

Multidetector-row CTによる冠動脈評価

陣崎 雅弘 佐藤 浩三 田波 穰 山田 稔 栗林 幸夫

要 旨：MDCTの登場により，冠動脈を非侵襲的に画像化することが可能になった。CTの特徴は，冠動脈腔内の情報ばかりではなく，プラークを含めた血管壁の状態も同時に評価することができることにある。本稿では，MDCTを用いた冠動脈評価について，その進歩と現状を概説し，冠動脈造影にどこまで迫れ，どのような点において冠動脈造影を凌駕できるかについて述べる。

(J Jpn Coll Angiol, 2004, 44: 701-708)

Key words: multidetector-row CT, coronary CT angiography, coronary artery

はじめに

冠動脈病変の評価は，冠動脈造影がgolden standardと考えられてきた。冠動脈造影は時間分解能も空間分解能も高いが，侵襲性があり，血管壁の情報を得ることができない。近年，CTの進歩は著しく，特にmultidetector-row CT(MDCT)の登場により，冠動脈を非侵襲的に画像化することが可能になった。CTの特徴は，冠動脈腔内の情報ばかりではなく，プラークを含めた血管壁の状態も同時に評価することができることにある。本稿では，MDCTを用いた冠動脈評価について，その進歩と現状を概説し，冠動脈造影にどこまで迫れ，どのような点において冠動脈造影を凌駕できるかについて述べていく。

MDCTの登場と進化

CTの画質を決定する要因としては，時間分解能，空間分解能，濃度分解能の3つが重要である。細い血管が高速で動いている冠動脈を画像化するには，これら3つの分解能すべてに従来より高いものが要求されることになる。冠動脈をCTでみようという試みはヘリカルCTの時代からあったが，時間分解能も空間分解能も十分ではなく，研究的な色彩が強かった。超高速CTは登場時から期待されたが，濃度分解能が十分ではなく，冠動脈造影を置き換えるまでには至らなかった。

MDCTの開発と進歩により，臨床応用可能な冠動脈像が得られるようになったが，その背景としては，検出器の多列化，ガントリーの回転速度の高速化，心臓専用画像再構成法の開発の3つの進歩が貢献している。

(1) 検出器の多列化

従来のヘリカルCTが1回転で1枚分の画像しか撮像できなかったのに対し，MDCTは検出器が体軸方向に多列化することにより，1回転で複数の画像を撮像できるようになった。これにより，撮像の高速化(時間分解の向上)と薄いスライス厚の撮像(空間分解の向上)が同時にできるようになった。1998年に4スライス分のデータを一度に撮像できる4スライスCTが登場し，心臓を1.25mmスライス厚で40秒かけて撮像できた。2002年に16スライスCTが登場し，0.625mmスライス厚で20秒かけて撮像可能になり，2004年末には64スライスCTが登場し，0.625mmスライス厚で5～7秒程度で撮像できるようになる。

(2) ガントリーの回転速度の高速化

ガントリーの回転速度の高速化は，心臓CTの時間分解能を向上させる重要な要因である。従来のヘリカルCTはガントリー回転速度が1秒であったが，1996年ごろから0.8秒が登場した。16スライスCTが登場した2001

慶應義塾大学医学部放射線診断科

2004年11月1日受理

年には0.5秒、2004年には0.4秒回転が可能になった。

(3) 心臓専用画像再構成法の開発と進歩

心臓は常に拍動しているために、これを画像化するには心電図に同期して撮像する必要がある。MDCTで心電図同期スキャンを行うには、心電図情報と画像情報を同時に収集しておいて、後から目的とする心位相のみのデータを抽出し、画像を再構成するretrospective gatingがおもに用いられる。

目的とする心位相のデータを抽出するにあたり、心拍数が60以下であればR-R間隔が長いので、例えば、拡張中期に合わせて1心拍のデータから画像を作ることができる。しかし、高心拍になるとR-R間隔が短くなるので、1心拍のデータからのみで画像を作ろうとすると拡張期も収縮期も混在した像になり、良好な画質が得られない。このため、連続した複数の心拍から同じ位相のデータを抽出し、これらを組み合わせることで再構成データを作成する方法が開発された。この方法はマルチセクタ再構成法と呼ばれる(メーカーにより呼び名は異なる)。これにより、時間分解能が向上したことになる、高心拍にも対応可能になった。

撮像方法

当院ではGE社の16スライスCTを用いているが、スライス厚0.625mmを用いて約20秒程度で撮像できる。造影剤は60～75cc(370mgI)に生食20ccの後押しを併用し、注入速度3cc/sで注入している。撮像は、テストインジェクション法(造影剤10～15ccと生食15cc)で得られたピーク時間の2秒後に開始するようにしている。造影剤注入開始から大体20秒後程度である。また、検査に際しては、TNG(ニトログリセリン)0.3mgを舌下噴霧投与して、冠動脈を拡張させて撮像している。

至適心位相は、右冠動脈起始部、右冠動脈鋭縁枝分岐部、左回旋枝の鈍縁枝分岐部付近の3カ所(最も動きが大きいとされている)において5%ごとに水平断の画像を再構成し、最も冠動脈の動きの少ない時相とその前後5%の時相の3時相を画像再構成している。

画像表示法はいくつかあるが、心臓全体像を俯瞰するにはvolume rendering法を用いる(Fig. 1)。冠動脈狭窄の判定とプラークの性状評価には、蛇行した走行を1断面に表示するcurved-MPR(multiplanar reconstruction)法と病変部の直交断面像を用いる(Fig. 2)。また、われ



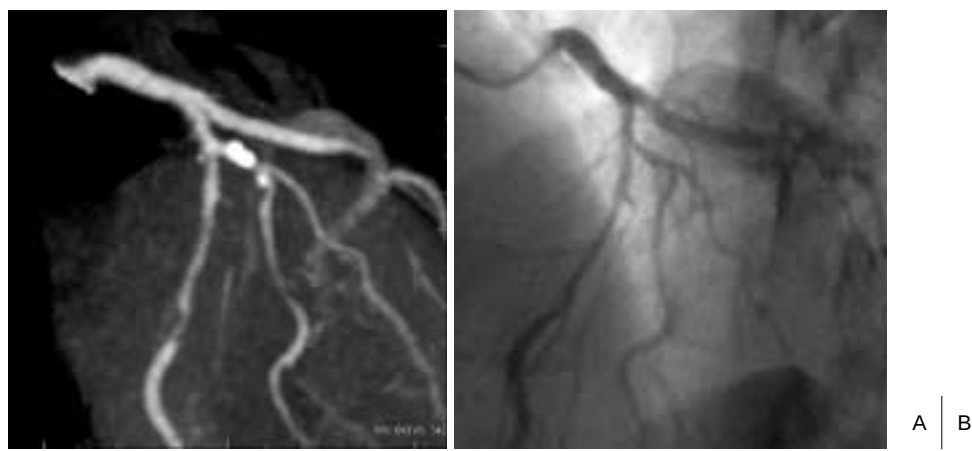
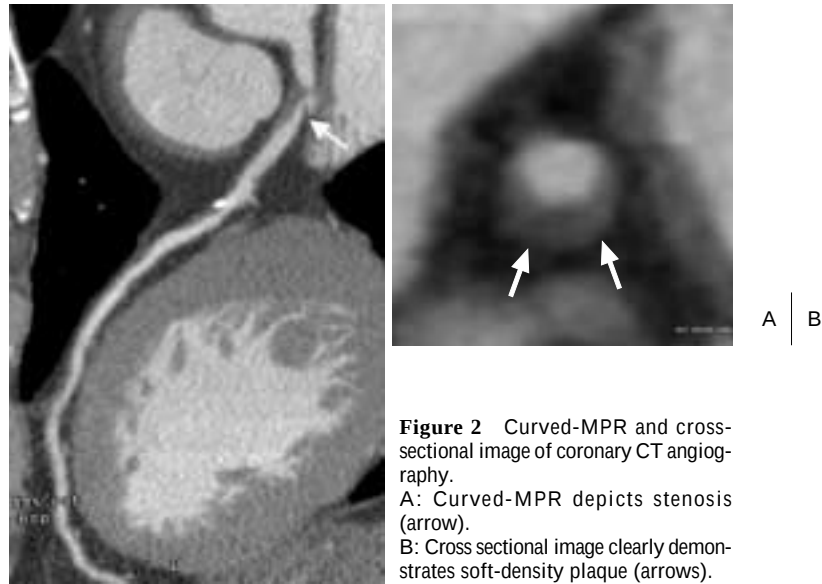
Figure 1 Volume-rendered image of coronary CT angiography.

This method works well in overviewing coronary artery. The distribution of calcification (arrows) is well demonstrated here.

われは冠動脈造影の表示に類似した新しい表示法を考案している。これは、心内腔の造影剤を除去した後、MIP(maximum intensity projection)法で表示し、従来の冠動脈造影の撮像方向に合わせて表示したものである(Fig. 3)。

冠動脈狭窄の評価

冠動脈狭窄の診断能は、16スライスCTで評価可能例が88%、評価可能例でのsensitivity 92%、specificity 93%、negative predictive value 97%と報告されている¹⁾。われわれの検討でも、有意狭窄(>50%)の診断能は、評価可能例が85%、評価可能例の中でsensitivity 98%、specificity 89%、negative predictive value 97%であり、大体同様の結果であった。従来の冠動脈造影(CAG)に比べてCTの空間分解能はるかに劣ることを考えると、感度が低いのは無理もないと思われる。しかし、negative predictive valueが高いので、冠動脈疾患の除外診断には特に有用と考えられる。実際、当院でも依頼のほとんどがatypical chest painであり、CTで有意狭窄がないことの確認および狭窄病変の検出の両面において威力を発揮している。また、狭窄度の評価に関しても、Hoffmanらは16スライスCTでの内腔面積やプラーク面積がintravascular ultrasonography(IVUS)での計測



値と非常に良い相関をすることを報告しており²⁾、今後に期待が持てる結果である。不整脈患者、心拍変動の大きい患者、重度の石灰化を呈する患者などで十分評価できないことがあるという問題点を残してはいるが、臨床的に十分有用なレベルになっている。

CTが最も有用性を発揮する場合の一つとして、完全閉塞例がある。冠動脈造影では閉塞部より末梢が側副路により適切に造影されていないと、閉塞部の全長が

十分評価できないが、CTでは閉塞部の血管壁が描出されるため、閉塞の長さや閉塞部の壁の性状が判断できる。また、側副血行路自体の描出も可能であり(Fig. 4)、冠動脈インターベンション(percutaneous coronary intervention: PCI)に際して有用な情報を提供する。

プラークの検出と性状評価

プラークの性状診断は急性冠症候群の予測に有用な

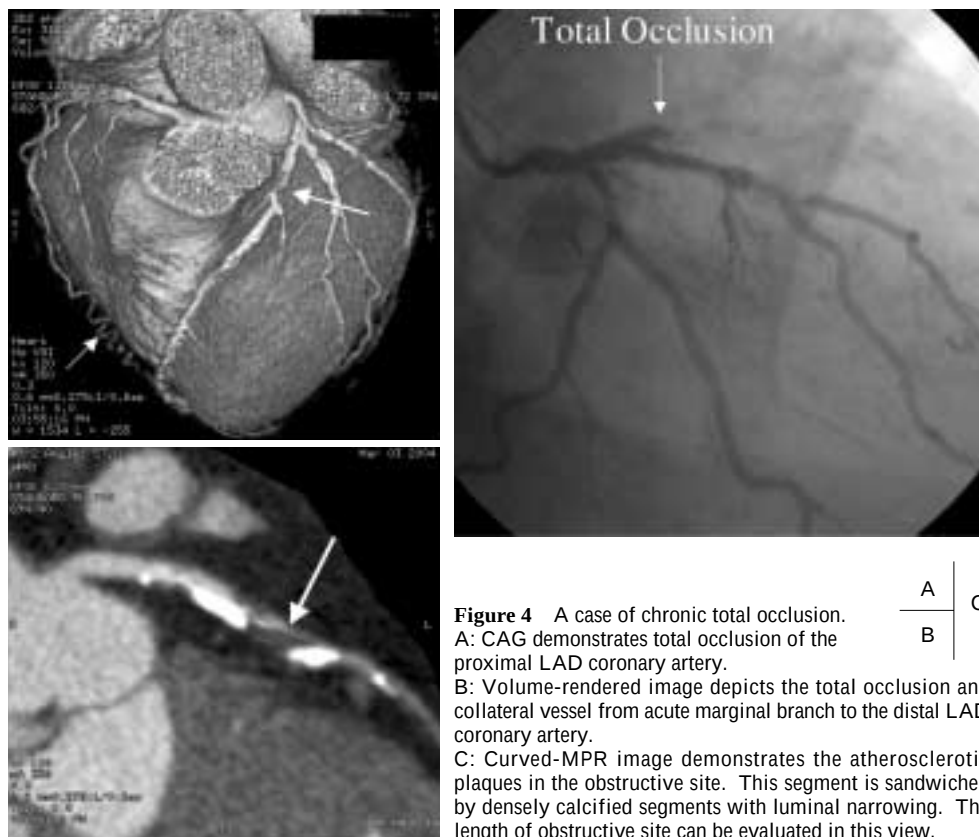


Figure 4 A case of chronic total occlusion.
 A: CAG demonstrates total occlusion of the proximal LAD coronary artery.
 B: Volume-rendered image depicts the total occlusion and collateral vessel from acute marginal branch to the distal LAD coronary artery.
 C: Curved-MPR image demonstrates the atherosclerotic plaques in the obstructive site. This segment is sandwiched by densely calcified segments with luminal narrowing. The length of obstructive site can be evaluated in this view.

可能性がある。急性冠症候群とは、急性心筋梗塞や突然死がそれ以前に何の症状もみられず、冠動脈造影で明らかな狭窄のない症例で起こる病態で、Fusterらにより命名された³⁾。原因としては不安定プラークの破綻が関与していると考えられている。プラークの不安定性にはいくつかの要因があるが、脂肪に富むプラークはその一つであると考えられている。また、心筋梗塞では安定狭心症に比べ、非石灰化プラークの頻度が高いとのデータもあり、脂質に富むプラークのほうがruptureにより心筋壊死に陥る頻度が高いことを意味している。現在、このようなプラークの不安定性に関する研究が各方面で進みつつあるが、CTでは濃度を測定することで、その性状を評価することに期待が持たれている。

CT値を用いてプラーク性状の評価を行った報告は、現時点ではまだ多くない。IVUSとの対比もしくは剖検例からのデータにより、CT値とプラーク性状について

は以下のように考えるのがよいと思われる⁴⁻⁷⁾。

脂肪を主体とするプラーク：60HU以下

線維を主体とするプラーク：61～119H

石灰化を主体とするプラーク：120HU以上

具体的には、プラークの数力所を小さな関心領域 (region of interest: ROI) を用いて計測し、最も主体となるCT値でそのプラークの性状を決めることになる (Fig. 5)。ただし、血栓と非石灰化プラークの鑑別は困難である。今後CT値での不安定プラークの評価が臨床的有用性を持つかどうかは、実際の臨床例でprospectiveに経過を追跡することにより検証していく必要がある。ちなみにLeberらは、急性冠症候群の患者のプラークのCT値は、安定狭心症の患者に比べて明らかに高かったと報告している⁸⁾。

CT値で冠動脈プラークを評価する場合には留意しておくべき注意点がいくつかある。プラークのCT値に影響すると思われるおもな要因を以下に挙げる。

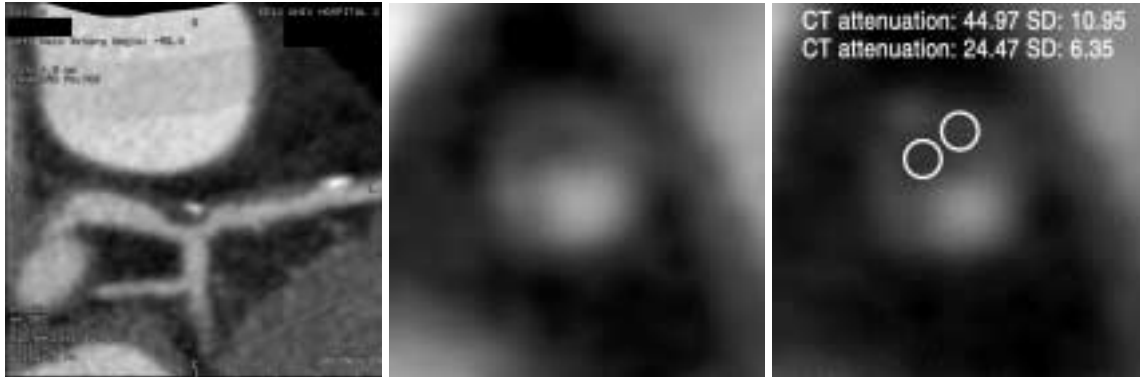


Figure 5 Plaque characterization.

A: Curved-MPR image demonstrates the atherosclerotic plaques in the distal main trunk and proximal LAD coronary artery.

B: Cross-sectional image demonstrates eccentric soft plaque.

C: Several regions of interest were placed in plaque and the densities are measured.

A | B | C

1 Partial volume effect

病変部とそれに接する非病変部が同じスライスの中に含まれると、その部位のCT値は病変部と非病変部との中間的なものになる。これをpartial volume effectと呼ぶ。この効果を極力除外するには、できるだけ薄いスライス厚で撮像することが必要になる。現状では、1mm程度の厚みで評価することが好ましい。

2 石灰化によるundershooting

プラークの一部に石灰化が存在すると、石灰化辺縁に生じるundershooting artifactにより、プラークの非石灰化部の濃度が低く表示されることがある。これを、内腔にソフトプラークがあると見間違えないことが重要である。重度の石灰化プラークが存在すると内腔の開存性そのものの評価が困難になるのも、この影響である。

3 Beam-hardening effect

撮像範囲に高い吸収値の領域が存在すると、そこを通過したX線は低いエネルギーが吸収され、CT値が通常より低く描出されてしまう。この効果をbeam-hardening effectと呼ぶ。冠動脈においても、左室内腔の濃度は造影後250～300HU程度に達するため、適切な補正が行われないとbeam-hardening effectがプラークに生じることが十分考えられる。

4 心拍動による影響

完全に静止した状態とは異なり、心拍動下の撮像であることにより、CT値に誤差が生じる可能性が考えら

れる。われわれは動態ファントムを用いて、この影響について実験的検討を行っている。5mm径の冠動脈で、25%狭窄プラーク(径1.25mm)では心拍ごとの誤差が非常に大きい(50%)が、50%(径2.5mm)や75%狭窄プラークでは心拍ごとのばらつきは25HU以内であった⁹⁾。したがって、1mm以下の径のプラークの測定精度は低いと考えたほうがよい。しかし、それ以上の径であれば、心拍によるCT値の変動は存在するが、思ったほど大きくないという印象である。

ステント内腔評価とバイパス術前・術後評価

ステントの開存性やバイパス後のグラフト部をCTで非侵襲的にチェックできれば有用性が高い。ファントムを用いた検討では、16スライスCTであればステントのメッシュ構造は描出可能である。また、ステント内腔の径はステントの材質により異なり、内腔径が太く、ステントのstrutが薄いほど、内腔描出の精度は高くなることが分かっている。臨床例の検討では、ステント内腔はステント自身のアーチファクトにより、CAGと比べて若干狭く描出される傾向がある¹⁰⁾。当院では、in-stent restenosisが描出できた例も経験している(Fig. 6), 実際にはステント近傍に生じるundershooting artifactと内腔狭窄の鑑別が困難なことが多い。このため、より内腔が広く明瞭に描出させることを目指して、ステントに適合した再構成カーネルの開発を試みているところである。

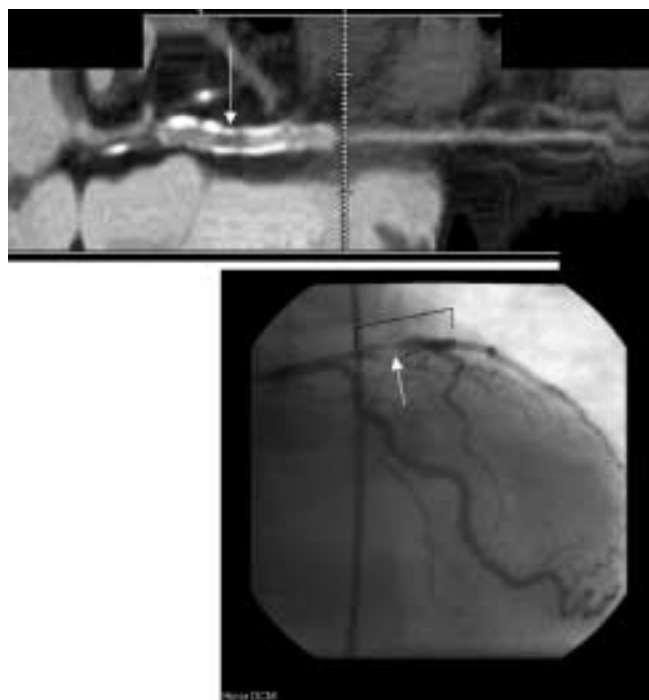


Figure 6 In-stent restenosis. A low density area is demonstrated in the middle portion of the stent. CAG demonstrates in-stent restenosis.



Figure 7 Post CABG evaluation. The volume rendered image (A) and curved MPR image (B) show that the anastomosis of venous graft to diagonal artery is patent.

また、バイパス術後の吻合部狭窄の有無に関しては、16スライスCTでは十分評価可能との報告が開始されている^{11,12)}。われわれも吻合の開存に関しては、ほぼ判定できていると考えている(Fig. 7)。ただ、当院ではグラフトの完全閉塞例の経験はあるが、吻合部のみの狭窄

症例の経験がない。16スライスCTでは、息止め時間を考えると冠動脈起始部から心底部までしか撮像できない。しかし、64スライスCTが登場すると、鎖骨下動脈も撮像範囲に入れることが可能で、グラフト起始部の評価もできるようになる。また、術前に内胸動脈の全

画像を評価することもでき、さらなる威力を発揮することになるであろう。

まとめ

以下に、冠動脈CTの現状をまとめる。

1) CTはnegative predictive valueが高いので、病変の除外診断に威力を発揮する。

2) CTは完全閉塞例での閉塞長の評価ができる。これは冠動脈造影では評価困難なので、PCIに際し有用な情報を提供する。

3) 急性冠症候群の疑われる場合に、狭窄を呈さないブランクを検出し、性状診断をある程度行えることは冠動脈造影を超える有用性である。

4) スtent内腔評価は、CTに最も期待される内容であるが、現状では十分評価可能とはいえない。今後、カーネルの最適化などにより、描出能の向上が期待される。

文 献

- 1) Ropers D, Baum U, Pohle K et al: Detection of coronary artery stenoses with thin-slice multi-detector row spiral computed tomography and multiplanar reconstruction. *Circulation*, 2003, **107**: 664–666.
- 2) Hoffman U, Aschenbach S, Ropers D et al: Measurement of cross-sectional coronary artery area by 16-slice multi-detector CT: comparison to IVUS. *Radiology*, 2003, **229** (P): 540.
- 3) Fuster V, Badimon L, Badimon JJ et al: The pathogenesis of coronary artery disease and the acute coronary syndromes. *N Engl J Med*, 1992, **326**: 242–250, 310–318.
- 4) Schroeder S, Kopp AF, Baumbach A et al: Noninvasive detection and evaluation of atherosclerotic coronary plaques with multislice computed tomography. *J Am Coll Cardiol*, 2001, **37**: 1430–1435.
- 5) Leber AW, Knez A, Becker A et al: Accuracy of multidetector spiral computed tomography in identifying and differentiating the composition of coronary atherosclerotic plaques: A comparative study with intracoronary ultrasound. *J Am Coll Cardiol*, 2004, **43**: 1241–1247.
- 6) Becker CR, Nikolaou K, Muders M et al: *Ex vivo* coronary atherosclerotic plaque characterization with multi-detector-row CT. *Eur Radiol*, 2003, **13**: 2094–2098.
- 7) Schroeder S, Kuettner A, Leitritz M et al: Reliability of differentiating human coronary plaque morphology using contrast-enhanced multislice spiral computed tomography: A comparison with histology. *J Comput Assist Tomogr*, 2004, **28**: 449–454.
- 8) Leber AW, Knez A, White CW et al: Composition of coronary atherosclerotic plaques in patients with acute myocardial infarction and stable angina pectoris determined by contrast-enhanced multislice computed tomography. *Am J Cardiol*, 2003, **91**: 714–718.
- 9) Jinzaki M, Sato K, Tanami Y et al: The accuracy of density measurements within plaques using multislice CT: Results of a pulsating cardiac phantom study. *Radiology*, 2003, **229** (P): 253.
- 10) Hong C, Chrysant GS, Woodard PK et al: Coronary artery stent patency assessed with in-stent contrast enhancement measured at multi-detector row CT angiography: initial experience. *Radiology*, 2004, **233**: 286–291.
- 11) Dewey M, Lembcke A, Enzweiler C et al: Isotropic half-millimeter angiography of coronary artery bypass grafts with 16-slice computed tomography. *Ann Thorac Surg*, 2004, **77**: 800–804.
- 12) Schlosser T, Konorza T, Hunold P et al: Noninvasive visualization of coronary artery bypass grafts using 16-detector row computed tomography. *J Am Coll Cardiol*, 2004, **44**: 1224–1229.

Current Status of Multidetector-row CT Coronary Angiography

Masahiro Jinzaki, Kozo Sato, Yutaka Tanami, Minoru Yamada, and Sachio Kuribayashi

Department of Diagnostic Radiology, Keio University School of Medicine, Tokyo, Japan

Key words: multidetector-row CT, coronary CT angiography, coronary artery

Multidetector-row CT angiography is new technology that allows non-invasive visualization of coronary disease. CT has great potential in providing the information of coronary arterial wall and in assessing directly atherosclerotic plaque formation, while conventional coronary angiography (CAG) provides only the information of lumen. In this review, we discuss the current status of coronary CT angiography, by focusing on advantages and disadvantages compared with CAG.

The accuracy of CT coronary angiography in detecting coronary artery stenoses appears promising, but sensitivity remains to be improved for routine diagnostic needs. The high negative predictive value may be useful for reliable exclusion of coronary artery stenoses. CT may allow noninvasive tissue characterization of plaque composition with good correlation to IVUS and histologic findings. This is especially interesting in light of evidence that suggests that the majority of acute coronary syndromes are caused by the rupture of nonstenotic vulnerable plaques. The clinical value of CT for the evaluation of in-stent restenosis remains largely limited. More sophisticated reconstruction algorithms are expected.

(J Jpn Coll Angiol, 2004, **44**: 701–708)