

超高速電圧切り替え方式デュアルエネルギー CTを用いた 脳血管内治療後の画像評価

鳥取大学医学部 病態解析医学講座 画像診断治療学分野 (主任教授: 小川敏英)

¹⁾ 鳥取大学医学部 病態解析医学講座 画像診断治療学分野

²⁾ 鳥取大学医学部 脳神経医科学講座 脳神経外科学分野

篠原祐樹¹⁾, 久家圭太¹⁾, 加藤亜結美¹⁾, 坂本 誠²⁾, 小川敏英¹⁾

Imaging evaluation after neuroendovascular therapy using fast kV switching dual energy CT

Yuki SHINOHARA¹⁾, Keita KUYA¹⁾, Ayumi KATO¹⁾,
Makoto SAKAMOTO²⁾, Toshihide OGAWA¹⁾

¹⁾ *Division of Radiology, Department of Pathophysiological and Therapeutic Science,
Faculty of Medicine, Tottori University*

²⁾ *Division of Neurosurgery, Department of Brain and Neurosciences, Faculty of Medicine,
Tottori University*

ABSTRACT

The efficacy and safety of neuroendovascular therapy is globally recognized due to the positive results of recent randomised control trials on mechanical thrombectomy for acute embolic stroke, on carotid arterial stenting for carotid artery stenosis, on coil embolization for intracranial aneurysm, and on embolization for arteriovenous malformation or dural arteriovenous fistula. In parallel, neuroradiologists frequently encounter difficulties in the interpretation of post-interventional non-contrast enhanced CT images, as they often have high attenuated areas derived from residual iodinated contrast media and metal artifacts caused by metallic devices such as platinum-coils, surgical clips, metallic stents, and liquid embolic agents such as Onyx[®]. Meanwhile, fast kV switching dual energy CT (gemstone spectral imaging: GSI) is one of the advanced imaging techniques that can overcome these obstacles. For instance, material decomposition using virtual monochromatic imaging (VMI) can generate an iodine map and water (virtual non-contrast) map, which enables residual iodinated contrast media and acute hemorrhage to be distinguished. Furthermore, the use of VMI with metal artifact reduction software, MARS, can suppress severe metal artifacts, resulting in improved image quality of surrounding vessels. In this review article, we demonstrate the utility of GSI after neuroendovascular therapy using representative clinical cases.

(Accepted on February 21, 2018)

Key words : iodinated contrast media, metal artifact, fast kV switching dual energy CT, virtual monochromatic imaging, metal artifact reduction software

1. はじめに

近年の医療用器具の発達やランダム化比較試験の結果により、急性期脳塞栓症に対する血栓回収術¹⁻⁵⁾、頸動脈狭窄症に対する金属ステント留置術^{6,8)}、脳動脈瘤に対する瘤内コイル塞栓術あるいはステント支援下瘤内コイル塞栓術^{9,10)}、脳動脈瘤奇形に対する液体塞栓物質 (OnyxTM) を用いた塞栓術¹¹⁾ など、中枢神経領域における経皮経管的血管内治療が急速に普及している。それに伴って、術後評価における画像診断の重要性も増しており、画質の良さ、侵襲性の低さ、簡便さなどから、術後のCTあるいはCT血管造影 (CT angiography; CTA) が一般的に行われている。

一方、先に述べた治療法で用いられる医療用器具は、その多くが金属製のものであり、CTにて強い金属アーチファクトを生じることで画質劣化に繋がる。特に術後の残存病変や合併症の有無を評価するためには、低侵襲なだけではなく、金属アーチファクトを抑えた高画質な画像を得る必要がある¹²⁻¹⁶⁾。

また、脳血管内治療の直後には、頭蓋内出血等の合併症の有無を確認する目的で頭部単純CTを撮影することが多い。出血の存在の有無は、抗凝固・抗血小板療法など術後の内科的管理を考える上で重要な意味を持つが、術中に使用したヨード造影剤の漏出や蓄積による高吸収域と出血による高吸収域との鑑別が困難なことがある^{14,17,18)}。

最近ではCT装置の技術開発も進み、多列高速撮像、被曝低減に向けた画像再構成技術、およびデュアルエネルギー撮影などが臨床の現場に広く普及してきている^{12,17)}。本稿では、超高速電圧切り替え方式デュアルエネルギー CT (dual-energy CT: DECT) を用いた脳血管内治療後の画像評価について、文献的考察を含めて概説する。

2. Gemstone spectral imagingとは

CT値とは物質のX線吸収の程度を表す定量値で、X線を照射したボクセルにおける物質の線減弱係数、即ち質量減弱係数と密度の積によって規定され、単位はHU (Hounsfield Unit) で表され

る。物質の線減弱係数は物質固有のものであるが、X線が物質を通過する時の減弱の程度は、X線の実効エネルギー、即ち管電圧に依存する、という特徴がある。従って、2つの異なる管電圧がもたらす物質のCT値の変化率も、物質固有のパターンを示す。この特性を最大限に応用し、CTの画像化に取り入れた手法がDECTと言える (図1)^{12,15)}。

当院で稼働中のDECT (Discovery CT750 HD, GE Healthcare) には、高い光学特性を持つ人工ガーネット (gemstoneTM) が検出器として搭載されており、1回転中に80/140 kVpの2種類の管電圧を超高速に切り替える撮像法を実現可能とした。これにより、時間的および空間的にはほぼ一致した管電圧毎のプロジェクションデータを取得して、精度の高い画像が得られるようになり、このDECTの撮影技術は別名、gemstone spectral imaging (GSI) とも呼ばれる^{12,15)}。

現在臨床的に使用されているDECTの手法にはいくつかあり、この超高速電圧切り替え方式の他、1管球タイプの機種では、2層検出器方式やスプリットフィルター方式があり、2管球タイプのdual source CTもある¹⁹⁾。

3. 脳血管内治療直後のくも膜下腔高吸収域

前述の通り、脳血管内治療の直後には、出血等の合併症の有無を確認するために頭部単純CTを撮影することが多い。その際、特にトラブルなく手技が施行され、手技後に特に神経学的異常は認めないのにも関わらず、くも膜下腔や脳皮質に高吸収域を呈することがある。これは術中に使用したヨード造影剤のくも膜下腔あるいは皮質への漏出や蓄積を反映した一過性の所見であり、殆どの場合無症状で、特別な治療を要さないが、時として、くも膜下出血など頭蓋内出血との鑑別が困難な場合がある。これらを明確に区別することは、抗凝固・抗血小板療法など術後の内科的管理を考慮する上で重要な意味を持つ^{17,18)}。

GSIでは、質量減弱係数が物質およびX線実効エネルギーにより異なるという特性を利用し、2つの異なるエネルギーのX線を用いることで混合している物質密度を算出、物質の弁別を行うことが

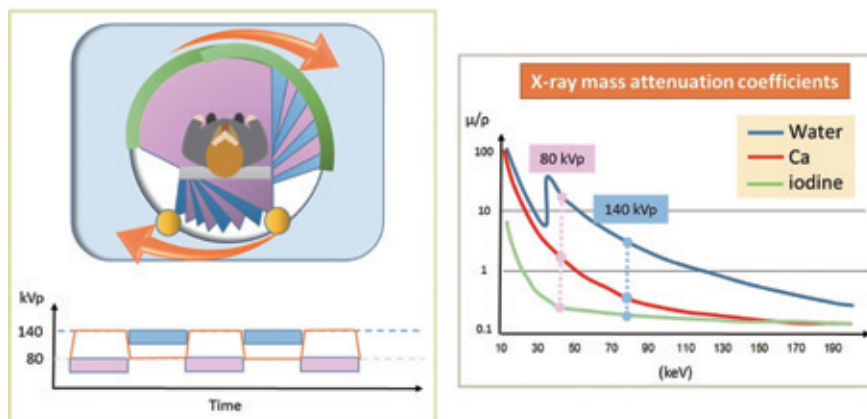


図1 超高速電圧切り替え方式dual-energy CT (DECT) の原理

超高速電圧切り替え方式DECTとは、ガントリー1回転中に高速で2つの管電圧を切り替えながらプロジェクションデータを取得する撮像法である。X線が物質を通過する時の減弱の程度は物質によって異なり、また、管電圧に依存する。従って、2つの異なる管電圧がもたらす物質のCT値の変化率も、物質固有のパターンを示す。この特性を最大限に利用することで、DECTによる物質弁別や画質向上が可能となる。

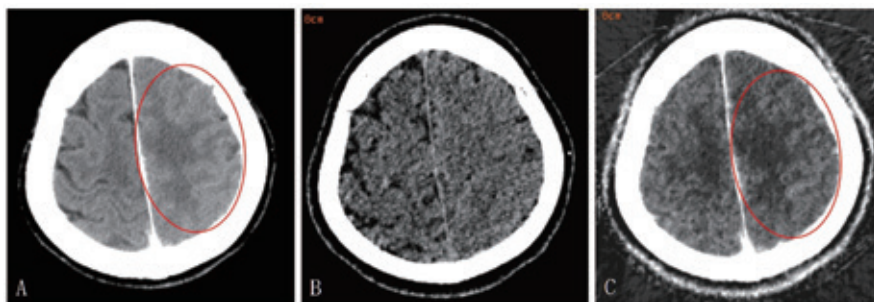


図2 脳血管内治療直後のくも膜下腔高吸収域

40歳台、男性。左後頭部の動静脈奇形および硬膜動静脈瘻に対する塞栓術直後に、合併症の有無の評価のため、GSIによる単純CTが施行された。65 keV相当の仮想単色X線等価画像 (A) にて、高位の左前頭頭頂葉脳溝がやや高吸収を示している (丸囲い)。この高吸収域は、水 [ヨード] 密度画像 (B) では認められず、ヨード [水] 密度画像 (C) ではより明瞭に描出されている (丸囲い) ため、術中使用のヨード造影剤漏出・蓄積による高吸収域であると判断できる。

できる。そのため、脳血管内治療直後の頭部単純CTをGSIで行うことにより、水 [ヨード] 密度画像およびヨード [水] 密度画像を作成し、水 [ヨード] 密度画像にて頭蓋内出血による高吸収域の有無を、ヨード [水] 密度画像にて術中使用の造影剤による高吸収域の有無を、それぞれ確認することができる ([] 内は基底となる物質を示す) (図2)^{14,17)}。

4. 血栓回収術直後の脳内高吸収域

急性期脳梗塞患者に対する血栓回収術の有効性

が報告されたことにより¹⁵⁾、血栓回収術後の頭部単純CTを読影する機会も増えてきた。そして急性期脳主幹動脈閉塞に対する脳血管内治療直後の画像評価にも、GSI含むDECTが有用とする報告がある。血栓回収術直後の頭部CTでは、血液脳関門の破綻による術中に使用したヨード造影剤の漏出を反映して、脳梗塞塞に一致した高吸収を呈することがある (post-interventional cerebral hyperdensities : PCHD)^{13,20)}。従来のCTでは、このPCHDと、術直後の出血性合併症との画像上の鑑別が困難であったが、GSIの物質弁別画像、特

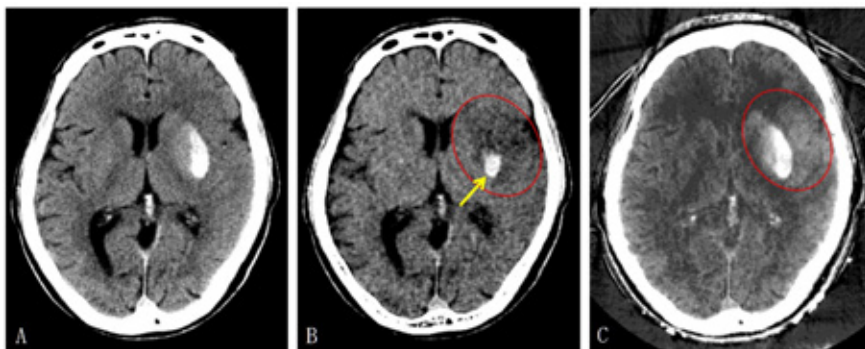


図3 血栓回収術直後の脳内高吸収域

60歳台，男性．左中大脳動脈血栓症に対して経カテーテル的血栓回収術が施行され，TICI 3の完全再開通が得られた．術直後にGSIによる単純CTが施行された．65 keV相当の仮想単色X線等価画像（A）では，左被殻に高吸収域を認める．水〔ヨード〕密度画像（B）では左被殻後部だけに高吸収域を認め（矢印），同部は出血性梗塞と考えられる．また，左被殻前方～島回～前頭弁蓋は水〔ヨード〕密度画像（B）で低吸収，ヨード〔水〕密度画像（C）で高吸収（post-interventional cerebral hyperdensities：PCHD）を示しており（丸囲い），同部は脳血液関門の破綻した不可逆性の急性期梗塞巣であると推測できる．

にヨード〔水〕密度画像と水〔ヨード〕密度画像を用いることで，両者の鑑別が容易に可能となった（図3）^{13,21）}．

5. 脳血管内治療直後の血管内残存血栓

急性期脳梗塞の画像診断において閉塞血管の同定をいち早く行うことは，虚血コアや側副路形成の評価と同様に臨床的に重要である．その手法としてはCTAやMR血管造影（MR angiography：MRA）が簡便かつ有効とされ，過去の多くのランダム化比較試験でも閉塞血管の評価にCTAやMRAを用いている．しかしながら実際には，造影剤を使わなくとも閉塞血管内の血栓子が高吸収に描出されることがあり（hyperdense sign），単純CTにて閉塞血管を推定し得る^{22）}．

一方，急性期脳主幹動脈閉塞に対する脳血管内治療直後のCTでは，残存するヨード造影剤により血管内も高吸収に描出される．このため，血栓回収術によって除去しきれなかった血栓子，あるいは遠位に移動した血栓子の高吸収との区別が困難となる．Gramsらは，血管内の造影剤と残存血栓子との鑑別のため，血栓回収術直後にDECTによる頭部単純CTを行い，両者の鑑別に有用であったと報告している^{23）}．血栓回収術後の内科的治療や再開通による出血のリスクの予測などにも影響を及ぼすため，DECTによる残存血栓子の有無の評価は，臨床的にも有用と言える．

また，頸部頸動脈狭窄症に対する頸動脈ステント留置術，脳動脈瘤コイル塞栓術，脳動静脈奇形や硬膜動静脈瘻に対する血管内治療などの血栓回収術以外の脳血管内治療や，冠動脈を含む中枢神経系以外の血管内治療においても，検査・治療直後の脳血栓や脳出血といった中枢神経系の合併症は重篤かつ迅速に対応すべき合併症の一つである．DECTによる頭部単純CTを検査・治療直後に行えば，検査・治療中に行ったヨード造影剤と，血栓子あるいは新鮮出血との鑑別が容易となるため，有意義と考えられる^{23,24）}．

6. 金属からのアーチファクト

近年の中枢神経領域の治療法は医療用器具の発達と共に進歩し，新たなプラチナ製コイルや血管内留置用ステントの開発が進んでいる．それらの多くは金属製のものであり，CTにて強いアーチファクトを生じることで画質劣化に繋がる．特に術後に残存病変や合併症の有無を評価するためには，詳細な血管画像が求められ，低侵襲だけではなく，金属アーチファクトを抑えた高画質な画像を得る必要がある^{12,16）}．

従来のCTでは，多色X線と呼ばれる複数のX線エネルギーの集合体である連続エネルギースペクトルのX線を用いて撮影される．この多色X線が物質を透過する際，低エネルギーのX線がより多く吸収され，X線のエネルギー分布は高い方へと

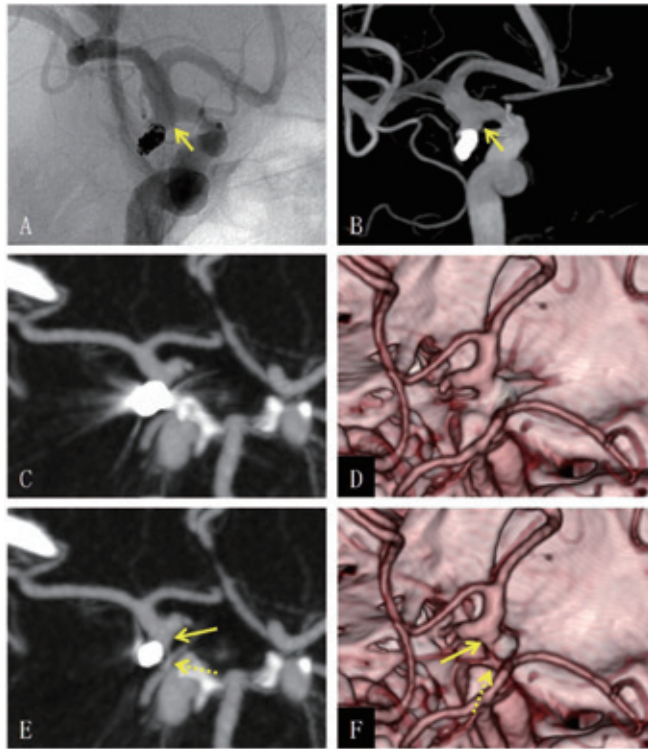


図4 金属からのアーチファクト

70歳台，女性．破裂右内頸動脈瘤に対して脳血管内治療によるコイル塞栓術が施行された．右内頸動脈瘤の頸部より右後交通動脈が分岐していたため，neck remnantで手技を終了した（矢印）．術後のworking angleのDSA（A）と回転DSA（B）を提示する．70 keV相当の単色X線等価画像では，metal artifact reduction software（MARS）の処理なしの頭部CTA（C：maximal intensity projection [MIP] 画像，D：volume rendering [VR] 画像）よりも，MARSの処理を併用した頭部CTA（E：MIP画像，D：VR画像）の方がプラチナ製コイル塊からの金属アーチファクトが低減され，neck remnant（矢印）や周囲の脳血管（点線矢印）の描出が良好となっている．

移動する．これを線質硬化と呼び，線質硬化により被撮像物質の深部でCT値が低下するアーチファクトを，ビームハードニングアーチファクトと呼ぶ．X線減弱係数の高い金属では特にこの現象が顕著で，術後CTにおける欠点の原因の一つと考えられてきた^{25, 26)}．

一方GSIでは，前述のDE撮像技術とプロジェクトデータベースでの画像再構成により，40 keVから140 keVまでの各X線実効エネルギーに対する仮想単色X線等価画像（virtual monochromatic image：VMI）を得ることが可能である．これにより，多色X線画像の欠点であったビームハードニングアーチファクトの低減が可能となり，実際に脳動脈瘤クリッピング術後のチタ

ン製クリップからのアーチファクト低減に，GSIが有用であったとの報告もある^{27, 28)}．

しかしながら，脳動脈瘤コイル塞栓術後のコイル塊からの金属アーチファクトは，GSIによるビームハードニングアーチファクト低減効果のみでは不十分となるケースが多い．これは，コイルの主たる素材であるプラチナのX線減弱係数が突出して高いことに起因し，コイル塊周囲に検出フォトン的大幅な減少・欠落によるダークバンドアーチファクトが生じる．この場合，VMIにソフトウェアベースでの金属アーチファクト低減技術を加えることで，プラチナ製コイル周囲のダークバンドアーチファクトを抑えることが可能となる^{12, 14, 15, 29)}．因みに，GE社製DECT装置には，metal

artifact reduction software (MARS) と呼ばれるソフトウェアが搭載されている^{12, 14, 15, 30)}。我々は、ファントム実験にてプラチナ製コイルによる金属アーチファクトの低減にMARSが有用であることを実証し、脳動脈瘤コイル塞栓術後の実臨床例に対する頭部CTAにおいても、GSIで得られたVMIにMARSによる画像処理を加えることで、コイル塊からの金属アーチファクトが軽減し、母血管をはじめとする周囲の脳動脈の描出が良好となることを報告した(図4)¹⁵⁾。特に、破裂動脈瘤に対してコイル塞栓術を行ったくも膜下出血の患者では、脳血管攣縮の有無の評価が必要となる。その際、従来のCTAではコイル塊からの金属アーチファクトを考慮し、脳血管撮影(digital subtraction angiography: DSA)やMRAが行われることが多い。しかしながら、DSAは動脈穿刺および動脈内カテーテル操作を必要とするため少なからず侵襲性・危険性を伴う検査である点、またMRAでは(撮像時間が長い事による)モーションアーチファクトやくも膜下血腫のT1短縮効果などにより画質不良となりやすい点などが、それぞれの欠点として挙げられる。一方でGSIとMARSを組み合わせたCTAでは、簡便かつ低侵襲に金属アーチファクトの少ない脳血管画像を得ることができるため、脳血管攣縮の画像評価に適した手法の一つと言える¹⁵⁾。MARSの有用性については、コイル塊の部位や大きさによってはアーチファクトの低減効果が一定でないこと、coil compactionによる瘤内血流の評価については未だ検討されていないことなど、未だ明らかにされていない点も多く、今後の更なる検討が望まれる。

その他のDECTによるプラチナ製コイル由来の金属アーチファクトを低減させる手法として、階調制限を利用したGSIによるエネルギーサブトラクション法³⁰⁾や、VMIと逐次近似画像再構成を用いた金属アーチファクト抑制ソフトウェア(iterative metal artifact reduction software, Siemens社)による処理を組み合わせた手法²⁸⁾などの報告もある。

7. まとめ

脳血管内治療後の画像評価におけるDECTの有用性について、ヨード密度画像含む物質弁別とMARSによる金属アーチファクト低減の技術を中心に解説した。近年の臨床研究の結果を受けて脳

血管内治療の適応は今後さらに拡大することが予想され、実臨床におけるDECTのニーズも高まっていくことが期待される。

文 献

- 1) Berkhemer OA, Fransen PSS, Beumer D, et al; MR CLEAN Investigators. A randomized trial of intraarterial treatment for acute ischemic stroke. *N Engl J Med* 2015; **372**: 11-20.
- 2) Campbell BC, Mitchell PJ, Kleinig TJ, et al; EXTEND-IA Investigators. Endovascular therapy for ischemic stroke with perfusion-imaging selection. *N Engl J Med* 2015; **372**: 1009-1018.
- 3) Goyal M, Demchuk AM, Menon BK, et al; ESCAPE Trial Investigators. Randomized assessment of rapid endovascular treatment of ischemic stroke. *N Engl J Med*. 2015; **372**: 1019-1030.
- 4) Jovin TG, Chamorro A, Cobo E, et al; REVASCAT Trial Investigators. Thrombectomy within 8 hours after symptom onset in ischemic stroke. *N Engl J Med* 2015; **372**: 2296-2306.
- 5) Saver JL, Goyal M, Bonafeet A, et al; SWIFT PRIME Investigators. Stent-retriever thrombectomy after intravenous t-PA vs. t-PA alone in stroke. *N Engl J Med* 2015; **372**: 2285-2295.
- 6) Yadav JS, Wholey MH, Kuntz RE, et al. Protected carotid-artery stenting versus endarterectomy in high-risk patients. *N Engl J Med* 2004; **351**: 1493-1501.
- 7) Brott TG, Hobson RW 2nd, Howard G, et al. Stenting versus endarterectomy for treatment of carotid-artery stenosis. *N Engl J Med* 2010; **363**: 11-23.
- 8) Rosenfield K, Matsumura JS, Chaturvedi S, et al; ACT I Investigators. Randomized trial of stent versus surgery for asymptomatic carotid stenosis. *N Engl J Med* 2016; **374**: 1011-1120.
- 9) Molyneux AJ, Kerr RS, Stratton I, et al; International Subarachnoid Aneurysm Trial

- (ISAT) Collaborative Group. International Subarachnoid Aneurysm Trial (ISAT) of neurosurgical clipping versus endovascular coiling in 2143 patients with ruptured intracranial aneurysms: a randomized trial. *Lancet* 2002; **360**: 1267-1274.
- 10) King B, Vaziri S, Singla A, et al. Clinical and angiographic outcomes after stent-assisted coiling of cerebral aneurysms with Enterprise and Neuroform stents: a comparative analysis of the literature. *J Neurointerv Surg* 2015; **12**: 905-909.
- 11) Mounayer C, Hammami N, Piotin M, et al. Nidal embolization of brain arteriovenous malformations using Onyx in 94 patients. *AJNR Am J Neuroradiol* 2007; **28**: 518-523.
- 12) 篠原祐樹, 久家圭太, 岩田直樹など. 脳・頭頸部領域のCT診断 - Discovery CT750 HDを用いた臨床応用を中心に - 映像情報Med 2014; **46**: 631-635.
- 13) 篠原祐樹, 久家圭太, 加藤亜結美など. 脳卒中診療におけるDual Energy CTの応用 映像情報Med 2017; **49**: 60-64.
- 14) 岸本淳一, 太田靖利, 篠原祐樹. Fast kVp switching dual energy CTの使用経験 映像情報Med 2013; **45**: 100-105.
- 15) Shinohara Y, Sakamoto M, Iwata N, et al. Usefulness of monochromatic imaging with metal artifact reduction software for computed tomography angiography after intracranial aneurysm coil embolization. *Acta Radiol* 2014; **55**: 1015-1023.
- 16) Kuya K, Shinohara Y, Sakamoto M, et al. CT angiography after carotid artery stenting: assessment of the utility of adaptive statistical iterative reconstruction and model-based iterative reconstruction. *Neuroradiology* 2014; **56**: 947-953.
- 17) 篠原祐樹, 久家圭太, 三好史倫など. くも膜下出血のCT・MRI診断 画像診断 2014; **34**: 1438-1448.
- 18) Shinohara Y, Sakamoto M, Takeuchi H, et al. Subarachnoid hyperattenuation on flat panel detector-based conebeam CT immediately after uneventful coil embolization of unruptured intracranial aneurysms. *AJNR Am J Neuroradiol* 2013; **34**: 577-582.
- 19) 野口 京. Dual Energy CTの開発, 現状および将来 新医療 2016; **10**: 46-51.
- 20) Nikoubashman O, Reich A, Gindullis M, et al. Clinical significance of post-interventional cerebral hyperdensities after endovascular mechanical thrombectomy in acute ischaemic stroke. *Neuroradiology* 2014; **56**: 41-50.
- 21) Renú A, Amaro S, Laredo C, et al. Relevance of blood-brain barrier disruption after endovascular treatment of ischemic stroke dual-energy computed tomographic study. *Stroke* 2015; **46**: 673-679.
- 22) Gács G, Fox AJ, Barnett HJ, Vinuela F. CT visualization of intracranial arterial thromboembolism. *Stroke* 1983; **14**: 756-762.
- 23) Grams AE, Knoflach M, Rehwald R, et al. Residual thromboembolic material in cerebral arteries after endovascular stroke therapy can be identified by dual-energy CT. *AJNR Am J Neuroradiol* 2015; **36**: 1413-1418.
- 24) Gupta R, Phan CM, Leidecker C, et al. Evaluation of dual-energy CT for differentiating intracerebral hemorrhage from iodinated contrast material staining. *Radiology* 2010; **257**: 205-211.
- 25) Barrett JF, Keat N. Artifacts in CT: recognition and avoidance. *RadioGraphics* 2004; **24**: 1679-1691.
- 26) 兵頭朋子, 村上卓道. X-ray イメージングのNext Innovation. 2. 臨床編. 2-3. Dual Energy CTの臨床. 日獨医報 2012; **57**: 68-82.
- 27) Dolati P, Eichberg D, Wong JH, Goyal M. The utility of dual-energy computed tomographic angiography for the evaluation of brain aneurysms after surgical clipping: a prospective study. *World Neurosurg.* 2015; **84**: 1362-1371.
- 28) Winklhofer S, Hinzpeter R, Stocker D, et al. Combining monoenergetic extrapolations from dual-energy CT with iterative reconstructions: reduction of coil and

- clip artifacts from intracranial aneurysm therapy. *Neuroradiology* 2018; **60**: 281-291.
- 29) Lee YH, Park KK, Song HT, et al. Metal artefact reduction in gemstone spectral imaging dual-energy CT with and without metal artefact reduction software. *Eur Radiol* 2012; **22**: 1331-1340.
- 30) 恩田敏之, 笹森大輔, 米増保之など. ステン
ト支援下脳動脈瘤コイル塞栓術後フォロー
アップにおけるdual energy CTの有用性.
脳外誌 2015; **24**: 614-621.