

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23591795

研究課題名(和文)高速スイッチング2重エネルギーCTの基礎的検討と臨床応用

研究課題名(英文)Basic Study and Clinical Application of Fat kVp Switching Dual Energy CT

研究代表者

陣崎 雅弘 (Jinzaki, Masahiro)

慶應義塾大学・医学部・准教授

研究者番号：80216259

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円、(間接経費) 1,080,000円

研究成果の概要(和文)：仮想単色X線CT画像はビームハードニングアーチファクトの抑制効果があることを心筋灌流および腎嚢胞において検証した。仮想単色X線CT画像の70keV画像は、腹部CTで120kVpに比べて画質が良好であること、肝転移においても70keVが至適であることを確認し、70keV画像は120kVpを置換し得ることを示した。また、仮想単色CT像は、CT値は実際の単色CTとほぼ同等で、冠動脈石灰化スコアにおいて有効活用できることを示した。しかし、期待されたヨード強調画像での動脈の石灰化病変の狭窄診断能の向上は得られなかった。今後、メーカーと連携しながら、ヨード強調画像の画質向上に向けて検討を続けて行く。

研究成果の概要(英文)：We clarified that virtual monochromatic spectral (VMS) images obtained at 70 keV had fewer beam-hardening artifacts than those obtained at 120 kVp for images obtained during evaluations of cardiac perfusion and renal cysts. We also showed that the 70 keV images provided both image noise reduction and an improved contrast-noise ratio, compared with the 120-kVp images, in abdominal CT evaluations. Thus, VMS imaging has the potential to replace 120-kVp CT as the standard CT imaging modality. We also showed that virtual non-contrast images provided CT attenuation values that were equivalent to a true unenhanced image, and the coronary artery calcium scores derived from water density images paralleled those obtained using 120-kVp unenhanced images. However, the diagnostic performance of iodine/calcium-based materials for decomposition images used to evaluate severely calcified coronary arteries was not as high as expected. We plan to continue evaluating material decomposition imaging.

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：内科系臨床医学・放射線科学

キーワード：2重エネルギーCT 仮想単色X線CT monochromatic image material decomposition 仮想単色CT virtual unenhanced CT pseudoenhancement 冠動脈

## 1. 研究開始当初の背景

CTは、1998年にマルチスライスCTが登場して以来、多列化が進んできたが、数年前に2管球方式の2重エネルギーCTが登場し、昨年末に高速スイッチング方式とrotate-rotate方式も登場し、全てのメーカーの最新機種に2重エネルギーCTが搭載された。2重エネルギーCTの理論上の利点は、ビームハードニングアーチファクトを低減できることである。1970年にHounsfieldらによりCTが開発されたが、CTで通常用いられてきた120kVpのX線は、120kVを最大エネルギーとする様々なエネルギーの含む多波長X線であるため、ビームハードニングアーチファクトが出現し、画質やCT値の測定精度への影響がでることが避けられず、CTの根源的な課題とされてきた。2重エネルギーCTは、異なるエネルギーのCTデータの加重加算をおこなうことで、仮想単色X線CT画像を作ることができる。この計算は、線形性を保ちつつ物質の密度値を弁別していくことを行い、この過程でビームハードニングアーチファクトの影響が取り除かれると共に、物質弁別も行える。物質弁別は、水、ヨード、石灰化など原子番号の異なる物質において行われ、各成分を強調して描出した画像を物質弁別画像と呼ぶ。代表的なものに、ヨードを強調した画像や石灰化を強調した画像などの他、造影CT像からヨードを抜き単純CT様の像を作る仮想単純CT像などがある。すなわち、2重エネルギーCTからは、従来の120kVpの画像に類似した仮想単色X線CT画像と、ヨード強調像や石灰化強調像、仮想単純CT像などの物質弁別画像が作れる。2重エネルギーCTは、2管球方式、rotate-rotate方式、高速スイッチング方式の3つの撮影法があるが、2管球方式は撮影範囲に制限があることや再構成法の補正精度が高くなく、rotate-rotate方式は撮影時間が長く拍動や蠕動などの動きがある部位には適さないため、いずれもその臨床応用は限られたものになっている。一方、2009年に登場した高速スイッチング方式は、短時間撮影が可能で、撮影範囲の制限はなく、再構成の補正精度も高いため、現在最も良好な2重エネルギーCT画像を提供できる。我々は、高速スイッチング方式の2重エネルギーCTで作成した仮想単色X線CT画像は、同一線量で撮影した120kVpと比べて、ビームハードニングアーチファクトが少ない上に、noiseが低く、かつcontrast-to-noise ratio (CNR)が向上することを明らかにした(Jinzaki, Radiology)。すなわち、仮想単色X線CT画像は、120kVpに代わって標準撮影になる可能性を示した。また、物質弁別画像(ヨード強調画像)は、重度石灰化冠動脈病変を伴う献体の心臓に応用すると、ヨード画像は血管造影像とよく一致することも確認した(Yamada, Jinzaki, et al. Cir J)。現在、この機種では心電図同期の2重エネルギーCT

撮影はできないが、心臓CTの課題であった重度石灰化病変の狭窄度診断も将来的に向上する可能性が高いと考えている。仮想単純CT像は、結石や肝病変の検出は十分可能で、造影CTの前に通常撮影される単純CTを省くことによる被曝低減も可能と思われる。以上より、2重エネルギーCTは、マルチスライスCT後の次世代CTとして期待することができる。

## 2. 研究の目的

高速スイッチング方式の2重エネルギーCTが臨床的にどのような有用性をもたらすかを、基礎実験データを示しながら検証し、次世代CTとしての2重エネルギーの有効性を考える。

## 3. 研究の方法

(1) 仮想単色X線CT画像でのビームハードニングアーチファクトの抑制効果の検討

### 基礎的検討

心筋灌流CTにおいて、左室と大動脈の間にBHAによる低吸収域が出現し、虚血領域と誤診することがあり、正しい補正が行われることが期待される。摘出したご遺体の心臓の心腔に造影剤を入れ、近傍に造影像をいれたシリンジを置き大動脈を模した。これを躯幹ファントムにいれ、120kVpと2重エネルギーCTを撮影した。

### 腎嚢胞での検討

31例の腎嚢胞患者(51病変)において腎実質相を120kVpと2重エネルギーCTをランダムに撮影した。2重エネルギーCTから作成した70keVの仮想単色X線画像のpseudoenhancementは120kVpに比べてCTでは低くなった。

(2) 仮想単色X線CT画像におけるnoise、CNRの改善効果の普遍性

90例の肝転移を対象にCNR(contrast noise ratio)やnoiseが仮想単色X線像のどこで最もよくなるかを検討した。

51例の腹部CTで、造影後90秒後に2重エネルギーCTと120kVpの画像を8cmの範囲に局限して連続撮影を行った。両者の撮影間隔は4秒程度で、撮影の順番はランダム化し、被曝線量は同等(12.7mGy)にした。2重エネルギーCTから作成した70keVと120kVpの肝臓、大動脈、筋肉の画質を比較した。実際の患者さんで、通常の120kVpと仮想単色X線CT画像のnoiseを比較する。

(3) 仮想単色X線CT画像での石灰化のサイズ計測精度の基礎的検討

従来のCTでは石灰化は実際より大きく描出され、サイズの予測は困難であった。仮想単色X線CT画像は従来よりはるかに高いエネルギー設定の画像を作ることができるため、石灰化のサイズ計測精度が向上する可能性が高い。サイズのわかっている石灰化角材を

body phantom に入れ 120kVp と 2 重エネルギー CT の撮影を行い、仮想単色 X 線 CT 画像でのサイズの正確性を見た。

#### (4) 物質弁別画像 (ヨード強調画像) の動脈の石灰化病変の狭窄評価

##### 基礎的検討

1.5mm、3mm 径の血管ファントムの内腔に 25%、50%、75% の石灰化狭窄を配置した。内腔を 100HU、200HU、300HU の造影剤で満たし、120kVp と 2 重エネルギー CT のヨード画像の狭窄描出能を比較した。

##### 冠動脈重度石灰化病変の狭窄評価

冠動脈石灰化が疑われる症例 50 例に対し、2 重エネルギー CT を施行した。ヨード画像の最大値投影画像、MPR 像を作成した。

##### 末梢動脈重度石灰化病変の狭窄評価

末梢血管の動脈硬化が疑われる 21 症例に 2 重エネルギー CT を施行した。ヨード画像の最大値投影画像を作成し、血管造影所見と対比した。

#### (5) 物質弁別画像 (仮想単純 CT 像) の画質評価

27 例の冠動脈の 2 重エネルギー CT 画像から作成した仮想単純 CT 像のカルシウムスコアは、120kVp の単純 CT 像のカルシウムスコアとよい相関を呈するかを検討した。

132 例の肝転移が疑われる患者の動脈相、門脈相から仮想単純 CT 像を作った。肝臓、脾臓、大動脈の単純 CT の CT 値は、仮想単純 CT の値とほぼ同等になるかどうかを評価した。

## 4. 研究成果

(1) 仮想単色 X 線 CT 画像でのビームハードニングアーチファクトの抑制効果の検討  
心筋灌流 CT の基礎実験は、120kVp では後壁に低吸収域が見られたが、2 重エネルギー CT では周囲心筋と同等の濃度に描出され、2 重エネルギー CT でのビームハードニングアーチファクトの補正が検証された。この検証は海外に先駆けた内容で、Circ J. 2012;76(7):1799-801. に掲載されている。腎嚢胞の pseudoenhancement は、2 重エネルギー CT から作成した 70keV の仮想単色 X 線画像では 120kVp に比べて小さくなった。同一症例での比較検討はこれまでになく、結果は学会発表し、現在論文投稿中である。いずれも仮想単色 X 線 CT 画像は 120kVp 画像よりビームハードニングアーチファクトの抑制効果があることを検証できた。

#### (2) 仮想単色 X 線 CT 画像における noise、CNR の改善効果の普遍性

肝転移での検討において、およそ 70keV 付近で noise は最小で、CNR は最大になり画質が最もよいことがわかった (図 1、2)。また、noise は body mass index (BMI) が大きくなるにつれ高くなり、CNR も BMI が大きくなるにつれ低くなることがわかった。我々は既に、

動脈モデルでは 70keV 付近が最適であることを明らかにしていたが、腫瘍においても大体 70keV 付近が最適であることを明らかにした。

この結果は、Invest Radiol 2012;47(5):292-8. に掲載されている。腹部 CT 全体での検討では、約 70keV の画像は 120kVp の画像よりいずれの部位でも noise は少なく、SNR も CNR も有意に向上していた。この結果は Eur J Radiol に accept されている。

血管病変、腫瘍など病変によって撮影タイミングは異なるが、いずれにおいても 70keV 付近の画像は 120kVp 画像より画質がよく、120kVp 画像を置換できるものであることを海外に先駆けて示した。

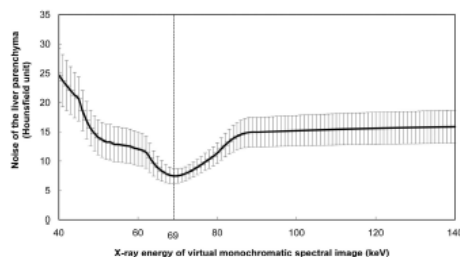


図 1 仮想単色 X 線 CT 画像での肝実質のノイズ 69keV で最もノイズが低い。

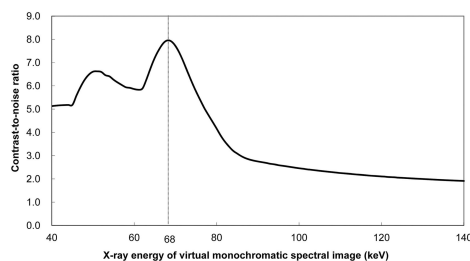


図 2 仮想単色 X 線 CT 画像での肝転移と肝実質の CNR

68keV で最も CNR が高い。

#### (3) 仮想単色 X 線 CT 画像での石灰化のサイズ計測精度の基礎的検討

この検討では、65keV で半値幅が 120kVp と同等になり、それ以上の keV においては 120kVp よりもブルーミングが減少し、70keV も含め 65keV 以上が石灰化評価に推奨できることを示した。

#### (4) 物質弁別画像 (ヨード強調画像) の動脈の石灰化病変の狭窄評価

基礎的検討では、ヨード強調画像では 1.5mm 径ではヨード自体も消去されてしまい、3mm 径では石灰化がヨードと同等濃度の消えの残りが見られ、いずれも内腔評価に妥当な画像を得ることができなかった。臨床での冠動脈石灰化症例での検討でも、石灰化の残存や過剰除去の症例がかなり見られた。更に、画質を向上させる再構成法やソフトを持ち込んだが、著変はなかった。また、末梢動脈重度石灰化症例の検討では、狭窄診断能は、感度 90.8%、特異度 88.4%、正診率 89.0% と比較的

高いが、通常の 120kVp で報告されている診断能と著変はなかった。また、重度石灰化セグメントに限ると感度 55.6%、特異度 85.7%、正診率 68.8%と低い値であった。

従って、現在の 2 重エネルギーCT によるヨード画像は、重度石灰化病変の診断に有効とは言えず、石灰化除去に関し、更なる技術の向上が必要と判断した。

(5) 物質弁別画像 ( 仮想単純 CT 像 ) の画質評価

仮想単純 CT 像のカルシウムスコアは、120kVp の単純 CT 像のカルシウムスコアと非常によい相関 (  $r=0.93$  ) を示した。

肝臓、膵臓、大動脈の単純 CT の CT 値は、仮想単純 CT の値とほぼ同等であることがわかった。大動脈は動脈相から、肝臓や膵臓は門脈相から作成したほうが一致はよかった。仮想単純 CT は、通常の 120kVp の単純 CT を置換可能と思われた。どちらも学会発表をして、現在論文投稿中である。

以上より、仮想単純 CT 像は有効な可能性がある。

総括

仮想単色 X 線 CT 画像はビームハードニングアーチファクトの抑制効果があること、を心筋灌流および腎嚢胞において検証した。仮想単色 X 線 CT 画像の 70keV 画像は、腹部 CT で 120kVp に比べて画質が良好であることを、肝転移においても 70keV が至適であることを確認し、70keV 画像は 120kVp を様々な領域で置換し得ることを検証した。また、仮想単純 CT 像も有効活用できることも示した。また、仮想単純 CT 像は、CT 値は実際の単純 CT とほぼ同等で、冠動脈石灰化スコアにおいて有効活用できることを示した。しかし、期待されたヨード強調画像での動脈の石灰化病変の狭窄診断能の向上は得られなかった。ヨード強調画像での石灰化病変の診断は 120kVp 画像の限界と言われ、2 重エネルギーCT に最も大きな期待が寄せられている課題である。今後、メーカーに我々の撮影したデータを供与し、ヨード強調画像の画質向上に向けて検討を続けて行く。

## 5 . 主な発表論文等

( 研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線 )

[ 雑誌論文 ] ( 計 5 件 )

- (1) Yamada Y, Jinzaki M, Hosokawa T, et al. Abdominal CT: Intra-individual comparison between virtual monochromatic spectral and polychromatic 120-kVp images obtained during the same examination. Eur J Radiol, accepted. ( 査読有 ) 2014 ( in press )
- (2) 陣崎雅弘, 山田祥岳, 栗林幸夫. X 線の発明から今日まで - 2 重エネルギーCT の現状 - . 臨床画像 2013;12:1454-8. ( 査

読無 )

- (3) Yamada Y, Jinzaki M, Tanami Y, et al. Virtual monochromatic spectral imaging for the evaluation of hypovascular hepatic metastases: the optimal monochromatic level with fast kilovoltage switching dual-energy computed tomography. Invest Radiol 2012;47(5): 292-8. ( 査読有 ) doi: 10.1097/RLI.0b013e318240a874
- (4) Yamada M, Jinzaki M, Kuribayashi S, Imanishi N, Funato K, Aiso S. Beam-Hardening Correction for Virtual Monochromatic Imaging of Myocardial Perfusion via Fast-Switching Dual-kVp 64-Slice Computed Tomography. Circ J. 2012;76(7):1799-801. ( 査読有 ) doi: <http://dx.doi.org/10.1253/circj.CJ-12-0463>
- (5) 岡村哲平, 陣崎雅弘, 山田祥岳, 山田 稔, 栗林幸夫. Multislice CT 2012 BOOK 臨床 : Dual energy CT の臨床応用 - fast kVp switching 法を中心に - . 映像情報 Medical 2012;44:116-20. ( 査読無 )

[ 学会発表 ] ( 計 19 件 )

- (1) Yamada Y, Jinzaki M, Sugisawa K, et al. Renal cyst pseudoenhancement: Intra-individual comparison between virtual monochromatic spectral and conventional polychromatic 120-kVp images obtained during the same CT examination. 第 73 回日本医学放射線学会学術集会、横浜 (2014-4-12)
- (2) Tamura K, Jinzaki M, Yamada Y, et al. Assessment of the CT number on abdominal virtual unenhanced image derived from single-source fast kVp-switching dual-energy CT. 第 73 回日本医学放射線学会学術集会、横浜 (2014-4-12)
- (3) Yamada Y, Jinzaki M, Okamura T, et al. Feasibility of calcium scoring from virtual unenhanced images obtained from fast kV-switching dual-energy coronary CT angiography. 8<sup>th</sup> Annual Scientific Meeting of The Society of Cardiovascular Computed Tomography, Montreal, Canada (2013-7-13)
- (4) Okamura T, Jinzaki M, Yamada Y, et al. Feasibility of a Novel Vendor-Specific Motion-Correction Algorithm for Fast kV-Switching Dual-Energy Coronary CT Angiography. 8<sup>th</sup> Annual Scientific Meeting of The Society of Cardiovascular Computed Tomography, Montreal, Canada (2013-7-12)
- (5) Tanami Y, Jinzaki M, Yamada Y, et al. Improvement of Blooming artifact with Calcified Plaque by Using a

Prospective ECG Gated Fast kVp Switching Spectral Scanning and Imaging in X-ray Computed Tomography - A Phantom Study. 6<sup>th</sup> Annual Scientific Meeting of The Society of Cardiovascular Computed Tomography, Denver, USA (2011-7-14)

- (6) Jinzaki M, Tanami Y, Yamada M, et al. Reduction of Beam Hardening artifact in Myocardial Perfusion Using a Prospective ECG Gated Fast kV Switching Spectral Imaging in X-ray Computed Tomography - A Phantom Study-. 6<sup>th</sup> Annual Scientific Meeting of The Society of Cardiovascular Computed Tomography, Denver, USA (2011-7-12)
- (7) Jinzaki M. Potential of Dual Energy CT in Cardiac Imaging. 6<sup>th</sup> Society of Cardiovascular Computed Tomography. Denver, USA (2011-7-12)

〔図書〕(計2件)

- (1) Jinzaki M., Yamada Y, Kuribayashi S. Computed Tomography Multispectral Imaging. In: Saba L (eds). Computed Tomography Imaging. Taylor and Francis, LLC, London, 2013, p557-566.
- (2) 山田 稔, 陣崎雅弘, 山田祥岳, 栗林 幸夫. デュアルエネルギーを Discovery CT 750HD (HDCT) で活かす. 児玉和久 監; 心臓 MDCT の最前線. 産業開発機構株式会社、心臓血管画像 MOOK5 巻、2012、p14-8.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

陣崎 雅弘 (Jinzaki Masahiro)  
慶應義塾大学・医学部・准教授  
研究者番号：80216259

### (2) 研究分担者

今西 宣晶 (Imanishi Nobuaki)  
慶應義塾大学・医学部・准教授  
研究者番号：00184820

### (3) 連携研究者

田波 穰 (Tanami Yutaka)  
慶應義塾大学・医学部・助教  
研究者番号：00306797

山田 稔 (Yamada Minoru)  
慶應義塾大学・医学部・助教  
研究者番号：60365434

栗林 幸夫 (kuribayashi sachio)  
慶應義塾大学・医学部・教授  
研究者番号：40102842