

原 著

デュアルエネルギー CT (スペクトラル CT) による 造影剤減量の実験的検討

多根総合病院 放射線科

赤 崎 勉 脇 田 季 胤 北 卓 黒 田 一 行
田 村 久 美 子 濱 澤 良 将 松 尾 良 一

要 旨

当院で稼働している CT 装置 GE 社製 Discovery 750HD ではデュアルエネルギー CT 撮影が可能でそれにより得られる仮想単色 X 線等価画像 (VMS) を用いることでヨード造影剤の減量が可能である。今回、臨床応用への第一歩として水で希釈した造影剤のシリンジファントムを用いた実験により造影剤減量の指標作りを行った。シングルエネルギー CT 撮影で CT 値約 40 から 350HU までのシリンジファントムを作成し、デュアルエネルギー CT 撮影にてそれぞれの VMS を算出した。シングルエネルギー CT はシリンジの CT 値とバックグラウンドの CT 値と SD 値から CNR を求め、デュアルエネルギー CT は VMS の実効エネルギーを変えて同様に CNR を求めた。それらから CNR が同等となるシングルエネルギー CT とデュアルエネルギー CT の CT 値を決定し造影剤減量式から減量の割合を導き出した。単位時間当たりの造影剤量は 31%、総造影剤量は 12%の減量が可能という結果になった。

Key words : デュアルエネルギー ; CT ; 造影剤

はじめに

造影 CT 検査に使用するヨード造影剤は有益な画像情報をもたらす一方で少なからず腎機能などに悪影響を及ぼす。単純 CT 検査だけでは難しい脈管系の評価、腫瘍の鑑別診断や広がり、転移の有無などの画像診断で造影 CT 検査は欠かすことの出来ない検査である。造影剤のリスクとしては造影剤腎症¹⁾、造影剤急速注入によるもれの事故^{1) 2)} や熱感による体調不良³⁾、造影剤過敏症などが挙げられるが、リスク低減という医療現場の立場から画像診断を損なわない最低限の造影剤量で行ないたい。現在行っている造影 CT 検査の造影剤量決定には被検者の体重は勿論であるが造影効果の判断基準となる検査目的部位の CT 値が一番の要素である。当院で稼働中の CT 装置 GE 社製 Discovery 750HD (以下 750HD) は通常の 120 kVp のシングルエネルギー CT 撮影以外に 140 kVp と 80 kVp 二種類のエネルギーの X 線を高速スイッチン

グ法により交互に照射するデュアルエネルギー CT 撮影⁴⁾ ができ、そこから作り出される仮想単色 X 線等価画像 (Virtual Monochromatic Spectral Image 以下 VMS)⁵⁾ は、シングルエネルギー CT で撮影した画像よりもコントラスト分解能を良くすることができる⁶⁾。それを利用することによりシングルエネルギー CT よりも少ない造影剤量で検査をすることができる。そこで今回シリンジファントム測定により得たデータから減量の割合を導き出した。

方 法

120 kVp のシングルエネルギー CT にて CT 値が約 40 から 350 HU になるように、異なる濃度の希釈造影剤が封入されたシリンジを寒天で覆った自作ファントム (図 1) を作成し、当院で使用する CT750HD にて各 5 回撮影した。撮影条件は当院で使用する腹部撮影条件とし、シングルエネルギー CT は 120 kVp、最大 300 mA の可変電流、0.5 sec/rot、デュアルエネルギー

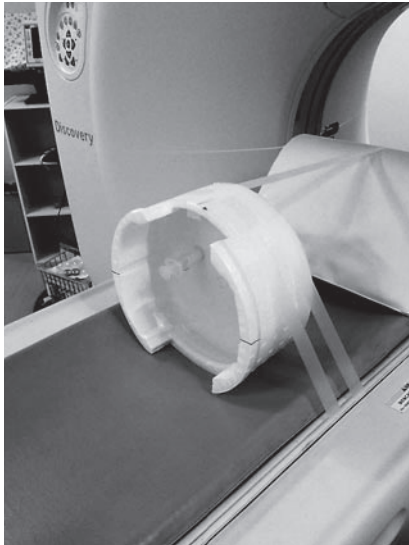


図1 自作ファントム

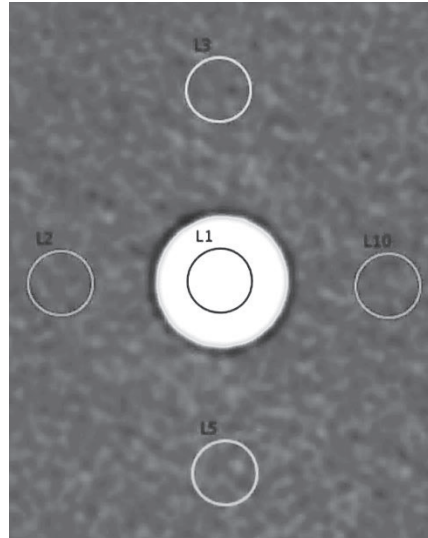


図2 ROI 設定位置

CT は 140 kVp, 80 kVp, 375 mA の 固 定 電 流, 0.6 sec/rot とした. 画像再構成は再構成関数を Soft とした Plus Recon, スライス厚は当院のルーチン画像の厚みの 5 mm とした.

撮影後のデュアルエネルギー CT データより, 各造影剤濃度のシリンジファントムごとに VMS を 1 keV 単位で 40 から 140 keV まで作成した. VMS の実効エネルギーが変化すると CT 値 (単位は HU: Hounsfield Unit) と, SD 値 (Standard Deviation) も変化することから, 作成した画像それぞれに造影剤および周辺四か所に配置したバックグラウンドの ROI (図 2) の CT 値, バックグラウンドの SD 値を測定した. また, シングルエネルギー CT も各造影剤濃度のシリンジファントムごとに同様に CT 値, バックグラウンドの SD 値を測定した. 測定結果より低コントラスト分解能評価で使用する CNR を以下の計算式で算出した.

$$\text{CNR} = \frac{(\text{造影剤 CT 値} - \text{バックグラウンド CT 値})}{\text{バックグラウンド SD 値}}$$

造影剤減量を算出する方法は, デュアルエネルギー CT の VMS とシングルエネルギー CT での各シリンジの CNR が同等となるシリンジを特定し, それぞれのシリンジの CT 値から次式にてヨード量に変換し, シングルエネルギー CT のヨード量に対してデュアルエネルギー CT ではどれだけ減量されたかを計算し減量率を求めた⁷⁾.

最大 CT 値 $y = 0.17x + 93.21$ (y : CT 値, x : 単位時間当たりヨード量)

平衡相 CT 値 $y = 4.258x - 10.03$ (y : CT 値, x : 総ヨード量)

最大 CT 値はダイナミック CT での動脈観察などに関係してくるもので注入速度が関わる. また平衡相 CT 値は実質や病変の観察に関係してくるもので総注入量が関わっている. 今回の検討では CT 値が 200HU 以上のものは最大 CT 値の検討に 200HU 以下のものは平衡相 CT 値の検討に用いた^{8) 9)}.

結 果

図 3 にシングルエネルギー CT で測定した各シリンジの造影剤濃度を CT 値で表し, デュアルエネルギー CT にて各シリンジの CT 値が VMS の実効エネルギーによりどのように変化するかをグラフで示した. VMS のエネルギーによる CT 値は 40 keV が最大でエネルギーが高くなるにつれ小さくなり, 同じシリンジで比較すると VMS の実効エネルギーが 67 から 70 keV の間でシングルエネルギー CT と同じ CT 値になった.

デュアルエネルギー CT の今回の実験では寒天部分になるバックグラウンドの SD 値の変化をシングルエネルギー CT の SD 値と比較できるように図 4 に示した. 当然であるが SD 値が小さいほどノイズが少ない画像である. 140 keV から 80 keV 付近まではシングルエネルギー CT の SD 値と比べほぼ同じ値であるが, 80 keV から 63 keV の間は若干ではあるが小さくなり 70 keV あたりで最小値になる. 63 keV より低い実効エネルギーでは実効エネルギーが小さくなるほど SD 値は著明に大きくなった. また, シングルエネルギー CT の SD 値に対してデュアルエネルギー CT の SD 値が 50% 上昇するときの VMS は 52 keV であった.

CT 値と SD 値の結果から CNR を求める式に代入

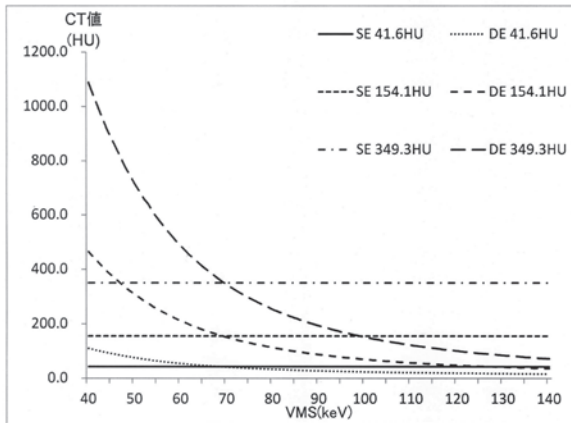


図3 シングルエネルギー CT とデュアルエネルギー CT の CT 値の関係
 ・SE：シングルエネルギー CT
 ・DE：デュアルエネルギー CT
 ・数値は SE での測定 CT 値

して計算し、シングルエネルギー CT の CNR とデュアルエネルギー CT の VMS での CNR の変化を抜粋して図5にグラフで示した。グラフの曲線は40から70 keV まで変化は小さいが、それより VMS のエネルギーが高くなると CNR は著明に低下した。シングルエネルギー CT とデュアルエネルギー CT の VMS での CNR の比較では、70 keV 以下でグラフが重なる部分が見られる。1つは DE50.2 HU と SE61.6 HU である。これはシングルエネルギー CT で 61.6 HU の CT 値であるシリンジの撮影結果から得られた CNR とシングルエネルギー CT では 50.2 HU であったシリンジをデュアルエネルギー CT で撮影した結果から得られた CNR が同等であることを意味している。同様にシングルエネルギー CT の 136.2 HU とデュアルエネルギー CT での 107.5 HU, シングルエネルギー CT の 243.7 HU とデュアルエネルギー CT での 190.7 HU の CNR が同等であった。

考 察

造影 CT 検査に使用される造影剤は少なからず腎機能に影響を及ぼすため出来るだけ使用量を減らしたいのは当然であるが、それによって造影効果が不十分であれば意味がない。今回のファントム測定による実験は、デュアルエネルギー CT によって造影剤がどれだけ減量できるかを検討するための指標作りとして行った。またファントム測定の方法は本邦の CT 装置精度管理基準となる標準 X 線 CT 画像計測¹⁰⁾に照らし合わせて行った。

VMS はデュアルエネルギー CT から作り出される

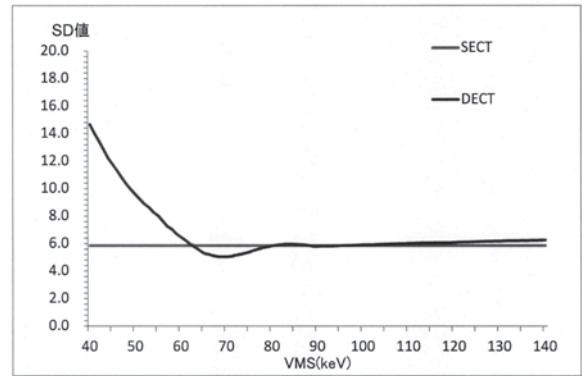


図4 シングルエネルギー CT とデュアルエネルギー CT の SD 値の関係
 ・SECT：シングルエネルギー CT
 ・DECT：デュアルエネルギー CT

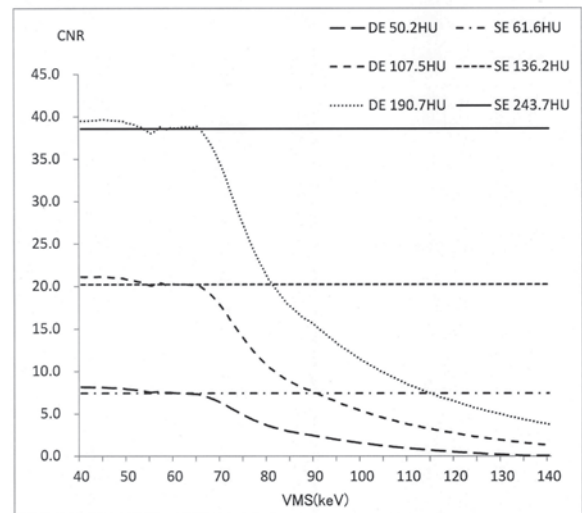


図5 シングルエネルギー CT とデュアルエネルギー CT の CNR の関係
 ・SE：シングルエネルギー CT
 ・DE：デュアルエネルギー CT
 ・数値は SE での測定 CT 値

画像であるがその算出過程は各メーカー非公開である。今回使用した CT 装置では 140 kVp と 80 kVp の二つの異なる X 線を高速スイッチングで交互に照射し撮影する。通常のシングルエネルギー CT の画像は 120 kVp の連続 X 線つまり 120 keV 以下すべてのエネルギー要素を含んだ画像であるが VMS は名前が示す通り単一のエネルギーだけを仮想して表示した画像である。単一エネルギーだけで構成された画像は目的とする物質の質量減弱係数からその物質の密度情報を正確に解析できることで最もコントラスト差がつくエネルギーでの画像化などを可能にする。

VMSは真の単一エネルギー画像ではなく連続X線から計算された仮想の単一エネルギー画像であるため、通常のSD値の計算方法ではなくメーカー独自の方法で計算されているがその内容は明らかにされていない。今回当院では初めてデュアルエネルギーCTにおけるSD値のエネルギーに対する変化をグラフから知ることができた。その結果のグラフから140 keVから78 keVあたりまではほぼ同等の値を示し70 keVで最小値となり63 keVあたりから下のエネルギーでは急激に高くなっていくことが分った。SD値が高くなることはノイズの増加を意味し、CNR算出式の分母であるSD値が大きくなりCNRを低下させる要因となるが図5のCNR曲線は異なる結果を示している。これはCNR算出式の分子に代入するCT値が70 keVより低くなるあたりからSD値が大きくなる以上にCT値が大きくなっていくためであり、かつデュアルエネルギーのCT値から引き算するシングルエネルギーのCT値が変わらないためである。

今回画像を評価するのに使用したCNRは低コントラスト分解能の定量的評価方法であるが、画質の良否とは必ずしも一致するものではない。しかし画質の評価は容易ではなく今回は定量評価のみで結果を出すこととした。しかし、CNRだけに着目すると診断に適さない画像まで評価の対象になってしまう可能性がある。そこで120 kVpのシングルエネルギーCTで測定した各シリンジのCNRとそのCNRの値に近いVMSのCNRを選ぶ時に最大値ではなく、診断画像として担保できることを考慮してシングルエネルギーCTと同じSD値になるVMSに視点を置き、SD値のグラフから同じSD値で一番低い実効エネルギーである63 keVに着目した。シングルエネルギーCTと同等のCNRの値を持つVMS63 keVで造影剤減量を検討した。同じSD値でも低エネルギー側のVMSのSD値を選んだ理由は低エネルギーであるほど造影剤が高いCT値を示し造影剤がより強調されるからである。表1に同等のCNRを示したシングルエネルギーCTとVMS63 keVのシリンジを選び出した。下2行から最大CT値の造影剤減量率を求めると36%と31%となる。上2行から平衡相CT値の造影剤減量率を求めると16%、12%となる。以上の結果からノイズの少ない画像を得ようとすれば通常の造影では10%強の造影剤減量が可能であるといえる。ただし、動脈のみの検討だけでよいならば30%以上の減量も可能であると考えられた。

ところで本実験は先にも述べたようにシングルエネルギーCTとデュアルエネルギーCTが同じCNRで

表1 シングルエネルギーCTとデュアルエネルギーCTのCNRの関係(63 keV)

CNR	シングルエネルギー 120 kVp	デュアルエネルギー 63 keV
7.4	61.6 HU	50.2 HU
9.1	71.5 HU	61.6 HU
38.5	243.7 HU	190.7 HU
56.5	349.3 HU	270.6 HU

表2 シングルエネルギーCTとデュアルエネルギーCTのCNRの関係(52 keV)

CNR	シングルエネルギー 120 kVp	デュアルエネルギー 52 keV
7.9	64.5 HU	50.2 HU
11.0	82.5 HU	64.5 HU
42.2	265.0 HU	202.3 HU
56.5	349.3 HU	270.6 HU

あれば低コントラスト分解能に関して同等の画像であるということを前提に検討した。ノイズの要素を重要視すると上記の結果となるが、別の観点から見るとSD値が大きく多少ノイズが多い画像でもCT値が上昇することで診断画像として有用となり得る場合もあると考え、シングルエネルギーCTに対してSD値が50%高くなるVMS52 keVも検討した(表2)。こちらと同様に下2行から最大CT値の減量率を求めると36%、31%となった。上2行から平衡相CT値の減量率を求めるとどちらも19%であった。最大CT値の減量率は変わらないが、平衡相CT値の減量率は約20%となる。したがって造影剤減量が強く求められるときは20%減量も考慮してもよいのではないかと考える。

以上の結果からデュアルエネルギーCTを用いることによる造影剤の減量率は10%程度と考えられるが、ノイズが多くなることが許容されれば20%程度減量できる。また動脈のみの検討なら30%以上の減量も可能であると考えられた。ただし、造影CTすべてをデュアルエネルギーCTで撮像することは難しい。デュアルエネルギーCTの欠点は、第一に被爆線量がシングルエネルギーCTよりも増加することである。750HDのシステムコンソールのプロトコル上の表記では約8%増加する。次にデータ数がシングルエネルギーCTより増えるため画像再構成に時間がかかることで、デュアルエネルギーCTでの撮影が増えれば読影環境にも影響する。さらにはX線管球に負担がかかりその後の撮影で線量に制限が生じるあるいは

ターリングタイムが発生する。したがって、どの症例にデュアルエネルギー CT を用いるかは十分に考慮しなければならない。

お わ り に

デュアルエネルギー CT 撮影による造影 CT 検査でのヨード造影剤減量について検討した。ファントム実験の結果で従来の CT 撮影より造影剤総量で最低でも 12%減量できる結果を得た。今回の測定結果を指標としてより複雑に考えなければならない人体への応用が次の検討テーマである。

文 献

- 1) ERUR 造影剤ガイドライン, 19-25, 2013
- 2) 西 恭兵, 西田暁史, 福井健一郎, 他: 造影 CT 検査における急速静注が即時性副作用および血管外漏出の発生頻度に与える影響について: 1375 例の前向き調査. 日放線技師会誌, 54: 1204-1207, 2007
- 3) KONICA MINOLTA オイパロミン シリンジ 添付文書 2012 年 3 月改訂 (第 17 版)
- 4) Gemstone Spectral Imaging CLINICAL VALUE: A GE Healthcare CT publication · June, 2011
- 5) 上野恵子, 陳 克敏, 劉 愛連, 他: スペクトラル CT 基本原理と臨床応用. 学研メディカル秀潤社, 東京, 54-55, 2013
- 6) 上野恵子, 陳 克敏, 劉 愛連, 他: スペクトラル CT 基本原理と臨床応用. 学研メディカル秀潤社, 東京, 55-56, 2013
- 7) 室賀浩二, 八町 淳: マルチスライス CT における造影技術. INNERVISION, 22 (8) 別冊: 8-10, 2007
- 8) 八町 淳, 寺沢和明, 林 信成: CT 造影技術, メディカルアイ, 東京, 13-16, 2013
- 9) 石風呂実: [CT] 肝臓を MDCT で探る - ダイナミックスタディで得られるボリュームデータの有効利用 -. アールティ, 36: 3-6, 2007
- 10) 市川勝弘, 村松禎久: 標準 X 線 C T 画像計測. オーム社, 東京, 119-125, 2009