冠動脈疾患診断における心臓 CT の現状と今後の展望

高岡 浩之¹, 佐野 剛一², 石橋 巖³, 小林 欣夫¹

Hiroyuki Takaoka, Koichi Sano, Iwao Ishibashi and Yoshio Kobayashi: **Current status and future prospects of cardiac computed tomography for diagnosis of coronary artery disease.**

J Jpn Coron Assoc 2017; 23: 55-61

I. はじめに

心電図同期撮像法の開発や検出器の多列化を中心とした CT の技術的革新により、近年は造影 CT で冠動脈狭窄の診断が可能となった。特に 2004 年に登場した 64 列 CT によって安定した冠動脈狭窄診断が可能となり、実臨床現場で広く普及するようになった。その後もさらなる検出器多列化や逐次近似法といった新しい画像再構成法の登場等も加わり、最近では被曝低減や不整脈症例への適応拡大なども進んでいる。

本稿では、冠動脈疾患を対象とする心臓 CT の臨床的有用性について、現状を踏まえながら将来的展望も含め報告する。

II. 心臓 CT による冠動脈疾患診断の現状

冠動脈石灰化は病理学的検討から、粥状硬化総量と相関があることが実証されている¹⁾。単純 CT によって算出される冠動脈石灰化スコアは、一般集団における冠動脈疾患発生予測に有用であることが多くの臨床研究から明らかとなっている²⁾。このため、米国ガイドラインでは無症候性例のリスク評価に単純 CT による石灰化スコアが推奨されている³⁾。

わが国や米国のガイドラインでは、造影剤投与後早期相における冠動脈 CT (以後冠動脈 CT と称す) は、おもに中等度リスクを有す症候性症例への使用が推奨されている^{3,4)}。CT は冠動脈の解剖学的狭窄診断において有用とされ、侵襲的冠動脈造影 (invasive coronary angiography: ICAG) の所見との比較は多数報告されている。64 列 CT による検討をまとめた 695 症例のメタ解析結果では、冠動脈狭窄検出の感度 88%, 特異度 96%, 陽性的中率 79%, 陰性的中率 98% であった⁵⁾。この高い陰性的中率が冠動脈 CT の強みで、有病率が低い母集団において冠動脈狭窄のスクリーニングに有用と考えられる。一方で、高心拍時の冠動脈の動きや石灰化によるアーチファクトによって陽性的中率が低下するとされ、CT

のみで診断が困難な場合は、負荷心筋シンチグラフィなどの他の冠動脈機能評価法を追加する必要がある⁴⁾。高度石灰化病変に対しては、320 列 CT による 2 種類の冠動脈撮像 (造影から撮像のタイミングの異なる 2 回撮像、ないし造影 CT と単純 CT) をもとに、冠動脈 CT 画像から CT 石灰化領域を差分する subtraction 法も試されている。しかし、撮像機種が限定されることや被曝増加の問題等もあり、その有用性は確立されていない (Fig. 1)。

安定狭心症疑い例における冠動脈 CT での冠動脈狭窄診断能は、過去の大規模臨床試験で検証されている。2008 年に論文発表された ACCURACY 試験では、16 施設にて冠動脈 CT と ICAG を施行された 230 例において、冠動脈 CT の冠動脈の 50% 以上有意狭窄の診断精度は ICAG と比較して、症例ごとで感度 93%, 特異度 82%, 陽性的中率は 63%, 陰性的中率 97% と報告している⁶⁾。同時期に報告された CORE 64 試験においても、50% 以上狭窄検出の症例ごとの診断精度は感度 85%, 特異度 90% と高かったが、陰性的中率が 83% とやや低かった。これは、有病率が前者で 24.8% だったのに対し後者では 56% と高かったことが影響したと考えられ⁷⁾、高い陰性的中率を得るためには、やはり適切な症例選択が重要と考えられる。

PROMISE 試験では、症候性の安定狭心症疑い症例 10,003 例において冠動脈 CT と冠動脈機能検査 (負荷心電図ないし負荷心筋シンチグラフィや負荷心エコー) の診断能が比較検討された⁸⁾。ランダム化後 90 日以内の ICAG は CT 群のほうがやや多かった (12.2% 対 8.1%) が、ICAG での冠動脈有意狭窄の非検出率は CT 群が冠動脈機能検査群より有意に少なかった (3.4% 対 4.3%)。平均で 25 ヶ月の追跡で、複合エンドポイントの発生率は両群で同等 (約 3%) であり、冠動脈 CT は従来の冠動脈機能検査と同等の診断能を有すると考えられた。

冠動脈 stent 留置後の症例についていえば、2010 年米国ガイドラインにおいて、無症候で左冠動脈主幹部に血管径 3mm 以上の stent 留置例の再狭窄評価は冠動脈 CT の適応とされる³⁾。実臨床では 3mm 以上の stent サイズであれば、左主幹部でなくとも広く CT 診断が行われているのが実情であ

¹ 千葉大学医学部附属病院循環器内科 (〒260-8677 千葉県千葉市中央区亥鼻 1-8-1), ² 東千葉メディカルセンター循環器内科, ³ 千葉県救急医療センター循環器治療科

doi: 10.7793/jcoron.23.006

Fig. 1 冠動脈 CT では左前下行枝近位部に強い石灰化病変があり、正確な狭窄度が評価困難であった (A: 矢印). Subtraction CT の技術を利用して石灰化除去を行ったところ、同領域の高度狭窄が疑われ (B: 矢印), 後日施行した ICAG でも同部位に同様の高度狭窄を認めた (C: 矢印).

Fig. 2 右冠動脈 stent 治療後の CT (A) と同症例の ICAG (B) を示す. Stent は近位部より 3.5mm (A: 矢印①), 3mm (A: 矢印②), 2.5mm 径 (A: 矢印③) の 3 本とも CT で良好な開存が確認でき, ICAG (B) と同様な所見であった. CT では新しい逐次近似画像再構成法の FIRST を用いており, 末梢側の 2.5mm 径の stent 内腔まで確認可能であった.

ろう. 特に近年は画像再構成法も進歩し, 新しい逐次近似画像再構成法の Forward projected model-based Iterative Reconstruction SoluTion (FIRST) を用いれば, 2.5mm 径の stent 再狭窄評価も可能になっている (Fig. 2). こうした stent 再狭窄評価や, 単純撮影時に中等度以上の石灰化病変を認める場合, 高画質の画像を得るため撮影時の徐拍化が特に重要で, 積極的に β ブロッカーを使用すべきである. また, われわれの過去の検討では, 肥満傾向の症例, 特に body

mass index (BMI) が 30 をこえる症例においては画質の低下により stent 再狭窄評価が困難な可能性があり注意が必要である⁹⁾. 冠動脈バイパス術後については, 症候性であれば CT 評価は適応とされている³⁾が, バイパス血管においては金属クリップによるアーチファクトが時に問題となる.

急性冠症候群が疑われる症候性患者における冠動脈 CT の有用性を示す報告も多い. ACRIN-PA 試験では, 急性冠症候群疑い 1,392 症例を冠動脈 CT 施行群, 通常診療群に分け,

CTの臨床的意義を検証した。その結果、前者では有意に病院滞在時間が短く（18.0時間対24.8時間、 $p < 0.001$ ）、より多くの症例が救急外来より直接退院できた（49.6%対22.7%）。また、CT群では急性冠症候群の診断頻度が高かった（9.0%対3.5%）が、症例の転帰に有意差は認めなかったとしている¹⁰⁾。

さらにROMICAT-II試験では、初期の心電図で有意変化がなく、心筋逸脱酵素の有意上昇がない急性冠症候群疑い1,000例において、従来の診断方法を用いた群と冠動脈CTを用いた群で、検査後の転帰が比較検討された。75名（8%）が急性冠症候群と診断されたが、両群で急性冠症候群の見逃しはなく、後者では在院時間も有意に短縮され、本検討においても救急外来での冠動脈CTの有用性が示された¹¹⁾。現行の米国ガイドラインでは、急性冠症候群を疑う胸痛例に対しては、心電図や心筋逸脱酵素の有意な上昇がない低～中リスク症例においては、冠動脈CTは適応とされている³⁾。

III. 心臓CTによる冠動脈機能評価の展望

FAME 2試験の報告後、冠動脈狭窄病変での冠血流予備量比（fractional flow reserve: FFR）の測定など、冠動脈機能評価の重要性が再認識されている¹²⁾。近年HeartFlow社（米国）によって通常の冠動脈CT画像をもとにFFRを解析可能な新しいソフトウェアが開発された。撮影時の薬物負荷も不要とされ、これによるFFR-CTの診断能を評価したDISCOVER-FLOW研究では、103例において症例ごとの解析で侵襲的FFR ≤ 0.8 を心筋虚血陽性とした場合、その診断精度は冠動脈CTのみでは感度91.4%、特異度39.6%であったが、FFR-CTでは感度が87.9%、特異度は82.2%と良好だった。ROC曲線下面積は、冠動脈CTのみで0.75であったが、FFR-CTでは0.90と有意に改善し、FFR-CTと侵襲的FFR計測値は相関係数0.717（ $p < 0.001$ ）と良好な相関を認めたとしている¹³⁾。その後もFFR-CTの有用性を示す同様の報告が続き、ICAGが予定された症例群において、通常診療を行う群187人とCT/FFR-CT群193人を比較したPLATFORM試験では、CT/FFR-CT群では予定されたICAGの61%が不要と診断され、ICAGでの閉塞性冠動脈疾患非検出率は、CT/FFR-CT群が有意に低かった（73.3%対12.4%、 $p < 0.0001$ ）。CT/FFR-CT群ではその後のイベント発生もなく、不必要なICAGを減らせる可能性が示された¹⁴⁾。

FFR-CTについては、当初解析時間やコスト面の問題が指摘されていたが、現在画像解析ソフト各社による開発競争も進んでおり、わが国においても早期の臨床応用が期待される。高度石灰化病変や高心拍時の撮像データではアーチファクトの影響で解析が困難との指摘もあり、さらなるデータの蓄積も必要と考える。日本循環器学会からFFR-CTの適正使用のための指針もホームページにて公表されており、使用の際にはこちらも参照されたい。

また、CTによるもう1つの冠動脈機能評価法として、アドノシンを用いた薬物負荷心筋灌流CTも行われるようになった。これは、ガドリニウム造影剤による薬物負荷心筋灌

流MRIと同様の撮像を、CTにおけるヨード造影剤投与下で行う取り組みである。これに関しては2014年に論文発表された世界規模のCORE320試験が有名で、本検討では381名を対象に、従来からの冠動脈CTに心筋灌流評価を加えて機能的有意狭窄を評価し、心筋シンチグラフィにICAGを加えた群と比較した¹⁵⁾。後者における心筋血流低下を有す機能的有意狭窄の診断を基準とした場合、冠動脈CT単独にくらべて負荷心筋灌流CTを加えると診断精度が有意に向上し（ROC曲線下面積；0.81対0.87、 $p < 0.001$ ）、感度80%、特異度74%、陽性適中率65%、陰性適中率86%としている。冠動脈CTで狭心症診断が困難な際は他の機能的検査が必要とされるが、心筋灌流CTの追加で診断が可能になれば、CTのみで完了できる強みが出る。

心筋灌流CTは2通りの撮像法が提唱されており、心筋灌流MRIと同様に造影剤の注入時にある一定時間連続撮像する方法と、前述のCORE320試験のように、冠動脈撮影時と同様の短時間撮像を行う方法がある。前者は被曝線量が増える懸念があるが、逆に後者では最適撮像タイミングを逃すリスクがあり、現段階ではどちらが優れているかの統一見解はない。前者の連続撮像法で心筋灌流CT撮影を施行した場合、特殊ソフトを用いることで冠血流予備能（coronary flow reserve: CFR）の解析が可能となり、¹⁵O-H₂O PETによって算出された値との相関が良好であった（相関係数0.67）とする報告もある¹⁶⁾。また冠動脈有意狭窄群と非狭窄群でCFRを比較したところ、前者において有意な低下を認め（ 2.3 ± 0.8 対 5.2 ± 1.8 ）、CTの被曝線量は平均12.8mSvだったとしている。

IV. 心臓CTによる症例予後予測の有用性

非症候性の冠動脈疾患スクリーニング対象症例においては、前述の冠動脈石灰化スコアは、死亡についての独立した予測因子となり得ることが、過去の電子ビームCTを用いた約5年の追跡データから実証されている¹⁷⁾。20,000人以上の被験者が登録された世界規模の前向きCONFIRM(Coronary CT Angiography Evaluation for Clinical Outcomes International Multicenter)試験のサブ解析結果からも、無症候性の症例における単純CTにおける石灰化スコアについては、従来の危険因子に加えたモデルが心事故発生予測に有用とされたが、さらに造影による冠動脈CTを加える正当性が示されたのは、石灰化スコアが中等度高値の症例に限定的とされている¹⁸⁾。さらに、多施設ランダム化試験のFACTOR-64試験も行われ、冠疾患既往のない無症候性糖尿病症例において冠動脈CT施行群と通常診療群（448人対452人）が比較されたが、4年間の追跡も全死亡・非致死的心筋梗塞・不安定狭心症入院で定義された有害事象に有意差は出なかった¹⁹⁾。やはり無症候性糖尿病患者への冠動脈CTの正当性は示されず、むしろ現状の対応策が良好であったことが推察される。

約7割の症候性症例を含んだ前述のCONFIRM試験では、平均2.3年の観察において冠動脈CTで検出された冠動脈有意狭窄の有無や病変枝数が総死亡の予測因子であることが証

Fig. 3 冠動脈 CT では左前下行枝に、不安定プラークに特徴的とされる陽性リモデリングや微小な石灰化、低 CT 値プラーク像を認め (A, B: 矢印, B は A における点線四角部分の拡大), この CT 撮影の約 4 年後に急性症候群を発症した. 急性冠症候群発症時の ICAG (C) では、前述のプラーク部位がほぼ完全閉塞に近い状況である.

Fig. 4 本症例は陳旧性心筋梗塞による心室性不整脈の診断に至った症例で、心臓 MRI (A) と、その後心室頻拍症に対するカテーテルアブレーション前の心臓 CT (B) を示す. いずれにおいても、左室側壁側心尖部に遅延造影を認め、MRI では心尖部血栓も認めるが、この後の抗凝固療法により、CT ではその消失が確認できた.

明された²⁰⁾. さらに、冠動脈 CT で異常がない症例の予後が良好であることも示され、予後予測の見地からも陰性的中率が高い検査であることが再認識された. 1,584 例の狭心症疑い症例において施行された冠動脈 CT 後の中央値 5.6 年の長期予後観察においても、有意狭窄の有無や多病変における冠動脈プラークの存在が心イベントの予測因子であると報告されている²¹⁾.

CT における急性冠症候群の責任病変の特徴として、脂質優位を示す低 CT 値プラークの存在や、病変部血管拡張を示す陽性リモデリング、微小石灰化の存在が知られる²²⁾. Motoyama らは、冠動脈 CT を施行した 3,158 例の平均 3.9 年 (最長 10.5 年) の予後を調査した結果、陽性リモデリングな

いは低 CT 値領域を認めるプラーク (Fig. 3) として定義される高リスクプラーク陽性群において、陰性群とくらべて急性冠症候群が有意に多く発症し (16.3% 対 1.4%), 同所見は心イベント発症の予測因子になり得るとしている²³⁾. ただし石灰化病変に近接する非石灰化プラーク領域は、アーチファクトのため CT 値が低下する傾向があり、計測の際は注意が必要である.

また、CT において冠動脈プラークの辺縁に高信号像を認める ring-like sign も不安定プラーク病変の特徴の 1 つとされ、1,168 名の検討においては、冠動脈の陽性リモデリングや非石灰化部分のプラーク量や、低 CT 値プラーク量に並び、プラーク周囲のリング状高信号領域の存在が症例の予後に有意に関連したとされる²⁴⁾. 本所見の実態については諸説あるが、微小石灰化の集簇ないし vasa vasorum をみている可能性が指摘されている.

V. 遅延造影 CT による心筋梗塞 (線維化) 評価

造影後期相 (6 分後以降) における遅延造影撮影が心筋梗塞や線維化の描出に有用であることは、かなり以前から報告されている (Fig. 4)²⁵⁾. ルーチンでの撮影は被曝や画質の問題から推奨されないが、MRI が撮影できない場合等に使用を検討してもよいであろう. 造影早期相の撮影で、左室心筋に低 CT 値を認める場合は特に、同領域の遅延造影が予想される. 低電圧撮影では造影剤 CT 値が上昇することは知られていたが、同時に画像ノイズ上昇の懸念があり、本撮像への応用は困難であった. しかし前述の逐次近似画像再構成法の登場や新しい CT 機器における管電流向上により、画像ノイズの低減が可能となり、この遅延造影撮影への応用が可能となってきた.

Fig. 5 心臓 MRI の遅延造影を基準とした、CT での左室遅延造影の診断精度の比較を示す。16 列 CT を用いた連続 56 例、第 2 世代 320 列 CT を用いた連続 23 症例で比較した。後者では新しい画像再構成法 FIRST を用いており、低管電圧 (80~100kV, 1 群は 120~140kV)、高電流 (800mA 以上、1 群は平均 336mA) であるのが特徴である。特異度、陰性的中率、正診率が後者で有意に高く (A), contrast-noise-ratio も有意に向上した (B)。

われわれは以前、16 列 CT により虚血性心疾患を含めた各種心筋疾患 56 例において、CT による遅延造影診断能を検討したところ、心臓 MRI のそれとくらべ、症例ごとでの感度、特異度、正診率は 90%, 89%, 89% であり、左室区域別 (米国心臓協会提唱の左室 17 区域分類を用いた) では 67%, 92%, 87% という結果で、区域ごとの診断能は今ひとつという結果であった²⁶⁾。現在は CT 機器の管電流上昇や画像再構成法の革新があり、第 2 世代 320 列 CT による 80~100kV の低管電圧、800mA 以上の高電流撮像に加え、前述の最新逐次近似画像再構成法 FIRST を使用して、虚血性心疾患を含む各種心筋疾患疑い 23 例において左室遅延造影撮影を行ったところ、症例ごとの心臓 MRI との比較結果では、感度、特異度、正診率は 93%, 89%, 91% で、左室区域別では 78%, 96%, 92% であり、16 列 CT と比較して特異度、陰性的中率、正診率が有意に改善した (Fig. 5 A)。過去の報告をもとに、左室遅延造影領域と正常左室の CT 値の差を正常左室 CT 値計測時の標準偏差で除すことで定義・算出した画質の定量的データである contrast-noise-ratio も、第 2 世代 320 列 CT で大幅に改善した (Fig. 5 B)²⁷⁾。区域別正診率も 9 割をこえ、MRI が禁忌の場合などでは CT 遅延造影の臨床的有用性が期待される。特に心筋梗塞 (後) のような局所に強い障害が生じる心筋疾患は、他の心筋疾患とくらべ経験的に高画質の遅延造影が期待できる。また、contrast-noise-ratio を計測すると、投与ヨード量と正の相関を認め (Fig. 6 A)、症例の BMI と負の相関を認めた (Fig. 6 B) ことから、高画質を得るためには低 BMI 症例にて十分な造影剤を投与することが重要と考えられた。

急性心筋梗塞症例においては、緊急経皮的冠動脈形成術直後に単純 CT を施行すると、冠動脈形成術の際に使用したヨード造影剤によって梗塞領域の遅延造影効果が期待できる (Fig. 7)。われわれは過去に急性心筋梗塞 20 例において、緊

Fig. 6 第 2 世代 320 列 CT を用いて遅延造影評価を行った心筋疾患疑い連続 23 症例において contrast-noise-ratio を計測すると、体重あたりの投与ヨード量と正の相関を認め (A)、症例の body mass index と負の相関を認めた (B)。

急の経皮的冠動脈形成術後に単純 CT 撮影を施行し、左室遅延造影領域の容積を計測したところ、亜急性期に施行した心筋シンチグラフィによって算出された梗塞領域やピークの血清クレアチンキナーゼ値 (CPK) 値と良好な相関を認めることが分かった ($r=0.606$, 0.820 いずれも $p < 0.05$)。追加の造影剤使用なく左室梗塞範囲の予測が可能であり、CT の低被曝が進んだ現在において、臨床的有用性が確立する可能性がある²⁸⁾。

VI. 三次元 CT 心筋ストレインの開発

収縮時や拡張時における心筋長の変化率は心筋ストレインと定義され、従来心臓超音波や心臓 MRI 画像をもとに解析されてきた。左室区域ごとに評価する局所ストレインと、左室などの全体の平均を評価するグローバルストレインの 2 通りで解析され、早期心機能異常の検出や心臓イベント予測に有用とされてきた²⁹⁾。二次元評価の際の計測方向は通常円周、放射、長軸方向の 3 方向とされ、心臓 MRI による検討では、薬物負荷心筋灌流 MRI の際、同時に左室円周ストレインによる局所壁運動異常を評価したところ、虚血領域は梗塞領域や正常領域にくらべて負荷時と安静時の変化が有意に大きかったとされる³⁰⁾。

近年は CT 画像を用いることで左室の三次元心筋ストレイン評価が可能になった。われわれは肥大型心筋症 8 例で検証したところ、MRI によって検出された左室線維化領域においては、有意に三次元 CT 心筋ストレインが低下することを示した (Fig. 8)³¹⁾。CT でストレイン解析など心機能評価を行う弱点は、1 心拍分の撮像が必要となり被曝の増加が懸念されることだが、320 列 CT に加えて dose modulation 法 (冠動脈評価に有用な特定の心位相以外において照射線量を低減する方法) を使用することで、1 心拍撮像時も 4mSv 未満に低減できたとの報告もある³²⁾。CT による心筋灌流画像は MRI より濃度分解能が劣る可能性があり、同時に安定した心筋ストレイン解析が可能になれば、より正確な心筋虚血領域の診断に寄与すると期待できる。

VII. まとめ

CT による冠動脈疾患評価は狭窄度評価のみならず、FFR-

Fig. 7 急性心筋梗塞にて来院され、ICAGにて左前下行枝に高度狭窄を認めた (A: 矢印)。同部位対して緊急で経皮的冠動脈形成術を施行し、直後に造影剤の追加なしで心臓CTを施行したところ、左室前壁中隔～心尖部にかけて遅延造影を認めた (B: 矢印)。後日施行した心筋シンチグラフィでも、同領域の血流低下が描出された (C: 矢印)。

Fig. 8 肥大型心筋症を有し、冠動脈評価のため心臓CT、左室心筋線維化評価のため心臓MRIを施行した。CTで三次元CT心筋ストレイン解析を行ったところ、MRIにおける心室中隔遅延造影領域 (A: 矢印) に一致して三次元心筋CTストレインの低下を認めた (B: 矢印) (B図右側カラーコードは上側がストレイン高値を示す)。CTストレイン画像 (Fig. 8 B) ザイオソフト株式会社 (東京) よりご提供いただいた。

CTや心筋灌流CTなどによる冠動脈機能評価の面でもさらなる臨床応用が進むと思われる。画像再構成法の進歩による検査時の被曝低減や撮像時間短縮による造影剤減量も進み、今後心臓CTはさらに低侵襲で身近な検査になることが予想される。近い将来、症例に合わせた多彩なオーダーメイドの撮像プロトコルが要求されるようになる可能性があり、その際担当医は心臓CTについて、より一層の理解が必要になるであろう。

本論文に関して、開示すべき利益相反関係はない。

文 献

- 1) Rumberger JA, Simons DB, Fitzpatrick LA, et al: Coronary artery calcium area by electron-beam computed tomography and coronary atherosclerotic plaque area. A histopathologic correlative study. *Circulation* 1995; **92**: 2157-2162
- 2) Detrano R, Guerci AD, Carr JJ, et al: Coronary calcium as a predictor of coronary events in four racial or ethnic groups. *N Engl J Med* 2008; **358**: 1336-1345
- 3) Taylor AJ, Cerqueira M, Hodgson JM, et al; American College of Cardiology Foundation Appropriate Use Criteria Task Force; Society of Cardiovascular Computed Tomography; American College of Radiology; American Heart Association; American Society of Echocardiography; American Society of Nuclear Cardiology; North American Society for Cardiovascular Imaging; Society for Cardiovascular Angiography and Interventions; Society for Cardiovascular Magnetic Resonance: ACCF/SCCTCR/AHA/ASE/ASNC/NASCI/SCAI/SCMR 2010 appropriate use criteria for cardiac computed tomography. A report of the American College of Cardiology Foundation Appropriate Use Criteria Task Force, the Society of Cardiovascular Computed Tomography, the American College of Radiology, the American Heart Association, the American Society of Echocardiography, the American Society of Nuclear Cardiology, the North American Society for Cardiovascular Imaging, the Society for Cardiovascular Angiography and Interventions, and the Society for Cardiovascular Magnetic Resonance. *J Am Coll Cardiol* 2010; **56**: 1864-1894
- 4) 循環器病の診断と治療に関するガイドライン (2007-2008 年度合同研究班報告): 冠動脈病変の非侵襲的診断法に関するガイドライン. *Circ J* 2009; **73 Suppl III**: 1019-1089

- 5) Hamon M, Morello R, Riddell JW, et al: Coronary arteries: diagnostic performance of 16- versus 64-section spiral CT compared with invasive coronary angiography – meta-analysis. *Radiology* 2007; **245**: 720–731
- 6) Budoff MJ, Dowe D, Jollis JG, 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* 2008; **52**: 1724–1732
- 7) Miller JM, Rochitte CE, Dewey M, et al: Diagnostic performance of coronary angiography by 64-row CT. *N Engl J Med* 2008; **359**: 2324–2336
- 8) Douglas PS, Hoffmann U, Patel MR, et al; PROMISE Investigators: Outcomes of anatomical versus functional testing for coronary artery disease. *N Engl J Med* 2015; **372**: 1291–1300
- 9) Nakamura K, Funabashi N, Uehara M, et al: Impairment factors for evaluating the patency of drug-eluting stents and bare metal stents in coronary arteries by 64-slice computed tomography versus conventional coronary angiography. *Int J Cardiol* 2008; **130**: 349–356
- 10) Litt HI, Gatsonis C, Snyder B, et al: CT angiography for safe discharge of patients with possible acute coronary syndromes. *N Engl J Med* 2012; **366**: 1393–1403
- 11) Hoffmann U, Truong QA, Schoenfeld DA, et al; ROMICAT-II Investigators: Coronary CT angiography versus standard evaluation in acute chest pain. *N Engl J Med* 2012; **367**: 299–308
- 12) De Bruyne B, Fearon WF, Pijls NH, et al; FAME 2 Trial Investigators: Fractional flow reserve-guided PCI for stable coronary artery disease. *N Engl J Med* 2014; **371**: 1208–1217
- 13) Koo BK, Erglis A, Doh JH, 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* 2011; **58**: 1989–1997
- 14) Douglas PS, Pontone G, Hlatky MA, et al; PLATFORM Investigators: Clinical outcomes of fractional flow reserve by computed tomographic angiography-guided diagnostic strategies vs. usual care in patients with suspected coronary artery disease: the prospective longitudinal trial of FFR (CT): outcome and resource impacts study. *Eur Heart J* 2015; **36**: 3359–3367
- 15) Rochitte CE, George RT, Chen MY, et al: Computed tomography angiography and perfusion to assess coronary artery stenosis causing perfusion defects by single photon emission computed tomography: the CORE320 study. *Eur Heart J* 2014; **35**: 1120–1130
- 16) Kikuchi Y, Oyama-Manabe N, Naya M, et al: Quantification of myocardial blood flow using dynamic 320-row multi-detector CT as compared with ¹⁵O-H₂O PET. *Eur Radiol* 2014; **24**: 1547–1556
- 17) Shaw LJ, Raggi P, Schisterman E, et al: Prognostic value of cardiac risk factors and coronary artery calcium screening for all-cause mortality. *Radiology* 2003; **228**: 826–833
- 18) Cho I, Chang HJ, Ó Hartaigh B, et al: Incremental prognostic utility of coronary CT angiography for asymptomatic patients based upon extent and severity of coronary artery calcium: results from the Coronary CT Angiography Evaluation For Clinical Outcomes International Multicenter (CONFIRM) study. *Eur Heart J* 2015; **36**: 501–508
- 19) Muhlestein JB, Lappé DL, Lima JA, et al: Effect of screening for coronary artery disease using CT angiography on mortality and cardiac events in high-risk patients with diabetes: the FACTOR-64 randomized clinical trial. *JAMA* 2014; **312**: 2234–2243
- 20) Min JK, Dunning A, Lin FY, et al: Age- and sex-related differences in all-cause mortality risk based on coronary computed tomography angiography findings results from the International Multicenter CONFIRM (Coronary CT Angiography Evaluation for Clinical Outcomes: An International Multicenter Registry) of 23,854 patients without known coronary artery disease. *J Am Coll Cardiol* 2011; **58**: 849–860
- 21) Hadamitzky M, Täubert S, Deseive S, et al: Prognostic value of coronary computed tomography angiography during 5 years of follow-up in patients with suspected coronary artery disease. *Eur Heart J* 2013; **34**: 3277–3285
- 22) Pflederer T, Marwan M, Schepis T, et al: Characterization of culprit lesions in acute coronary syndromes using coronary dual-source CT angiography. *Atherosclerosis* 2010; **211**: 437–444
- 23) Motoyama S, Ito H, Sarai M, et al: Plaque characterization by coronary computed tomography angiography and the likelihood of acute coronary events in mid-term follow-up. *J Am Coll Cardiol* 2015; **66**: 337–346
- 24) Nadjiri J, Hausleiter J, Jähnichen C, et al: Incremental prognostic value of quantitative plaque assessment in coronary CT angiography during 5 years of follow up. *J Cardiovasc Comput Tomogr* 2016; **10**: 97–104
- 25) Masuda Y, Yoshida H, Morooka N, et al: The usefulness of x-ray computed tomography for the diagnosis of myocardial infarction. *Circulation* 1984; **70**: 217–225
- 26) Takaoka H, Funabashi N, Uehara M, et al: Diagnostic accuracy of CT for the detection of left ventricular myocardial fibrosis in various myocardial diseases. *Int J Cardiol* 2016; **228**: 375–379
- 27) Matsuda T, Kido T, Itoh T, et al: Diagnostic accuracy of late iodine enhancement on cardiac computed tomography with a denoise filter for the evaluation of myocardial infarction. *Int J Cardiovasc Imaging* 2015; **31 Suppl 2**: 177–185
- 28) Takaoka H, Funabashi N, Ishibashi I, et al: Utility of non-contrast CT just after percutaneous coronary intervention in *de novo* acute myocardial infarction for prediction of infarct-size in comparison with conventional left ventriculogram. *Int J Cardiol* 2014; **173**: 525–527
- 29) Motoki H, Borowski AG, Shrestha K, et al: Incremental prognostic value of assessing left ventricular myocardial mechanics in patients with chronic systolic heart failure. *J Am Coll Cardiol* 2012; **60**: 2074–2081
- 30) Nakamura M, Kido T, Kido T, et al: Quantitative circumferential strain analysis using adenosine triphosphate-stress/rest 3-T tagged magnetic resonance to evaluate regional contractile dysfunction in ischemic heart disease. *Eur J Radiol* 2015; **84**: 1493–1501
- 31) 高岡浩之, 船橋伸禎, 小澤公哉, 他: 4DCTを用いた心筋疾患における3D心筋ストレーン解析の有用性. *循環器専門医* 2016; **2**: 223–229
- 32) Chen CM, Liu YC, Chen CC, et al: Radiation dose exposure of patients undergoing 320-row cardiac CT for assessing coronary angiography and global left ventricular function. *Int J Cardiovasc Imaging* 2012; **28 Suppl 1**: 1–5