

Clinical application and future perspective of Dual Energy CT

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-04 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/39642

【総説】

Dual Energy CT の画像診断への応用と今後の展望

Clinical application and future perspective of Dual Energy CT

金沢大学医薬保健研究域医学系経血管診療学
(放射線科)

小 林 聡

はじめに

近年、Computed tomography (CT)は検出器の多列化に伴い撮像スピードの高速化やスライス厚の薄層化が進んでいる。さらに、画像再構成アルゴリズムの進歩やフィルターの改善は放射線被曝の低減に寄与している。これらの技術進歩に支えられDual energy CT (DECT)の実用化が進み、既に複数の機器メーカーからDECTが市販され臨床現場で使用されるようになってきた¹⁾。DECTの概念自体はCTが臨床使用されはじめた1970年代に既に発表されていたが、技術的制約のため実用化にはかなりの時間を要した。

金沢大学附属病院にも2010年にDECT装置が導入され日常診療に使用されている。今後多くの施設でDECTが導入、使用されていくと考えられる。本稿ではDECTの原理と画像診断への応用の現状、さらに今後の展望について概説する。

DECTの原理

通常のCTで用いられるX線のエネルギーは連続的に分布する連続スペクトルを呈する。例えば管電圧が80kVpの場合X線エネルギーは約20~80keV、140kVpの場合X線エネルギーは約20~140keVの範囲内で連続的に分布し、管電圧によってスペクトルパターンが異なる。

X線の管電圧が異なると物質を通過する際の減弱の程度は異なる。CT画像において画素の濃淡を表すCT値はこのX線の減弱の程度を反映している。ある物質に対して80kVpと140kVpのエネルギーのX線を照射した場合、X線の減弱の程度が異なるため、得られるCT値も異なる。このX線のエネルギーの違いによるCT値の変化は物質固有であるため物質の分別が可能となる。

DECTにて2種類のエネルギーのX線を用いてデータ収集を行う場合、2つのデータセットにおいてX線エネルギー以外のパラメータの違い、すなわち位置のずれや時相の差が大きいと正確な分析が困難となる。DECTの概念自体は1970年代にすでに提唱されていたが近年まで実用化が困難であったのはそのためである。

CTスキャナにて異なる管電圧のエネルギーのX線照射を行い、複数のデータセットを入手する方法にはいくつかの方法がある。具体的にはCTスキャナにX線管球を複数搭載し、それぞれから異なる管電圧のエネルギーのX線照射を行い管球が1回転する間に2種類のデータを取得する方法(2管球型)、X線管球からのX線照射エネルギーを高速で変化させることにより1個の管球が患者の

周りを1回転する間に2種類のデータを取得する方法(高速スイッチング型)、X線管球が患者の周りを回転する際、1回転目と2回転目のX線管球のエネルギーを変化させることにより2種類のデータを取得する方法(2回転型)などがある。CT撮影中に患者に体動が生じた場合2種類のデータ間に誤差が生じ正確な計算が困難となるが、この観点からは高速スイッチング型、2管球型、2回転型の順で信頼度が低下すると考えられる。いずれの方式においても2種類のCTデータを入手する必要があり従来のsingle energy CTと比較して放射線被曝は増加する。しかし近年のCT被曝低減技術の進歩や画像再構成法の発達により最新のCT機種で行うDECTと一世代前の従来型CTの被曝量にはほとんど差がなくなっている。

なお、2管球型のDECTで撮影を行う場合、DE撮影を行うと、140kV、80kV、Mixイメージの3種類の画像が再構成される。Mixイメージは140kVと80kVの画像を任意の比率で重み付け加算した画像であり、多くの場合120kV相当の画像を作成して通常の読影・診断に利用している。

DECTの特徴

DECTの特徴としては物質分別が可能であること、仮想単色X線画像の作成が可能であることが挙げられる。

1. 物質分別

DECTを用いた物質分別の方法には2種類の基準物質を用いて分別する2-material decompositionと3種類の基準物質を用いて行う3-material decompositionがある。以下にそれらの概要を記す。

(1)2-material decomposition

2-material decompositionの概念は以下のごとくである。

2種類のX線エネルギーのCT値をXY軸とするグラフ(図1)上で、物質A、物質Bはそれぞれ濃度や密度に従ってある一定の範囲の領域にプロットされる。その分布の境界に適切な分離線を作成することで物質Aと物質Bの分別が計算によって可能となる。

(2)3-material decomposition

3-material decompositionの概念は以下のごとくである。

2種類のX線エネルギーのCT値をXY軸とするグラフ上でA~Cの3種類の基準物質を設定する(図2A;ここでは純粋な脂肪をA、純粋な軟部組織をB、純粋なヨードをCとする)。石灰化や骨を含まない生体内の任意の組織の組成は純粋な脂肪と純粋な軟部組織が任意の割合で存在していると仮定すると任意の軟部組織のCT値は線分AB上にプロット可能である(図2B)。同

様に純粋な脂肪に造影CTを行って組織内にヨードが混在した場合そのCT値は線分AC上に、純粋な軟部組織に造影CTを行ってヨードが混在した場合、そのCT値は線分BC上にプロット可能となる(図2C)。以上から造影CTでは石灰化や骨を含まない生体内の任意の組織(X)は、三角形ABC内のいずれかの場所にプロット可能である(図2D)。ここで、CとXを結ぶ直線と線分ABの交点(Y)がヨードを含有しない任意の軟部組織のCT値であり線分XYの長さが造影で付加されたヨード量といえる(図2E)。

このような仮定のもと2種類の管電圧のエネルギーから得られた任意の組織の造影CTのCT値を元に造影前の組織のCT値を計算することで造影剤を含まないCT画像を作成することができる。これは仮想単純CT(virtual non-contrast CT, VNC-CT)画像と呼ばれる。また、VNC-CT画像作成時には造影CT時の各組織のヨード含有量を画像化したヨードマップ画像も同時に得られる。

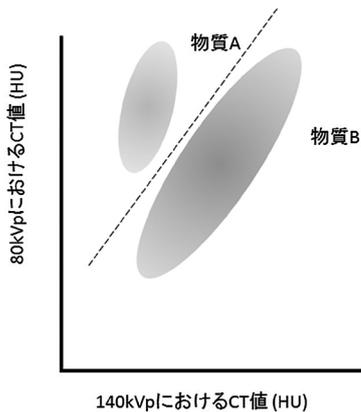


図 1. 2-material decomposition の概念図

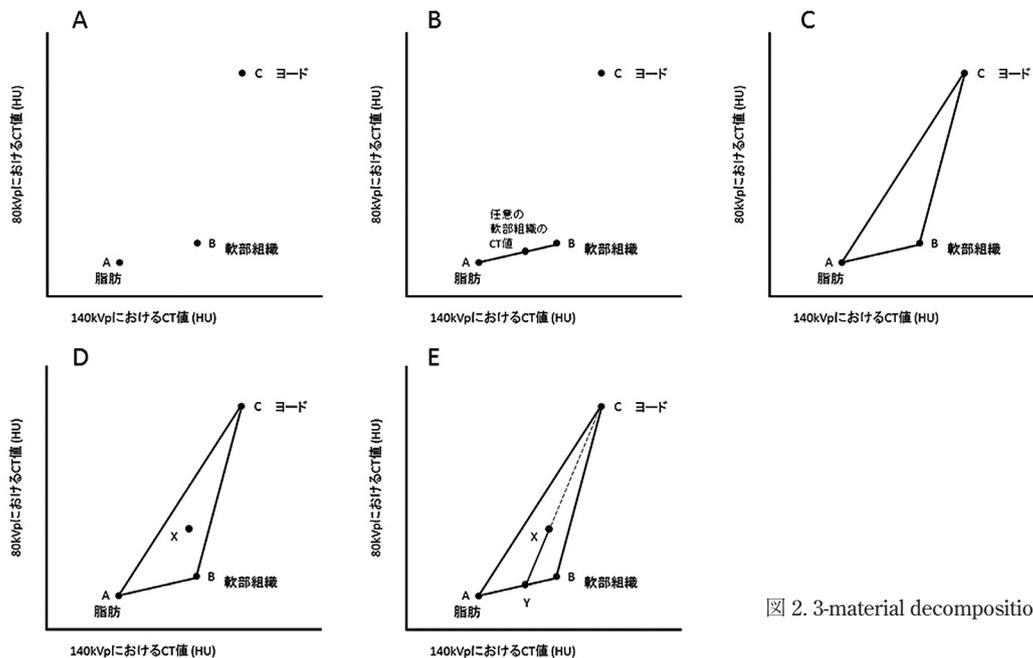


図 2. 3-material decomposition の概念図

2. 仮想単色 X 線 CT

DECTでは2種類の管電圧で撮影された画像を種々の重み付けで合成することにより仮想単色X線CT画像の作成も可能である。低エネルギー成分の仮想単色X線画像ではコントラストの向上が得られるがノイズも増加し、高エネルギー成分の仮想単色X線CT画像ではコントラストが低下するかわりにノイズが低減された画像が得られる。

DECT 技術の臨床応用

1. 骨除去画像の作成

2-material decompositionを応用して、骨と血管の分離が可能である。通常のワークステーションにおいても骨を除去した画像を作成することができるが、DECTでは物質の組成を認識した分離処理を行っているために、骨と血管が近接した部位などでも高精度、かつ短時間で容易に分離可能である(図3)。また、石灰化の分離も同様に施行できるため石灰化を伴う血管の内腔評価も可能となる。

2. VNC-CT 画像の作成

造影剤投与後に撮影したDECT画像からVNC-CT画像を作成することにより、造影前CTの撮影をスキップできる可能性がある。

Graserら²⁾は腎腫瘍のCT診断時に造影剤投与後のnephrographic phase画像をDECTで撮影し、そこから得られたVNC-CT画像と真の造影前CT(true non-contrast CT, TNC-CT)画像を比較検討しているが、画像のクオリティやノイズの面でVNC-CTはTNC-CTに劣るものの許容範囲内でありほとんどの場合、TNC-CTをVNC-CTで代用可能であったと述べている。

実際、造影前の単純CT撮影をスキップすることが可能であれば、検査時間短縮やCT検査の被曝量低減に役立つと考えられる。De Ceccoら³⁾も肝臓のTNC-CTと

VNC-CTを比較した検討において、一定の条件下であればVNC-CTはTNC-CTと置き換えることが可能であり患者の被曝低減に寄与する可能性があるとして述べている。

ただし、自験例で正常肝、C型慢性肝炎、C型肝硬変例を対象に3相造影DECTの各相から作成したVNC-CTとTNC-CTのCT値の比較を肝実質、脾臓、門脈、下大静脈、腹部大動脈で行ったところ、肝実質のCT値はいずれの造影相から作成した場合もVNC-CTとTNC-CTで

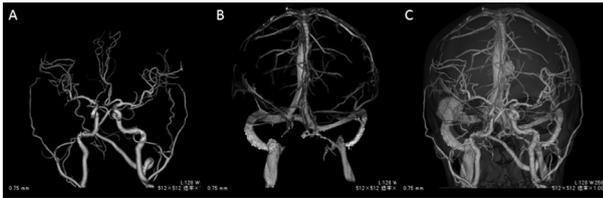


図3. 脳腫瘍症例における骨除去画像の応用。
A 動脈抽出画像, B 静脈抽出画像, C 動脈, 静脈合成画像。

良好な正の相関を認めたが、血管や脾臓のCT値は肝臓と比べて相関が乏しいこと、VNC-CTにおけるCT値はTNC-CTにおけるCT値と比較してわずかであるが高めの値をとる場合が多いことが判明した(図4)。また、脂肪肝やヘモジデロシスのように肝実質に物質が沈着したために肝臓の濃度が大きく変化するような場合においても同様に正しくVNC-CT画像が作成可能かについては未検討であり、現時点ではDECTのVNC-CT画像をTNC-CT画像に置き換えて診断を行うのは時期尚早と考えられる。

3. 仮想単色X線CTの臨床応用

(1) 金属アーチファクト低減

仮想単色X線CT画像では整形外科領域などで使用される金属インプラントにより生じる金属アーチファクトの低減が可能となる。Lewisら⁴⁾はファントムを用いた検討で40~190keVまでの10keVごとの仮想単色X線

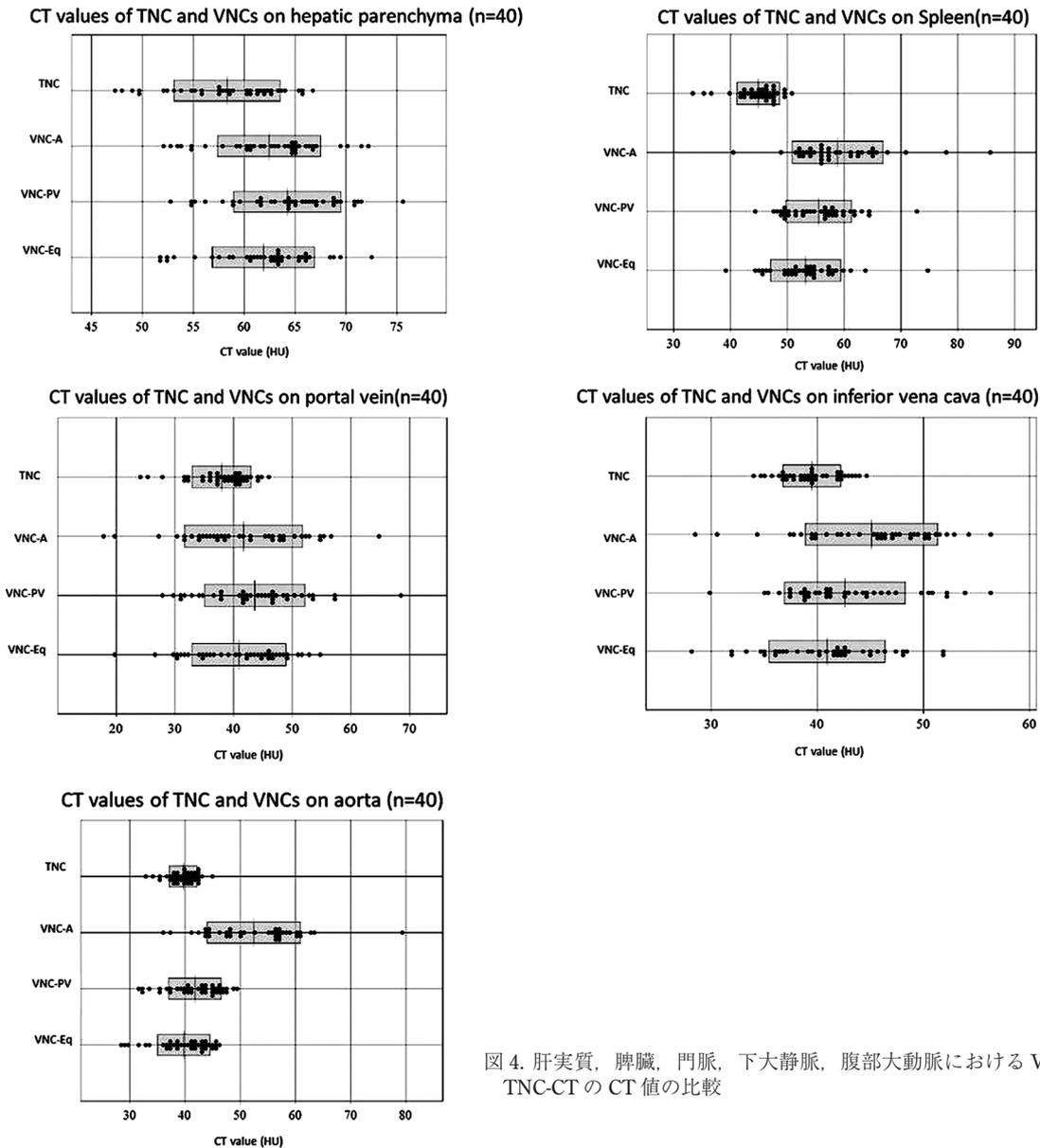


図4. 肝実質、脾臓、門脈、下大静脈、腹部大動脈におけるVNC-CTとTNC-CTのCT値の比較

CT画像を用い400 mA, 150keVの画像で金属によるstreak artifactが74%低減すること, 200mA, 190keVの画像ではコントラスト/ノイズ比が低下するかわりに金属アーチファクトがほとんど消失することを示している。また, Bambergら⁵⁾は金属インプラントを使用した31例の臨床例を用いて2管球型DECTの仮想単色X線CTが画質改善と診断能向上に有用であることを示している(図5)。

(2) 造影コントラストの強調

仮想単色X線CTを使用して40keVから180keVまで20keV間隔でエネルギーを変化させた肝細胞癌の動脈相CT画像を作成したところ, 通常の診断に供せられる120kVp相当のmixイメージ画像と比較すると低keV画像ほど肝臓と腫瘍のコントラストが強調され, 腫瘍濃染がはっきりすること, 高keV画像ほど腫瘍濃染が不明瞭化し180keVでは腫瘍濃染が認識困難であることがわかる(図6)。

また, Altenberndら⁶⁾は低kVp画像と高kVp画像における多血性肝細胞癌の検出能の比較を行い, 80kVpの低kVp画像において140kVpの高kVp画像と比較して多血性肝細胞癌の検出能が高かったと述べている。ただし低

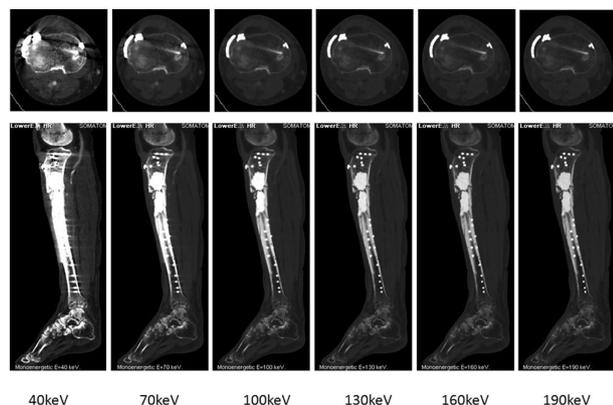


図5. 下腿骨インプラント挿入例における仮想単色X線CT画像

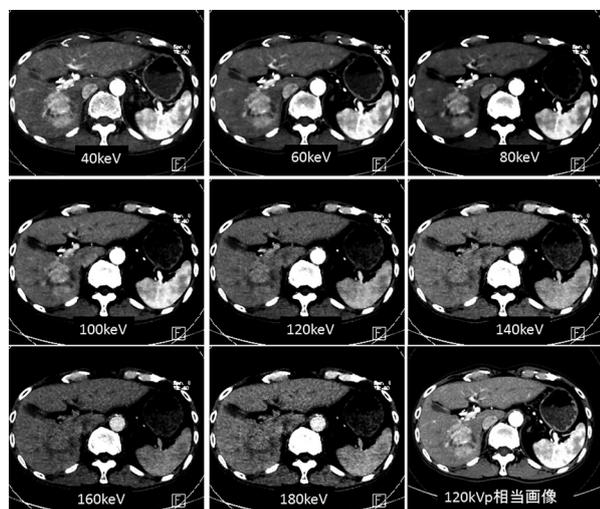


図6. 多血性肝細胞癌症例における仮想単色X線CT画像(造影動脈相)

kVp画像では同時にノイズの増加も見られ, それに伴う診断能の低下も生じうることに留意すべきである。

4. 血流サロゲートマーカーとしてのヨードマップ画像

VNC-CT作成時に付随して得られるヨードマップ画像は造影画像での各ピクセル上のヨード量の多寡を示す画像である。これは各時相における造影程度を可視化するものであり, 関心領域の血液量の多寡を反映している。

当院のDECTではヨードマップ画像上で関心領域を設定すると関心領域の体積あたりのヨード量がmg/mlの単位を持って測定可能である。少数例を対象に肝腫瘍性病変の造影CT動脈相, 門脈相, 平衡相におけるヨード量を比較したところ多血性肝細胞癌では 2.5 ± 0.8 , 2.3 ± 0.4 , 1.7 ± 0.4 (mg/ml), 乏血性肝腫瘍では 1.1 ± 0.8 , 1.8 ± 1.2 , 1.4 ± 0.8 (mg/ml)であり, 動脈相では平均のヨード量は多血性肝細胞癌で乏血性肝腫瘍と比較して有意に高値を呈することが示された⁷⁾。

CTを利用した比較的簡便な血流の評価法としてArterial enhancement fraction (AEF)が知られている⁸⁾。これはルーチンの造影CTで行われる造影CT動脈相画像と造影CT門脈相画像における関心領域内のCT値の上昇程度が動脈相, 門脈相における血流の程度を反映していると考え, 単純CTと動脈相CT画像のCT値の差(ΔHU_a)と単純CTと門脈相CT画像のCT値の差(ΔHU_{pv})の比をカラーマップ化して血流の状態を半定量的に評価するものである。Kangら⁹⁾は急性肝炎や慢性肝疾患症例でAEF値を検討し, 急性肝炎では正常肝と比較してAEF値が有意に増加すること, 正常肝と慢性肝炎, 肝硬変CP-AではAEF値に差を認めないが肝硬変CP-B,Cの非代償性肝硬変ではCP-A肝硬変と比較し有意にAEFが増加していることを示している。

我々はドイツのシーメンス社と共同研究を行いDSCTのヨードマップ画像を利用した, 従来法よりも正確なAEF算出のプロトタイプソフトを用い慢性肝疾患の血流の検討を行っている¹⁰⁾。少数例の検討では, 正常肝と慢性肝疾患のAEFの比較を行ったところAEFの平均値(平均 \pm SD, %)は正常肝 -44.7 ± 10.3 , C型慢性肝炎 -57.0 ± 11.4 , C型肝硬変 -61.0 ± 10.9 , 門脈大循環環絡を伴うC型肝硬変 -44.9 ± 18.8 であり, 正常肝とC型慢性肝炎, 正常肝とC型肝硬変の間でそれぞれ有意差を認め従来のサブトラクション法によるAEFと同様の結果が得られることが示された。

このような3相造影CTを用いた血流解析は造影剤の経時的・連続的な挙動を反映させたものではなく動脈相, 門脈相などピンポイントの時相の造影剤の分布状態をもとに算出しているため, ヨードマップ画像上でのヨード量測定はPerfusion CTと比較して定量性の面で劣るという欠点やAEF測定は実際にはどのような血行動態を反映しているのか判断が難しいという欠点がある。しかしルーチンの多相造影CT画像を利用して入手可能な肝内血流状態の簡易的な指標, あるいは肝内の血行動態の不均一性などを視覚的に評価する血流パラメータとしては使用可能ではないかと考えられる。

1. DECT を用いた肝鉄濃度解析の試み

濱口ら¹¹⁾はDECTの3-material decomposition法を応用して肝臓の鉄濃度と脂肪含有率の測定が行えないかと考え、ファントム実験を行っている。

具体的には、市販の豚レバーをペースト状にしたものに鉄としてSuperparamagnetic iron oxide (SPIO)、脂肪としてラードを加え、脂肪肝、鉄沈着肝、脂肪及び鉄沈着肝をシミュレートする3種類のファントムを使用して3-material-decomposition法を用いた鉄濃度マップと脂肪含有率マップを作成し評価している。その結果、鉄濃度および脂肪含有率の精度はいずれも理論値と良い相関が得られるが、鉄濃度に関しては理論値と比較するとやや過小評価の傾向があること、また、脂肪及び鉄沈着肝のファントムで鉄濃度と脂肪含有率の同時測定を行った場合でも良い相関が得られるが、個別測定と比較するとバラツキが大きいことを明らかにしている。これらの検討結果は、いくつかの臨床応用に向けての課題があるものの生体への鉄沈着や脂肪沈着の定量的評価がDECTで行える可能性を示している。

2. 新規造影剤による物質分別の可能性

海外においてはヨード以外の物質を用いた新規造影剤を開発し、これまで従来の造影CTでは得られなかった新たな情報をDECTで得ることができないかという試みがなされている。

Monganら¹²⁾はDECTの3-material decomposition法を用いてヨード造影剤とタングステン酸ナトリウム二水和物溶液を混合したファントムで両者の物質分別が明瞭に可能であることを示した。また、ウサギを用いた動物実験で経口投与したビスマスとサリチル酸との錯体であるビスマスサブサリチレートと静注投与したヨード造影剤の分別が可能であることを示している¹³⁾。

これら検討の背景として米国では腹部CT時に腸管を識別する目的で経口の造影剤を服用してCT撮影を行う場合が多い点が挙げられる。この場合、ヨード製剤を静注した造影CTで消化管出血の有無を評価することは経口投与された造影剤によりマスクされてしまい難しい場合があると考えられる。造影剤に替えてビスマス性の経口造影剤を開発すればDECTの物質分別により腸管内のビスマス性造影剤と消化管出血で血管内から消化管内にもれだしたヨード造影剤を分離識別可能である。

腹部造影CT時に経口造影剤を使用することがまれな我が国においては、この試み自体の有用性は乏しいと考えられる。しかし投与経路や投与方法の工夫により、これまで想像できなかった新たな情報がDECTで入手可能となる可能性がある。

おわりに

近年普及しつつあるDECTの原理と画像診断への応用の現状、さらに今後の展望について概説した。

- 1) Yeh BM, Shepherd JA, Wang ZJ, Teh HS, Hartman RP, Prevrhal S. Dual-energy and low-kVp CT in the abdomen. *Am J Roentgenol* 193: 47-54, 2009
- 2) Graser A, Johnson TR, Hecht EM, Becker CR, Leidecker C, Staehler M, Stief CG, Hildebrandt H, Godoy MC, Finn ME, Stepanky F, Reiser MF, Macari M. Dual-energy CT in patients suspected of having renal masses: can virtual nonenhanced images replace true nonenhanced images? *Radiology* 252: 433-440, 2009
- 3) De Cecco CN, Buffa V, Fedeli S, Luzietti M, Vallone A, Ruopoli R, Miele V, Rengo M, Paolantonio P, Maurizi Enrico M, Laghi A, David V. Dual energy CT (DECT) of the liver: conventional versus virtual unenhanced images. *Eur Radiol* 20: 2870-2875, 2010
- 4) Lewis M, Reid K, Toms AP. Reducing the effects of metal artefact using high keV monoenergetic reconstruction of dual energy CT (DECT) in hip replacements. *Skeletal Radiology* 42: 275-282, 2013
- 5) Bamberg F, Dierks A, Nikolaou K, Reiser MF, Becker CR, Johnson TR. Metal artifact reduction by dual energy computed tomography using monoenergetic extrapolation. *Eur. Radiol* 21: 1424-1429, 2011
- 6) Altenbernd J, Heusner TA, Ringelstein A, Ladd SC, Forsting M, Antoch G. Dual-energy-CT of hypervascular liver lesions in patients with HCC: investigation of image quality and sensitivity. *Eur Radiol* 21: 738-743, 2011
- 7) Kobayashi S, Matsui O, Gabata T, Koda W, Minami T, Ryu Y, Kozaka K, Kitao A. Quantitative analysis of Iodine concentration in hepatic tumours using dual energy multiphasic CT as objective index for assessment of tumour vascularity: Initial experience. *Insights into Imaging ECR2011 Book of Abstracts 2: Suppl 1, S60*, 2011
- 8) Kim KW, Lee JM, Klotz E, Park HS, Lee DH, Kim JY, Kim SJ, Kim SH, Lee JY, Han JK, Choi BI. Quantitative CT color mapping of the arterial enhancement fraction of the liver to detect hepatocellular carcinoma. *Radiology* 250: 425-434, 2009
- 9) Kang SE, Lee JM, Klotz E, Kim KW, Kim JH, Han JK, Choi BI. Quantitative color mapping of the arterial enhancement fraction in patients with diffuse liver disease. *Am J Roentgenol* 197: 876-883, 2011
- 10) 小林 聡, 香田 渉, 南 哲弥, 小坂一斗, 北尾 梓, 井上大, 米田憲秀, 吉田耕太郎, 池野 宏, 松井 修, 蒲田敏文, 大谷カタリーナ. 修復の病理学: 肝硬変に伴う血管改築の過程とその画像評価の可能性. *肝胆膵* 68: 725-731, 2014
- 11) 濱口隆史, 高田忠徳, 大野直樹, 松原孝祐, 小林 聡, 宮地利明. Iron concentration and fat fraction determination of liver with dual-energy CT: a phantom study. 第69回日本放射線技術学会総会学術大会予稿集, P134, 2013
- 12) Mongan J, Rathnayake S, Fu Y, Wang R, Jones EF, Gao DW, Yeh BM. In vivo differentiation of complementary contrast media at dual-energy CT. *Radiology* 265: 267-272, 2012
- 13) Mongan J, Rathnayake S, Fu Y, Gao DW, Yeh BM. Extravasated contrast material in penetrating abdominopelvic trauma: dual-contrast dual-energy CT for improved diagnosis—preliminary results in an animal model. *Radiology*. 268: 738-742, 2013