

CT 技術の進化

〜超高精細 CT の技術と臨床応用を徹底解説〜

琉球大学大学院医学研究科 放射線診断治療学講座 友利 由佳理

【要旨】

本総説では、CT技術の進化の中でも特に超高精細 CT (UHRCT) について、その技術的特長と臨床応用を詳述する。2010年代のCTスキャン技術の進化としては、面検出器 CTや dual energy CT (DECT)、低管電圧 CTなどが知られている。その中でも、超高精細 CTは、従来 CTの2倍の空間分解能(最高0.15mm)を実現し、より精細な画像を提供する。この空間分解能の達成にはX線検出器の小型化、極小焦点のX線管、ブレ低減機能を備えた寝台の導入という3つの要素が関与している。これにより、肺疾患の詳細評価、冠動脈ステント内腔の観察、Adamkiewicz動脈などの微細血管の描出向上が報告されている。さらに、中内耳構造の評価や、未破裂動脈瘤の術前評価にも有用性が示されている。一方、画像ノイズの増加やデータ量の膨大化といった課題もあり、適切な画像再構成法やサーバー運用が求められる。今後さらなる技術革新や臨床応用の発展により、超高精細 CTの活用範囲が拡大すると期待される。

【はじめに】

CT(computed tomography)は X 線を利用し体の断層画像を生成する医用画像機器で、1972年に最初の装置が登場してから今日に至るまで進化を続け、今では臨床現場で欠かせない画像診断技術となっている。2010年代の CTスキャン技術の進化としては、面検出器 CT やdual energy CT (DECT)、低管電圧 CT、超高精細 CT などが知られている。

面検出器 CT は 320 列の検出器を搭載しており、体軸方向に 16cm という広範囲を 1 回のスキャン(ボリュームスキャン)で撮像することができるため、高い時間分解能が要求される冠動脈 CT や、体動抑制や息止め困難な患者や乳幼児の撮影に有効である。また、ボリュームスキャンを連続して行うダイナミック・ボリュームスキャンでは、臓器の動きや血流の把握が可能となり、3D-CT(立体画像のみ)に時間軸を追加した 4D-CT を取得することが可能となっている。

DECT は2つのエネルギーデータを用いて 画像を取得するもので、従来 CT と異なり、ヨー ド密度や電子密度、実効原子番号、仮想単色 X 線画像(virtual monochromatic image;VIM) など、これまでにない新たな定量値や情報を提 供する。例えば、DECT で得た造影剤分布マッ プ(ヨードマップ)から肺血流量(lung-PBV) を評価する技術は、急性肺塞栓症や慢性血栓塞 栓性肺高血圧症の診断に有用とされ、広く活用 されている。2021年にドイツのシーメンスへ ルスケアから発売されたフォトンカウンティン グ CT (Photon-counting detector CT: PCD-CT)は、半導体検出器を用いて入射したひとつ ひとつの X 線光子 (Photon) を直接電気信号 に変換する画期的な装置である。1種類の出力 を複数のエネルギー成分に分けて計測すること ができるため、VIM をはじめとした多彩なス ペクトル画像の作成やマルチエナジー解析が可 能である。

低管電圧 CT とは、一般的な管電圧 120kV より低い 80kV や 100kV の管電圧を用いて撮影する技術のことである。すべての装置で管電圧の切り替えが可能であり、特別な装置は必要としない。低管電圧での造影 CT では、ヨードが光電吸収の影響で CT 値が上昇するため、造影剤量の低減が可能となる。一方で、低管電圧では X 線量子数が減少しうるため、従来 CT と画像ノイズを一定にしようとすると、管電流量が増加する。そのため体格によっては管電流の制限により画質に影響が生じることがある。

超高精細 CT とは、従来 CT より細かい描出 を可能とした技術である。本稿では、超高精細 CT について参考画像を用いながら詳しく概説 する。

【超高精細 CT とは】

超高精細 CT(Aquilion Precision;キャノンメディカルシステムズ)は、従来困難であった微細な構造の描出を目的として開発された CT 装置である。CT の空間分解能は 30 年以上前に 0.35mm に到達していた $^{1)}$ が、それ以後大きく変化していなかった。2017 年に臨床導入された超高精細 CT は、空間分解能は 0.15mm を達成し 2 、従来 CT と比較し**部分体積効果*** 1 の少ない精細画像を提供する。

超高精細 CT の空間分解能には、以下の3つ の要素が関与している。最も特徴的なのはX 線検出器の小型化で、Z方向のスライス幅は 0.25mm と従来型 CT の半分、XY 方向には従 来 CT の 2 倍となる 1792ch の素子を配列する ことで、データサンプリング数を増加させるこ とに成功した。実臨床においてはスキャンモー ドとして、通常 (Normal resolution (NR); 0.5mm × 896ch)、高精細 (High resolution (HR) R,0.5mm × 1792ch)、超高精細 (SHR,0.25mm × 1792ch) が選択でき、部位や検査目的にお いて使い分けている。ただし、検出器の素子を 小さくしても、X線管システムの焦点サイズが 大きければ、高精細な画像を得るのは難しい。 そこで、X線管システムは従来CTの1/3以 下となる 0.4 × 0.5 mm の極小焦点を使用して

いる。スキャン時の振動によるブレを従来の約 1/2 に低減する寝台も導入され、これもまた高 精細化に寄与している。

この優れた空間分解能を最大限に活用するため、従来 CT の再構成マトリクス *2 が 512 であるのに対し、超高精細 CT では 1024 マトリクスや 2048 マトリクスの画像再構成が可能である 3 。上記の技術を組み合わせることで最高空間分解能 0.15mm を可能とし、面内・体軸方向とも従来型 CT の 2 倍の空間分解能を実現した 2 。一方で画像ノイズが増大することが課題であったが、再構成法の進化 *3 によりノイズを低減することが可能となった。また、データ量が従来の $4 \sim 8$ 倍となり、適切なサーバー運用が必要である。

このような特徴から、従来型 CT では描出が 難しかった Adamkiewicz 動脈のような細い血管 や、評価が困難とされてきた内径 3mm 以下の冠 動脈ステント内腔狭窄、肺疾患、側頭骨の評価 などで有用性が複数報告されている^{4)~9)}。琉球 大学病院では 2017 年から超高精細 CT が臨床 で利用されており、以下では従来 CT と超高精 細 CT の画像を比較しつつ、その有用性や画質 向上について紹介する。なお提示画像で用いら れる従来 CT 画像は Aquilion ONE、Canon 社 製、0.5mm × 896ch、512 マトリクス再構成で あり、超高精細 CT 画像は Aquilion Precision、 Canon 社製、0.25mm × 1702ch、1024 マトリ クス再構成で、図4のファントム撮影画像以外 は、同一患者で経過観察のため別日に撮影され た画像である。

1. 胸部 CT(肺サルコイドーシス症例)

従来 CT と比較し、超高精細 CT は肺野領域における血管や気管支などの既存構造や微細な病変の描出、境界面の描出に優れている²⁾。末梢気管支に対する自動気道セグメンテーションでは、従来 CT と比較し有意に多くの末梢気管支がセグメント化され⁹⁾、細気管支径の定量的測定においても、従来 CT で比較するより細径の細気管支を正確に測定できたと報告されている⁷⁾。

提示画像では、従来CTと比較し、超高精細CTでは粒状影の輪郭がより明瞭で、描出される粒も数も多いことがわかる(Fig.1A,B)。

2. 中内耳 CT

従来 CT と比較し、超高精細 CT では中内耳の微小病変や微小構造の視認性が向上している。また、中内耳 CT は左右別表示のため再構成 FOV を小さく設定するので、体幹部 CT とは異なり、1024 マトリクスや 2048 マトリクスではなく従来の 512 マトリクスでも十分に高画質を実感できる。特に、耳小骨連鎖再建術において最も重視されるアブミ骨の視認性向上が報告されており、従来 CT では描出されなかった構造物(鼓索神経、アブミ骨筋腱など)も超高精細 CT で評価可能となっている 10,111。

提示画像では、従来CTと比較し、超高精細CTではツチキヌタ関節の描出が明瞭であることがわかる(Fig.2A,B)。

3. 頭頸部の CT angiography

従来CTと比較し、超高精細CTでは頭蓋内細動脈の描出に関する有用性が複数報告されている「^{12),13)}。実臨床では、未破裂動脈瘤の術前精査や術後確認に有用であり、血管撮影を省略することも可能となってきている。また、脳動静脈奇形や硬膜動静脈瘻の精査においても、血管造影と同等の画像を得られるようになり、診断や術前計画に役立っている。ただし、超高精細CTは1回転で4cmの範囲での撮影となるためへリカルスキャンが基本であり、前述の面検出器のようなダイナミック・ボリュームスキャンはできないため、検査目的に応じたCT装置の使い分けが必要である。

提出画像では、従来CTと比較し、超高精細CTでは右外側線条体動脈の描出が良好であることがわかる(Fig.3A,B)。また、脳血管ファントムの撮影のCTAによる比較でも、従来CTと比較し、超高精細CTでは中大脳動脈や前大脳動脈の末梢枝が良好に描出されていることがわかる(Fig.4A,B)。

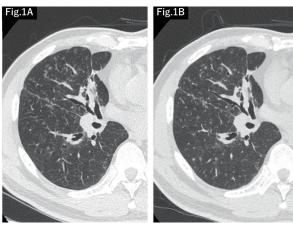


図1 サルコイドーシス患者の胸部 CT 従来 CT (A) と比較し、超高精細 CT (B) では粒状影の輪郭 がより明瞭で、描出される粒も数も多い。

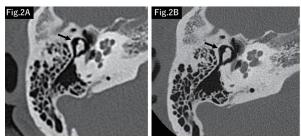


図2 健常側の中内耳 CT 従来 CT(A)と比較し、超高精細 CT(B)ではツチキヌタ関 節の描出が明瞭である。

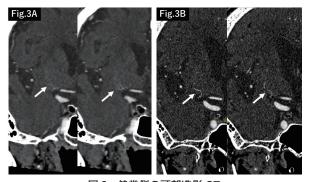


図3 健常側の頭部造影 CT 従来 CT(A)と比較し、超高精細 CT(B)では右外側線条体 動脈の描出が良好である。

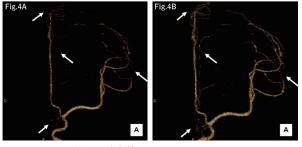


図4 脳血管ファントムの CTA 従来 CT(A)と比較し、超高精細 CT(B)では右中大脳動脈 や前大脳動脈の末梢枝が良好に描出されている。



【おわりに】

2010 年代の CT スキャン技術の進化と、その中のひとつである超高精細 CT について、概略および有用性について詳しく解説した。超高精細 CT は、従来 CT の 2 倍の空間分解能を有し、微細な解剖構造や病変の評価に大きな利点をもたらしている。一方で、画像ノイズの増加やデーター量の増加といった課題もあり、適切な画像再構成法の選択やサーバー運用が求められる。今後、さらなる技術革新や臨床応用の発展により、超高精細 CT の活用範囲がさらに広がることが期待される。

【もっと詳しく】

※ 1 部分体積効果

普段目にする CT 画像は、後述の「再構成」によって、投影データをボクセル(ピクセル(最小画素)×スライス厚)の集合体に変換したものである。そのボクセルに含まれる組織の平均吸収値を CT 値と呼ぶ。CT 値は物質のX線吸収差を数値化したものであり、単位はHounsfield unit(HU)で表す。1つのボクセル内に複数の異なる CT 値の物質が混在しているとき、CT 値はその平均値となる効果を部分体積効果と呼ぶ。

※2 再構成マトリクス

再構成画像を作成する際、画像を何×何のマトリクス(解像度)で表示するか指定する必要があり、これを再構成マトリクスと呼ぶ。一般的に512マトリクスが用いられ、この場合画像は512×512ピクセルで構成された断層画像が得られる。一般的に、1024などマトリクスを大きくすると画像の解像度は向上し部分体積効果は減少するが、ノイズが大きくなりざらついた画像になる。一方、マトリクスを小さくするとノイズは少なくなるが、解像度は低下し部分体積効果が大きくなる。

※3 再構成法の進化

CT スキャンで初めに得られるデータは「投影 データ」と呼ばれ、対象物を通過した X 線の減 衰量と、どの角度から対象物を通過したのかを 整理したものである。この投影データを断層画 像に変換するプロセスを「画像再構成」と呼ぶ。

これまで広く用いられていた CT 画像再構成法は、フィルタ逆投影法(filtered back projection; FBP)といい、投影データを逆投影することで断層画像を再構成する。ボケが生じないようにフィルタ処理をしてから逆投影することが、名前の由来である。FBPには画像ノイズを低減するアルゴリズムが組み込まれておらず、これを解決するため、FBPのアルゴリズムにノイズ低減処理を組み込んだ逐次近似応用再構成法(hybrid iterative reconstruction; hybrid IR)が開発された。これは FBP の上位互換であり、現時点でほとんどの CT メーカーが標準搭載している。

逐次近似再構成法(iterative reconstruction; IR) は、名前は似ているが、前述の hybrid IR とは大きく異なるアルゴリズムを採用してい る。IR は逆投影と順投影を反復し、徐々に正 しい再構成画像に近づけていく再構成法で、撮 影で得た元の投影データと計算上の投影データ の差分(再構成誤差)をフィードバックし、投 影データの更新を繰り返すことで、対象物を正 確に再構成した断層画像が得られる。画像再構 成のたびに反復的な最適化処理を要することか ら、一般的に再構成時間が長い。また、IR に はノイズ低減のアルゴリズムが組み込まれてお らず、投影データ内のノイズまで忠実に描出し てしまうというデメリットがある。この問題を 解決するため、投影データを更新する処理にノ イズ除去を追加したり、CT 装置の X 線焦点サ イズや検出器の画素サイズなど装置特有のパラ メーターをモデル化し実装した IR 法をモデル ベース IR 法 (model based IR; MBIR) と呼ぶ。 現在販売されている CT 装置に搭載されている IRはこれに相当する。

2010年代には、さらなる画質改善を目的とした再構成法として、深層畳み込みニューラルネットワーク(deep convolutional neural network;DCNN)を用いた深層学習応用再構成法(deep learning based reconstruction;DLR)が開発さ

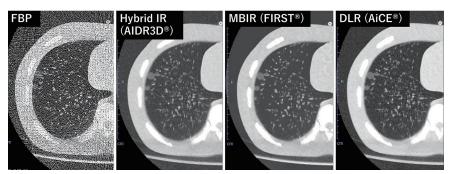


図 5 胸部ファントムの CT 通常の FBP に比べ、hybrid IR や MBIR、DLR での再構成画像の方がノイズの少ない画像となっていることがわかる。

れた。DCNN は多数の画像フィルタをニューラルネットワークのように接続した構造をとり、入力画像と教師画像の誤差をフィードバックしながら DCNN パラメーターを調整することで、入力画像の画質を向上させる。DCNN の学習は事前に行い、再構成時には反復的な処理を要さないことから、IR より高速な再構成が可能である。

上記で説明した4種類の再構成法による画質の違いを図5に示す。通常のCT線量では違いがわかりにくいため、低線量撮影(80 kv/10 mA、1240 mAs、CTDIvol 0.1mGy、DLP 3.6 mGy・cm)での画像を示す。画像は胸部ファントムに模擬肺すりガラス結節を末梢側に設置したもので、通常のFBPに比べ、hybrid IRやMBIR、DLRでの再構成画像の方がノイズの少ない画像となっていることがわかる。

【参考文献】

- Yanagawa M, Tomiyama N, Honda O, Kikuyama A, Sumikawa H, Inoue A, Tobino K, Koyama M, Kudo M: Multidetector CT of the lung: image quality with garnetbased detectors, Radiology 255 (2010) 944-954.
- 2) Yanagawa M, Hata A, Honda O, Kikuchi N, Miyata T, Uranishi A, Tsukagoshi S, Tomiyama N: Subjective and objective comparisons of image quality between ultrahigh-resolution CT and conventional area detector CT in phantoms and cadaveric human lungs, European Radiology (2018) 28:5060-5068.
- 3) Hata A, Yanagawa M, Honda O, Kikuchi N, Miyata T, Tsukagoshi S, Uranishi A, Tomiyama N: Effect of matrix size on the image quality of ultra-high-resolution CT of the lung: comparison of 512 × 512, 1024 × 1024, and 2048 × 2048, Acad. Radiol. 25 (2018) 869-876.
- 4) Yoshioka K, Tanaka R, Takagi H, Ueyama Y, Kikuchi K, Chiba T, Arakita K, Schuijf J D, Saito Y: Ultrahigh-resolution CT angiography of the artery of Adamkiewicz: a feasibility study, Neuroradiology 60 (2018) 109-115.

- 5) Onishi H, Hori M, Ota T, Nakamoto A, Osuga K, Tatsumi M, Fukui H, Tsukagoshi S, Uranishi A, Saito Y, Taniguchi A, Enchi Y, Sato K, Tomiyama N: Phantom study of in-stent restenosis at high-spatial-resolution CT, Radiology 289 (2018) 255-260.
- 6) Tsubamoto M, Hata A, Yanagawa M, Honda O, Miyata T, Yoshida Y, Nakayama A, Kikuchi N, Uranishi A, Tsukagoshi S, Watanabe Y, Tomiyama N: Ultra high-resolution computed tomography with 1024-matrix: Comparison with 512-matrix for the evaluation of pulmonary nodules, Eur J Radiol 2020 Jul. https://www.ejradiology.com/article/S0720-048X (20) 30222-9/fulltext
- 7) Tanabe N, Oguma T, Sato S, Kubo T, Kozawa S, Shima H, Koizumi K, Sato A, Muro S, Togashi K, Hirai T: Quantitative measurement of airway dimensions using ultra-high-resolution computed tomography, Respir investig 56 (2018) 489-496.
- 8) Iwasawa T, Sato M, Yamaya T, Sato Y, Uchida Y, Kitamura H, Hagiwara E, Komatsu S, Utsunomiya D, Ogura T: Ultra-high-resolution computed tomography can demonstrate alveolar collapse in novel coronavirus (COVID-19) pneumonia, JPN J Radiol. 38 (2020) 394-398.
- Morita Y, Yamashiro T, Tsuchiya N, Tsubakimoto M, Murayama S: Automatic bronchial segmentation on ultra-HRCT scans: advantage of the 1024-matrix size with 0.25-mm slice thickness reconstruction, JPN J Radiol. 38 (2020) 953-939.
- 10) Yamashita K, Hiwatashi A, Togao O, Kikuchi K, Matsumoto N, Momosaka D, Nakatake H, Sakai Y, Honda H: Ultrahigh-resolution CT scan of the temporal bone, Eur Arch Otorhinolaryngol. 275 (2018) 2797-2803
- Akazawa Y, Ganaha A, Higa T, Kondo S, Oyakawa Y, Hirakawa H, Suzuki M, Yamashiro T: Measurement of stapes footplate thickness in otosclerosis by ultra-highresolution computed tomography, Acta Otolaryngol. 140 (2020) 899-903.
- 12) Murayama K, Suzuki S, Nagata H, Oda J, Nakahara I, Katada K, Fujii K, Toyama H: Visualization of Lenticulostriate Arteries on CT Angiography Using Ultra-High-Resolution CT Compared with Conventional-Detector CT, AJNR Am J Neuroradiol. 41 (2020) 219-223
- 13) Nagata H, Murayama K, Suzuki S, Watanabe A, Hayakawa M, Saito Y, Katada K, Toyama H: Initial clinical experience of a prototype ultra-high-resolution CT for assessment of small intracranial arteries, Jpn J Radiol. 37 (2019) 283-291.



問題

- 問1. 超高精細 CT は、従来の CT と比べて部 分体積効果が少なく、より精細な画像 を提供する。
- 問 2. 超高精細 CT の空間分解能向上には、X 線検出器の小型化、X線管焦点の小型化、 ブレ低減機能を有する寝台が関与して いる。
- 問 3. 超高精細 CT では、1024 マトリクスや 2048 マトリクスでの画像再構成が可能 である。
- 問 4. 超高精細 CT の導入により、Adamkiewicz 動脈や 3mm 以下の冠動脈ステント内腔 狭窄などの描出が向上したと報告され ている。
- 問 5. 超高精細 CT の空間分解能は、従来 CT の約 3 倍に向上し、最高 0.10mm を達成している。



1 月号(Vol.61) の正解

甲状腺疾患と妊娠 〜甲状腺から少子化問題へのアプローチ〜 問題

- 問 1. hCG が高値だと、甲状腺機能亢進症になりやすい。
- 問 2. 妊娠中に甲状腺機能低下症を認めた場合、まず経過観察する。
- 問 3. 妊娠初期のバセドウ病の治療には、チ アマゾール (MMI、メルカゾール) を 用いる。
- 問 4. 授乳中は抗甲状腺薬を用いず、ヨード 内服療法を行う。
- 問 5. 出産後は免疫抑制状態からの解除で、無 痛性甲状腺炎などを起こしやすい。

正解 1.O 2.× 3.× 4.× 5.O

