

特集 画像診断 —現状と展望—

Interventional Radiology における CT および C-arm CBCT の役割

昭和大学藤が丘病院放射線科

橋本 東児 林 高 樹 堀 祐 郎
竹山 信之 濱田 健司 岡部 尚行
木根淵裕子

昭和大学医学部放射線医学講座（放射線科学部門）

宗近 次朗 池田 真也 笹森 寛人

はじめに

Interventional radiology（以下 IVR）は、画像情報を元に治療を計画し、穿刺技術やカテーテル造影検査の技術を応用して治療を行うものである。その種類は多岐にわたるが、いずれの手技も IVR である限り画像と切り離すことはできない。透視画像や造影像などの投影画像は手技の際に利用する基本的な画像であるが、従来からの進歩や変化は少ない。一方、CT や MRI などの断層画像は 10 年前に比べ明らかに進歩している。放射線科が関わる IVR において、利用頻度の高い断層データは造影 CT である。この稿では CT 画像情報の IVR に果たす役割と利用方法を紹介する。また、近年、血管造影装置の管球を支えている C 型アーム（C-arm）に、平面検出器が搭載されたことでコーンビームによる CT 様の画像（C-arm CBCT）が得られるようになった。その現状と展望についても述べる。

IVR における CT 画像データの利用法

多列高速回転 CT（以下 MDCT）で造影剤を急速注入して撮影すれば、血管に関する多くの情報が得られる。ワークステーションで処理し、血管全体を俯瞰できる地図的情報や血管形態の概観を得ることができる。血管系 IVR の遂行に有益なデータを提供している。

手技中の血管撮影の画像では、カテーテル先端から末梢側の血管情報しか得られない。関心領域以外からの血管の関与を証明するには、様々な血管を造

影して確認しなければならない。その検索は煩雑で、時にはリスクにもなる。従って、術前に血管の全体像が描出されているメリットは極めて大きい。高い CT 値の表面を強調したボリュームレンダリング像は、ワークステーションにより光の透過性・反射・影を加えて、立体的に表示している。血管の概観を見るのに適している（図 1）。

手技中の CT 撮影が可能ならば貴重なデータとなる。カテーテルから造影しながら CT を撮影する動脈造影下 CT では、カテーテル位置と病変との関係や、病変の血流状態の確認ができる。また、非血管系 IVR においても、CT 画像により確認しつつ手技を行うことで、体の深部に対しても安全に精度の高い穿刺を可能とする（図 2）。しかし、CT 室では一般的な透視を利用できないデメリットがある。現在では、CT 室に移動しなくても、血管造影室で CT 画像もしくは CT 様画像が得られる。次の項では、実際の利用方法について、術前に取得した情報と術中に情報を取得した場合に分けて説明する。

術前 CT 画像の質と利用の実際

1. 動脈系（血管計測・概観観察）

IVR に役立つ血管情報を得るには、短時間で十分な範囲を 1.25 mm 程度の薄いスライス厚で撮影したい。このためには最低でも 16 列以上の MDCT が必要である。10 年前の 4 列 MDCT で撮影されたグラフト吻合部瘤の画像を示す（図 3）。4 列 MDCT でも短い範囲ならば 1.25 mm によるデータ取得が可能である。64 列 MDCT のデータであれば、



図 1 気管支動脈蔓状血管腫
内胸動脈の枝、大動脈から分岐する気管支動脈、および腹腔動脈根部から分岐する下横隔動脈が病変に関与し、太く発達している。塞栓する場合のガイドとして役立つ。

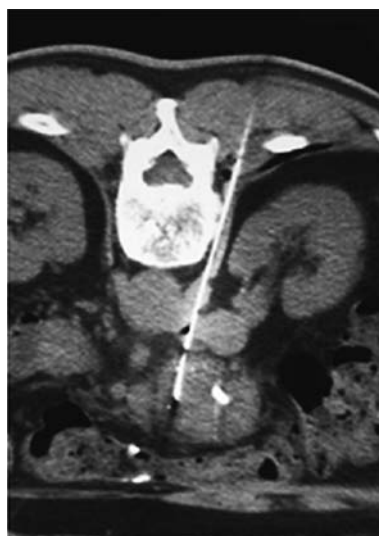


図 2 自己免疫性膵炎 (60 代、男性)
膵頭部腫瘍合併を否定のため CT 下生検となる。大動脈と下大静脈の間を抜けるルートは CT で確認しながら行えば多くの症例で安全に遂行できる手技である。膵頭部からの病理結果で悪性細胞はなく、自己免疫性膵炎に合致する変化のみであった。

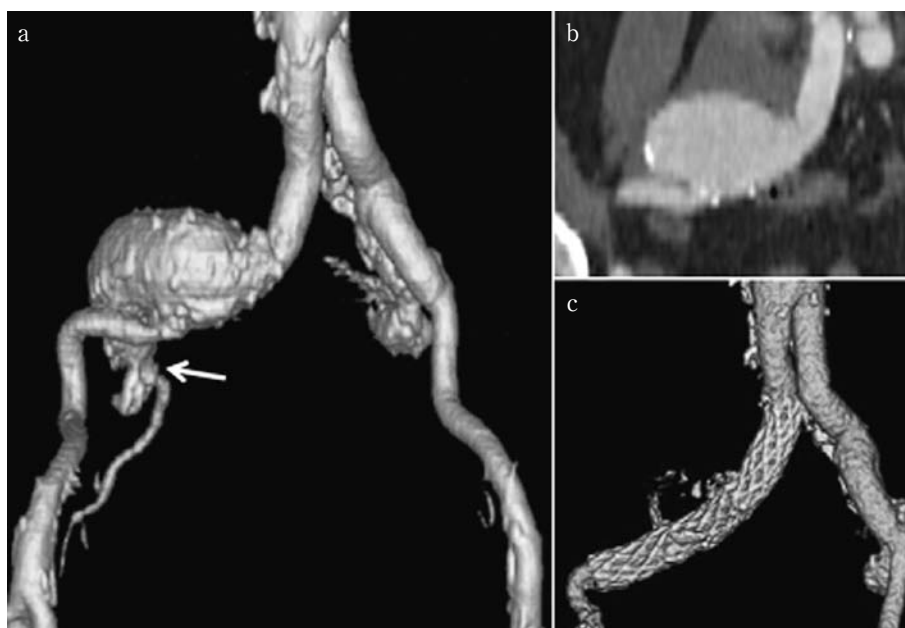


図 3 Y グラフト術後吻合部瘤 (73 歳女性)

- a: 骨盤部の術前造影 CT (Volume Rendering 像)
右内腸骨動脈に動脈瘤が及んでいる (→)。内腸骨動脈の分枝の 3 次元的な情報はコイル塞栓術の計画に役立つ。
- b: グラフト右脚と瘤、外腸骨動脈の面に一致する MPR 像
MPR 像は血管径と長さの正確な計測が可能で、ステントのサイズ決定に役立つ。
- c: ステント留置後の造影 CT (Volume Rendering 像)
瘤の描出はなく、外腸骨動脈にステントグラフトを設置した状況がわかりやすい。

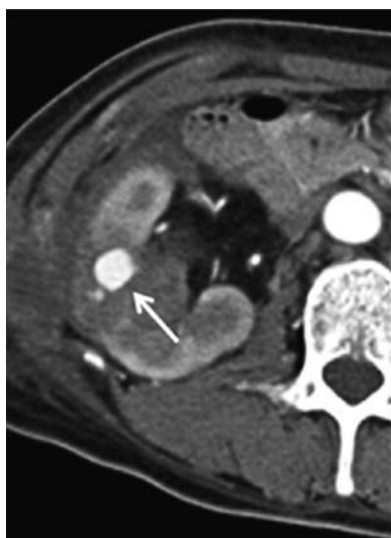


図 4 右腎損傷 (70 代, 女性, 交通外傷)
術前の dynamic CT (動脈相) で仮性動脈
瘤を認める (→)。

短時間で広い範囲の撮影ができるので、頭尾方向に長く位置する大動脈でも高い精度で計測できる。ステントグラフト治療において、用意するステントグラフトのサイズや設置位置など、シミュレーションの精度が高くなり、術中に悩むことは少なくなった。

2. 動脈系 (責任血管同定・血管追跡)

塞栓術が必要な動脈性出血病変では、出血の有無の診断として術前の単純 CT と造影剤を急速注入して撮影した造影 CT の価値が高い。出血点の同定は、血管外漏出像と仮性動脈瘤 (図 4) が主である。太めの血管では動脈解離も診断可能な場合がある。血管外漏出像や仮性動脈瘤は、比較的細かい血管の破綻でも描出されるので、出血部近傍の血管領域をある程度類推することが可能である。

実際の経カテーテル的塞栓術では、挿入すべき責任血管をより細かく特定しなければならず、複数回の DSA 撮影が必要になる。その際の DSA 画像は 2D 画像のため血管が重なり、仮性瘤が描出し難い場合もある (図 5a, b)。かつては出血点とそれに至る血管を同定するために、多数の斜位撮影を繰り返すことが多かった。現在では造影しながら回転撮影を行い、C-arm CBCT データを得ることで、三次元情報を持つ血管のボリュームデータを取得できる。一旦撮影してしまえば、様々な角度から観察することができる (図 5c, d)。

3. 静脈系

カテーテルによる静脈造影では血流に抗して逆行的に造影することとなり、目的部位の血管の全体像が得られにくい。合流の破格も多く、細かい静脈を選択する際に合流部を見つけるのが難しい。64 列 MDCT ならば、副腎静脈のような細かい血管でも下大静脈への合流位置が描出でき、サンプリング手技の際に役立っている (図 6)。

胃静脈瘤を治療するバルーン閉塞下逆行性経静脈的塞栓術 (以下 BRTO) でも術前 CT は欠かせない。胃静脈瘤の排血路となっている下横隔静脈にバルーンを挿入して治療するため、排血路が左腎静脈に注いでいることを CT で確認する (図 7)。また、静脈瘤と門脈系血管や後腹膜・心臓周囲などの体循環系静脈との関わり方が示されている必要もあり、静脈系がよく描出される造影タイミングの画像が必要である。

IVR 室における装置

IVR 手技中の CT 撮影は肝癌に対する診断目的から始まった。CTAP (CT during arterial portography) や CTHA (肝動脈造影下 CT) がその主なもので、上腸間膜動脈や肝動脈に挿入されたカテーテルから造影剤を注入しながら CT を撮影する。前者は肝内の門脈血流を、後者は動脈血流を評価できる (図 8a, b)。当初はカテーテルを血管内に挿入したまま CT 室に移動して撮影していた。

門脈血流を受けない肝癌などの腫瘍部は CTAP で造影欠損を示す。CTHA による動脈血流の評価では、病変部の染まりを断面像でとらえることができるので、正確に診断できる。CTHA ではカテーテル先端から下流の造影剤の灌流領域が断層画像で得られ、カテーテルの位置や治療領域の確認、塞栓による虚血領域の推定が可能である。また、リピオドールという油性造影剤を利用した化学塞栓術後の治療結果確認にも利用されている (図 8d)。

これらを可能にする装置として、患者移動なしに、透視も CT 画像も取得できる後述の機器は、IVR 手技を行う医師ならば、誰もが求めるシステムの一つである。なお、ほぼリアルタイムに断層面が描出される CT 透視は有益だが、使用対象は限定され、使用経験もないため割愛する。



図 5 左腎損傷 (40 代, 男性, 転倒にて左背部打撲)

- a : 左腎動脈造影 DSA 正面像
仮性動脈瘤 (→) は血管が重なりわかりにくい.
- b : C-arm CBCT の MIP 正面像
DSA と同様に正面像では所見が隠れている.
- c, d : C-arm CBCT の MIP, RAO (図 c), LAO (図 d)
回転して様々な角度から観察することで, 仮性動脈瘤 (矢頭) と関連する血管との関係をわかりやすく見ることができる (→).
- e : 塞栓術後 (図 5b と同じ角度の DSA)
親血管から瘤にかけて, マイクロコイルを挿入して塞栓を行った.

1. IVR-CT 装置

1992 年に臨床に導入された IVR-CT 装置は, IVR を行う一般的な血管造影装置である DSA 装置と同じ室内に CT を設置し, 患者テーブルを共通化して, DSA も CT も撮影できる装置である. 併設さ

れている CT 装置はコストの都合上, 列数の少ない MDCT の施設が多い. したがって, 得られた画像の利用は 3 次元的なボリュームデータとしてではなく, 平面的なスライス毎の利用にとどまることが多い.

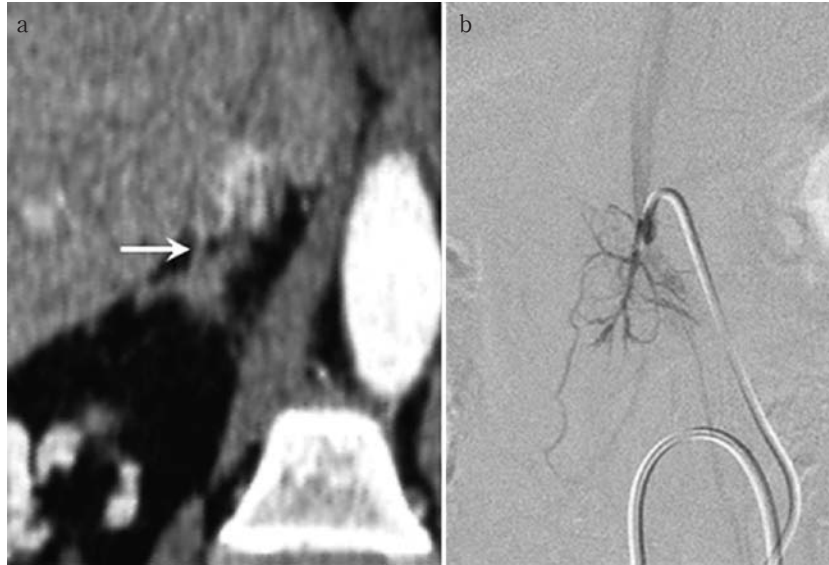


図 6 副腎静脈サンプリング症例
a：造影 CT 冠状断 MPR 像 b：右副腎静脈撮影
右副腎静脈の下大静脈への合流位置や分岐方向が術前画像で示されている
メリットは高い。

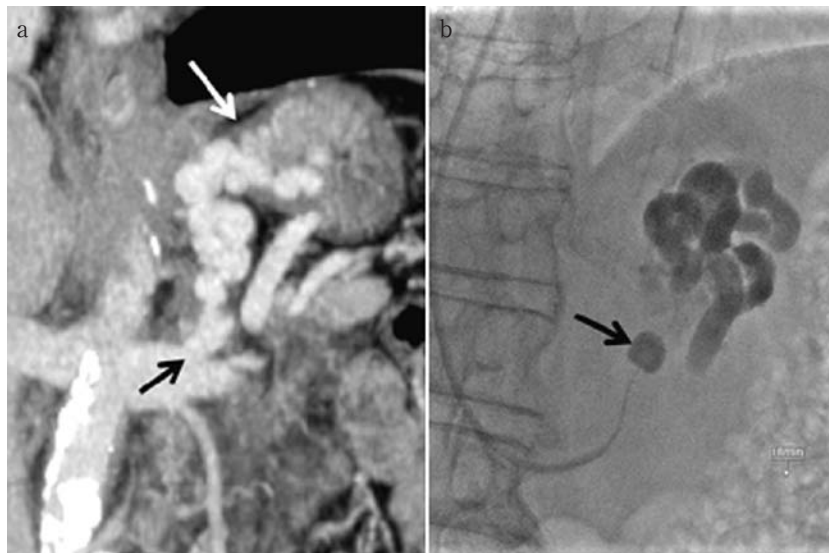


図 7 胃静脈瘤出血，緊急 BRTO 症例
a：術前の造影 CT 冠状断 MPR 像
b：術中の硬化剤注入時の撮影
胃静脈瘤（白矢印）から，排水路である左腎静脈に注ぐ左下横隔静脈（黒矢印）が描出されている（図 7a）．バルーンカテーテルで閉塞し（黒矢印），
静脈瘤内に硬化剤を停滞させる（図 7b）．

2. 平面検出器搭載の血管造影装置による C-arm
CBCT
血管造影装置の C-arm に搭載された平面検出器

を 200 度ほど回転して得られる CT 様のデータセッ
ト（C-arm CBCT）が 2004 年末から臨床で使用さ
れている．平面検出器に到達した円錐状エックス

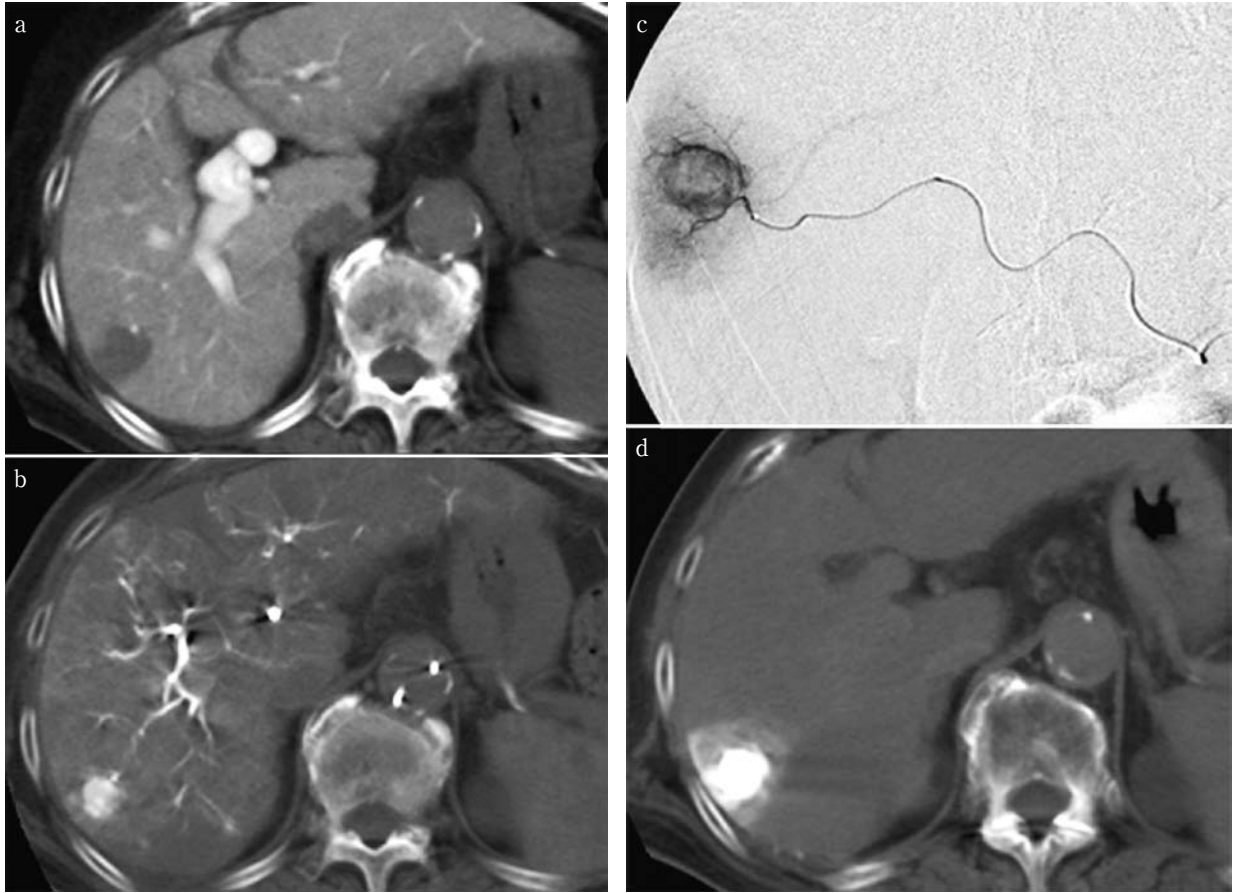


図 8 肝右葉の肝癌

上段 a：CTAP，下段 b：CTHA

CTAP で病変は欠損を示し，CTHA で病変は濃染している．

上段 c：手技中の超選択的造影，下段 d：塞栓治療後の CT

c：腫瘍直前までマイクロカテーテルを選択し，造影して確認した．

d：注入したリピオドールの高濃度が腫瘍とその周囲に取り込まれているのがわかる．

線（cone beam）のデータをコーンビーム再構成法で画像化し，CT と同一の HU スケールへ変換し，CT 様画像が得られる．画像の質に不十分な点もあるが，ワークステーション上で様々な画像表示が可能で，データの位置情報が透視装置の C-アームと相互に連動している．したがって，ワークステーション上で表示したもっとも見やすい角度をそのまま透視装置に反映できる．また，透視画像上にワークステーション上の画像を重ねることもでき，穿刺経路を透視画面上で確認しながら針を進めることも可能である¹⁾．

IVR 室で軟部組織濃度を持つ CT 様画像が得られるメリットは極めて大きい．脳神経領域の IVR では，出血や水頭症などの合併症を直ちにチェックで

きる利点が報告されている²⁾．3 次元的なボリュームデータとしてワークステーションと連動できるので，CT 下の生検やドレナージ，ラジオ波焼灼療法など，非血管の IVR にもこれまでとは異なった応用が可能である．画像データの有効利用という点で，統合された大型 IVR 支援システムの一つの形がようやく見えてきたと思われる．今までのフラストレーションの一部が解消され，感慨深いものがある．次の項で，手技中の 3 次元的なデータ操作を簡単に紹介する．

ワークステーションによるボリュームデータ操作

肝癌の塞栓術を例にとると，①血管を薄い断面（MPR：multi planar reconstruction）で観察し，



図 9 骨盤内嚢胞性腫瘍の生検
播種を避けるため、充実部のみを生検したが、骨に囲まれ適切なルートを確認するのは容易ではない。

a：造影 CT 軸位断像

嚢胞性腫瘍の背側に結節部分がある。

b：造影 CT 側面 MPR 像

尾骨側からの穿刺も難しいことがわかる。

c：生検中の C-arm CBCT 側面斜位 MPR 像
尾側の右外側から穿刺を行い、嚢胞を避けて結節部を穿刺した。図 9a, b の通常の CT 画像に比べ、軟部濃度の濃度分解能は悪い。

腫瘍に入り込んでいる栄養血管を同定する。次に、②厚みのある断面内にある血管のすべてが投影される表示 (MIP: Maximum intensity Projection) を回転させながら 3 次元的な血管構造を観察する。時に①と②の操作を繰り返しながら、栄養血管の同定とそれに至る道筋を判定する。

上記で観察した角度を C-arm 透視装置に反映させれば、目的血管を選択しやすい角度でワンタッチに透視でき、簡便である (図 5)。また、ワークステーション上で計画した穿刺ラインを透視画像に重ね合わせることで、透視手技や CT 下生検の際のガイドとなる。これまでの CT ガイド下生検では難しかった三次元的な穿刺ガイドラインの計画が可能となっている (図 9)^{1,3)}。

C-arm CBCT 画像の特徴

1. 空間分解能とボクセル形状

平面検出器上のピクセルサイズは 154 μm で、画像上でも再構成の方法によっては同等の空間分解能の細かさが得られ、CT に比べ精細である。コーンビーム再構成法で画像化するため、ボリュームデータ内の各ボクセルの形状は完全な立方体である。したがって、CTA で得られたボリュームデータを三次元的な血管樹として表示した場合、どの方向から見ても画像の劣化がなく、管腔構造の連続性が良好で、細かいレベルまで追跡可能な描出が得られる (図 5b, c, d)。血管系 IVR のナビゲーション画像に合った特性を備えていると言える。一方で、強い

アーチファクトと軟部濃度分解能の限界に欠点があり、CT ガイド下の手技ではストレスを感じることがある。

2. 濃度分解能

多方向からの撮影枚数（プロジェクション数）が多くなればバックグラウンドのアーチファクトが低下することにより、濃度分解能は向上する。C-arm CBCT では 100-200 HU 程度の高濃度対象物を見る場合、プロジェクション数が 40-150 程度でアーチファクトは許容できるとされている⁴⁾。軟部濃度の対象物に対してはプロジェクション数を増やす必要がある。実際には、200 度の回転で約 500 程度のプロジェクション数が得られ、10 HU の軟部濃度分解能を持つ。コーンビームを 360 度回転して利用している報告では、メタルやビームハードニングによるアーチファクトに強いとされ⁵⁾、早くから歯科領域や側頭骨などを対象とした領域で臨床応用が進んでいる。

CT ガイド下の手技では肺生検以外は、軟部濃度同士の区別が必要な場合が多い。軟部組織の微妙なコントラストを必要とする場合には 10 秒回転や 20 秒など、時間をかけた撮影を行うことで、プロジェクション数を増やしてデータを取得する。それでも得られる画像は CT と比べると充分とはいえない（図 9c）。CT 下で行う IVR 手技は極めて細かいレベルにある。そのすべてを C-arm CBCT ガイド下に行えるか、疑問が残る領域もある。

現状と展望

IVR において、CT 画像や C-arm CBCT の果たす役割は大きく、64 列以上の MDCT でえられる術前情報は、現状の IVR の多くの場合で不満のない

データを提供している。手技中の C-arm CBCT で得られる CT 様画像データは、透視装置というハードとワークステーション上で操作できる画像データの統合により、様々な手技を可能にし、新たな手技の可能性を与えてくれる。ワークステーションにおけるアプリケーションは、今後も順調な発展を続けると考えられる。

一方で、C-arm CBCT の最大の欠点である不十分な軟部組織分解能に関しては、臨床で使われ始めてから 8 年近く経過した現在も大きな進歩は得られていない。平面検出器自体の進歩を待たなくてはならないとすれば、CT ガイド下 IVR の一部は、画質のよい通常の CT から移行することはできない可能性がある。画質のさらなる進歩を願ってやまない。

文 献

- 1) 橋本東児, 本田 実, 清野哲孝, 他. インターベンショナルラジオロジーにおける C-armCT の有用性. 日独医報. 2006;51:271-282.
- 2) Heran NS, Song JK, Namba K, *et al.* The utility of DynaCT in neuroendovascular procedures. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2006;27:330-332.
- 3) 橋本東児, 清野哲孝, 本田 実, 他. IVR におけるフラットパネル搭載 C-armCT DynaCT で可能となる新たな展開. 断層映像研会誌. 2006;33:126-133.
- 4) Wiesent K, Barth K, Navab N, *et al.* Enhanced 3-D-reconstruction algorithm for C-arm systems suitable for interventional procedures. *IEEE Trans Med Imaging.* 2000;19:391-403.
- 5) Gupta R, Bartling SH, Basu SK, *et al.* Experimental flat-panel high-spatial-resolution volume CT of the temporal bone. *AJNR Am J Neuroradiol.* 2004;25:1417-1424.