため、ストラット越しにLCx方向にGW挿入に成功し、再灌流させることができた。本症例における治療前の心臓CTではLAD



**Figure 3** Representative case with circumflex occlusion (Case 1).  
 A: CAG shows a totally occluded LAD ostium.  
 B, C: After 3.5×28 mm drug-eluting stent deployment from LMT to LAD, circumflex was totally occluded unexpectedly.  
 D: CTA before stenting showed the large plaque burden with thrombus at the ostial LAD.  
 E, F: According to the image after guide wire crossing, both the plaque shift and the carina shift were thought to have occurred after stenting.  
 LAD, left anterior descending artery; other abbreviation the same as in Fig. 2.

入口部から一部 carina を越えて LCx 側に隆起するような low density プラークが認められており (Fig. 3E), 実際に GW が挿入された状況 (Fig. 3D) を併せて考えると, ステンツが留置されたことによりこのプラークが carina を越えて LCx 入口部方向にシフトし (plaque shift), さらに大径のステントを使用したことで carina 自体も LCx 方向にシフトしたこと (carina shift) が, LCx の閉塞を生じたものと考えられた (Fig. 3F, 矢印)。

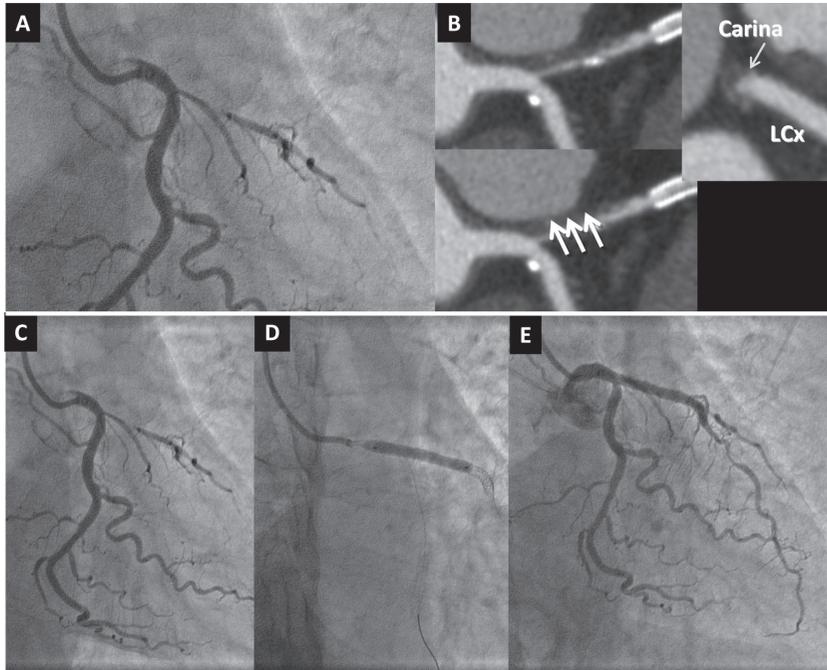
一方, 症例 2 は同様の LAD 入口部の重完全閉塞症例であったが (Fig. 4A), 心臓 CT (CPR および CS 画像) による観察では分岐部周囲のプラークは LCx と対側に認められ, LCx 側 carina には存在していないことが明らかであった (Fig. 4B)。このような症例ではステント留置を行ってもプラークは LCx 方向にシフトする危険性が少ないと考えられ, 実際ステント留置後も LCx 入口部の開存は良好に保たれていた (Fig. 4C~E)。本症例では IVUS

上も LCx 入口部は狭小化がなく良好に保たれていたため, あえて LCx 方向の拡張は行わずに手技を終了した。

このように分岐部病変におけるプラーク分布様式の違いは, 治療時に大きな影響を及ぼすことがわかる。症例で示したように心臓 CT では IVUS 同様のプラーク分布が短軸および長軸断面で表示できるため, 治療に伴うプラークシフトの予測が可能であり, 治療前に把握できることは分岐部治療における非常に有用な情報となる。

### 3. Slow flow の予測

PCI 中に発生する slow flow, no reflow 現象は PCI 治療における大きな問題点の一つである。この現象は PCI により冠動脈病変が十分に拡張されたにもかかわらず, その灌流域の血流が極めて悪くなる状態であり, その主な原因はプラーク内に存在するコレステリン結晶などの内容物 (debris) がバルーン拡張やステント留置による機械的圧迫のため血管内へ流れ出し, 末梢血管で“目詰ま



**Figure 4** Representative case without circumflex occlusion (Case 2).  
 A: CAG shows a sub-totally occluded LAD ostium, B: CTA showed the large plaque burden in the ostial LAD opposite to LCx. According to CTA image, there is little concern of plaque shift.  
 C-E: In this case, ostial circumflex well opened after stenting and crossing over the circumflex.

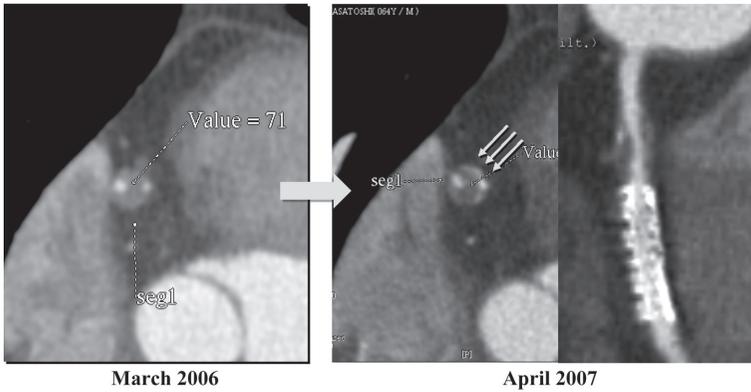
り”するためであると考えられる。これらの多くは一過性で10分から15分程度で回復し、心筋逸脱酵素の上昇も認められないが、時に強いslow flow, no reflowを生じ、心筋逸脱酵素の上昇を伴う微小梗塞を生じ、左心機能の低下をもたらすこともあるため、これらを予測することは重要な意味を持つ。

このslow flow, no reflowに関しては従来からIVUS上の所見(大きな脂質プール像、陽性リモデリングしたプラーク、後方超音波減衰像、virtual histologyにおける多量のnecrotic coreの存在など)が、その予測に用いられていた<sup>11-13)</sup>が、近年、CT所見による予測可能な報告が散見されるようになった。Nakazawaらはプラーク部分の断面(cross section)像において、プラークの周辺がリング状にエンハンスされるような所見(signet ring-like appearance)がみられるようなプラークではPCI中にslow flowをきたす場合が有意に多く、プラークのCT値が低いとslow flowが強くなる傾向があることを示した<sup>12)</sup>。われわれの検討でもCT値が非常に低い(0 HU未満)陽性リモデリングしたプラークはslow flowの発生頻度が高く、

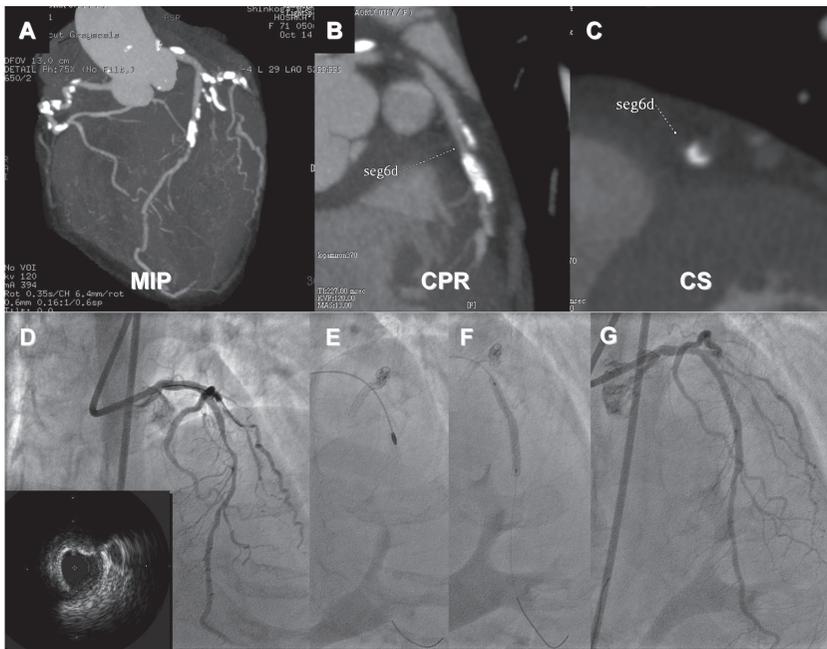
IVUSとの比較では高頻度に強い後方超音波減衰エコー所見が認められた<sup>14)</sup>。このプラーク周辺がリング状にエンハンスされる機序としてはプラークへの新生血管の増殖が考えられている。Fig. 5にNakazawaらのいうsignet ring-like appearanceを呈したプラークの実例を示す。本症例ではバルーン拡張直後に強いslow flowを生じており、このようなCT所見を呈する病変の治療の際は、slow flowの発生を念頭に置き、末梢塞栓の予防手段を考慮する必要があると思われる。

#### 4. 高度石灰化病変の評価

石灰化の存在はPCI治療の障害(デバイスの不通過など)となるだけでなく、ステントの拡張不良やステント離断をもたらし、慢性期のステント再狭窄の原因となる。このため強い石灰化病変や全周性に近い石灰化病変ではロータブレードの積極的な使用が考慮され、その判断が必要となる。心臓CTでは石灰化の分布が明瞭に表示されるため治療となる病変での石灰化の分布状況が把握可能であり、ロータブレードの必要性の事前判断が可能である。以下に石灰化病変における治療の実例を



**Figure 5** Plaque with ring enhancement. Ring enhancement phenomenon at the circumference of the positive remodeling plaque is observed at CS image on April 2007 (arrow). It dose seem possible that intra-plaque vasa vasorum enhanced by contrast may be responsible for the ring appearance.



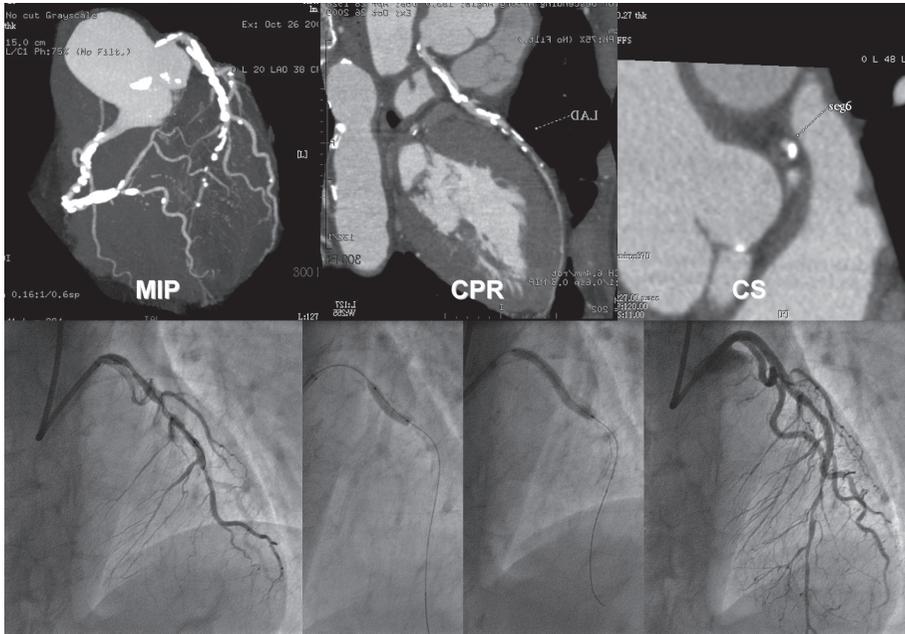
**Figure 6** Representative case of severe calcified lesion with rotational atherectomy (Case 1). CTA demonstrated focal but severe calcification in the proximal LAD (A, B). CS image demonstrated severe calcification over 180 degree, then, the necessity of the rotational atherectomy was suggested (C). IVUS image also demonstrated superficial calcification about 230 degree (D). Stent deployment was completed by using rotational atherectomy (E-G).

示す。

症例 1 は労作性狭心症の症例である。心臓 CT(MIP, CPR)では LAD 領域に限局性の強い石灰化を認めた (Fig. 6A, B)。同部位の CS 画像では 180 度以上の石灰化が確認され、ロータプレートによる切削の必要性が示唆された (Fig. 6C)。実際 IVUS 上も 230 度の石灰化病

変であることが確認され (Fig. 6D)、1.75 mm ロータバーで切削することでバルーンおよびステントの十分な拡張が得られ、治療を完了した (Fig. 6E~G)。

これに対して、症例 2 では心臓 CT(MIP, CPR)で症例 1 以上のびまん性の高度の石灰化が認められていたが (Fig. 7A, B)、CS 画像では 90 度以下の石灰化であるこ



**Figure 7** Representative case of severe calcified lesion without rotational atherectomy (Case 2). CTA demonstrated diffuse severe calcification in the proximal LAD (A, B). However, CS image demonstrated calcification under 90 degree, so no need of rotational atherectomy was suggested (C). Actually, stent deployment was completed without rotational atherectomy (D-G).

A	B	C
D	E	F
	G	

とが判明し(**Fig. 7C**), ロータブレータは必要なしと判断した。IVUSによる観察は行わなかったが, 血管造影上も高度の石灰化が連続して視認されたにもかかわらずバルーンは十分に拡張したため, ロータブレータによる切削は行わずにステント留置を完了することができた(**Fig. 7D~G**)。このように石灰化病変の場合, 心臓CTによる情報からロータブレータの必要性が判断できるため, 事前に十分なインフォームドコンセントを行い ad-hoc でロータブレータ治療に移行することも可能である。

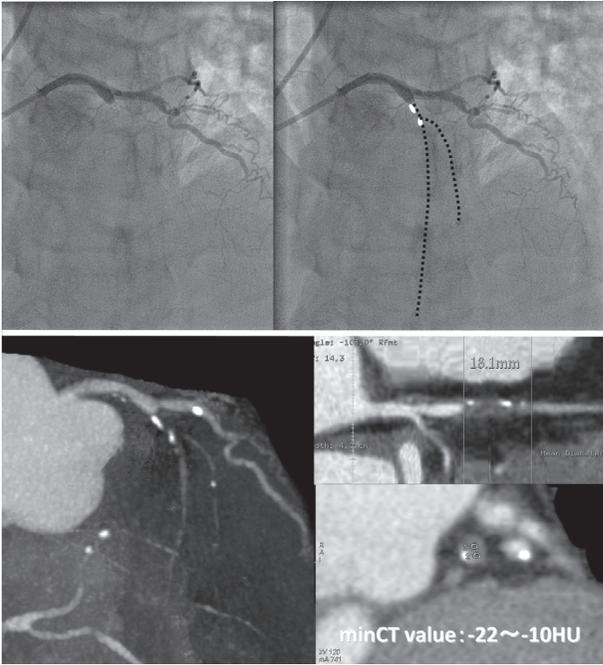
### 5. CTO 病変への応用

CTO 病変における心臓CTの活用方法としては閉塞長の予測はもとより, 閉塞断端の把握, 石灰化の分布, micro channel の確認, 閉塞血管の走行などが推定可能で, これらの情報はCTO治療における効果的なワイヤー操作の一助となる。実例を示しながらその有用性について述べる。

症例1はLAD近位部でのCTO症例である。血管造影では閉塞断端以遠の血管走行が不明であるが(**Fig. 8A**), 血管造影と同方向のMIP画像では断端直後に存

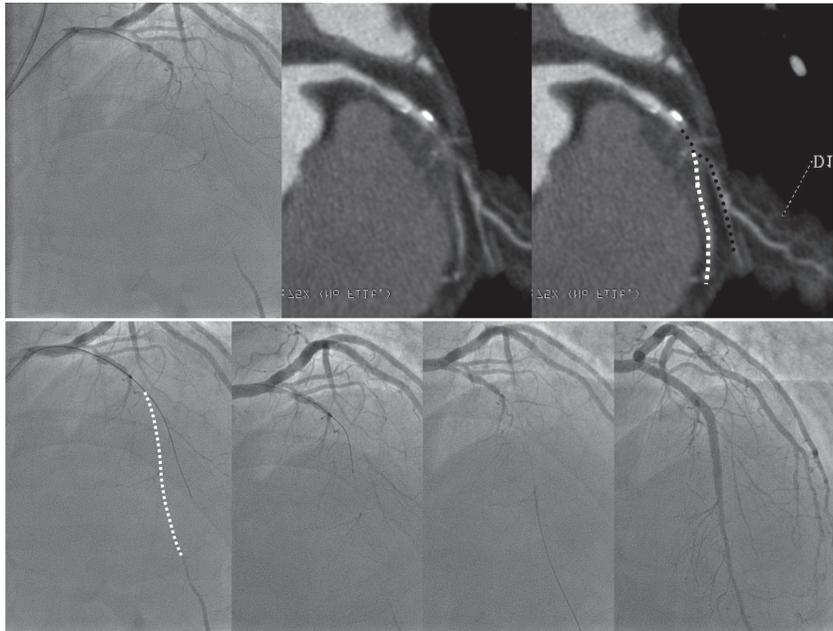
在する偏心性の石灰化とその先のLADの走行, LADから分枝する対角枝の存在および走行が明瞭に示されていた(**Fig. 8B**)。この心臓CTの画像を参考にする事で治療時に石灰化および閉塞したLAD, 対角枝の位置関係を推測することができ治療に大いに役立った(**Fig. 8C**)。また stretched CPR 画像では閉塞部分の長さともCS画像にて閉塞部分のプラークの性状も推測可能であった(**Fig. 8D, E**)。

症例2もLAD近位部のCTOである(**Fig. 9A**)。心臓CTのCPR画像では閉塞した病変部分に対角枝方向に通じるmicro channelの存在が認められ(**Fig. 9B**, 黒破線), また閉塞したLADの分岐位置およびその走行が明瞭に観察された(**Fig. 9B**, 白破線)。冠動脈造影上も心臓CTと同様に対角枝方向へのmicro channelの存在が認められ, GWは対角枝方向へ容易に通過した(**Fig. 9C**)。その後, CTの情報をもとにLAD方向を想定しchannelを探したところ(**Fig. 9C**, 白破線), 容易にLAD方向にGWを通過させることができ血行再建に成功した(**Fig. 9D~F**)。



A	B
C	D
	E

**Figure 8** Application of CTA to CTO lesion (Case 1). Representative case of CTO in the proximal LAD. The vessel running behind CTO was not visualized on CAG. In contrast, MIP image showed the vessel running behind CTO and also calcium deposit clearly (A–C). In addition, occluded lesion length, vessel diameter at lesion and also plaque characteristics could be evaluated (D, E).



A	B
C	D
E	F

**Figure 9** Application of CTA to CTO lesion (Case 2). Representative case of CTO in the proximal LAD (A). CPR image clearly showed the micro channel to diagonal branch and both the entry point and the direction of occluded LAD (B). CAG also showed the micro channel to diagonal branch. Based on the CTA information, the GW could pass into the LAD easily and the PCI was completed (C–F).

これらの症例に示されるように、造影上は描出されないようなCTO部以降の冠動脈走行も描出が可能であり、血管走行の目印となる石灰化はとくに明瞭に示される。また時に造影ではわかりにくいような閉塞病変内のmicro channelも認められることがあり、CTOワイヤー操作の際の有用な情報となる。

### まとめ

以上、PCI治療における心臓CTの活用について概説した。心臓CTの情報を十分に活用すれば、難易度の高い病変の治療もより安全にかつスムーズに行うことが期待でき、治療成績の向上につながるのではないかと思われる。また冠動脈病変のスクリーニング精度の高さ、その情報量の多さからその活用範囲は多岐にわたり、冠動脈疾患領域における心臓CTの役割はますます重要なものとなっていくものと思われる。

### 文 献

- 1) Leschka S, Alkadhi H, Plass A et al: Accuracy of MSCT coronary angiography with 64-slice technology: first experience. *Eur Heart J*, 2005, **26**: 1482–1487.
- 2) Mollet NR, Cademartiri F, van Mieghem CA et al: High-resolution spiral computed tomography coronary angiography in patients referred for diagnostic conventional coronary angiography. *Circulation*, 2005, **112**: 2318–2323.
- 3) Pugliese F, Mollet NR, Runza G et al: Diagnostic accuracy of non-invasive 64-slice CT coronary angiography in patients with stable angina pectoris. *Eur Radiol*, 2006, **16**: 575–582.
- 4) Raff GL, Gallagher MJ, O'Neill WW et al: Diagnostic accuracy of noninvasive coronary angiography using 64-slice spiral computed tomography. *J Am Coll Cardiol*, 2005, **46**: 552–557.
- 5) Ropers D, Rixe J, Anders K et al: Usefulness of multidetector row spiral computed tomography with 64- × 0.6-mm collimation and 330-ms rotation for the noninvasive detection of significant coronary artery stenoses. *Am J Cardiol*, 2006, **97**: 343–348.
- 6) Motoyama S, Kondo T, Sarai M et al: Multislice computed tomographic characteristics of coronary lesions in acute coronary syndromes. *J Am Coll Cardiol*, 2007, **50**: 319–326.
- 7) Motoyama S, Sarai M, Harigaya H et al: Computed tomographic angiography characteristics of atherosclerotic plaques subsequently resulting in acute coronary syndrome. *J Am Coll Cardiol*, 2009, **54**: 49–57.
- 8) Ormiston JA, Currie E, Webster MW et al: Drug-eluting stents for coronary bifurcations: insights into the crush technique. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2004, **63**: 332–336.
- 9) Ormiston JA, Webster MW, Webber B et al: The "crush" technique for coronary artery bifurcation stenting: insights from micro-computed tomographic imaging of bench deployments. *JACC Cardiovasc Interv*, 2008, **1**: 351–357.
- 10) Kawasaki T, Koga H, Serikawa T et al: The bifurcation study using 64 multislice computed tomography. *Catheter Cardiovasc Interv*, 2009, **73**: 653–658.
- 11) Katayama T, Kubo N, Takagi Y et al: Relation of atherothrombosis burden and volume detected by intravascular ultrasound to angiographic no-reflow phenomenon during stent implantation in patients with acute myocardial infarction. *Am J Cardiol*, 2006, **97**: 301–304.
- 12) Nakazawa G, Tanabe K, Onuma Y et al: Efficacy of culprit plaque assessment by 64-slice multidetector computed tomography to predict transient no-reflow phenomenon during percutaneous coronary intervention. *Am Heart J*, 2008, **155**: 1150–1157.
- 13) Okura H, Taguchi H, Kubo T et al: Atherosclerotic plaque with ultrasonic attenuation affects coronary reflow and infarct size in patients with acute coronary syndrome: an intravascular ultrasound study. *Circ J*, 2007, **71**: 648–653.
- 14) Kawasaki T, Koga S, Koga N et al: Characterization of hyperintense plaque with noncontrast T(1)-weighted cardiac magnetic resonance coronary plaque imaging: comparison with multislice computed tomography and intravascular ultrasound. *JACC Cardiovasc Imaging*, 2009, **2**: 720–728.

## Improvement of MDCT and Its Role in PCI

Tomohiro Kawasaki, Takaya Fukuyama, and Nobuhiko Koga

Cardiovascular Center, Shin-Koga Hospital, Fukuoka, Japan

---

**Key words:** percutaneous coronary intervention, multidetector row computed tomography

MDCT has great potential to depict coronary artery walls and coronary plaques clearly because of its superior time and special resolution. The amount of information from MDCT is significantly larger than that from conventional coronary artery angiography (CAG), and therefore, MDCT may surpass conventional CAG in daily utilization. In addition, for its non-invasiveness, MDCT can be used in disease screening and evaluation of lesion characteristics, and it also can be useful in deciding on strategies. This time I outline the role and the utilization of MDCT in the PCI in the MDCT era as follows: 1) To simplify the process from screening to PCI. 2) Decision of the PCI strategy including a) Evaluation of the lesion characterization, b) Evaluation of the bifurcation lesions, c) Prediction of slow flow phenomenon, d) Evaluation of the heavy calcified lesion, e) Application to the CTO lesions.

(J Jpn Coll Angiol, 2011, **51**: 95–104)