

従来の約5倍の解像度を持つ 極超高解像度 X 線 CT 装置の開発

市川 勝弘^{*1}
Ichikawa Katsuhiro

多田 薫^{*1,2}
Tada Kaoru

1. はじめに

現在、X 線 CT（以下、CT）は医療画像診断において重要な役割を担っており、同じように高い空間分解能で人体内部の3次元情報を取得できる磁気共鳴画像(MRI)と共に欠くことのできないモダリティである。そして、0.5 mm 程度の高空間分解能と、全身を数秒でスキャンできる高速性はMRIを確実に凌いでおり、救急医療を含め活躍の場は非常に多い。

臨床で一般的に用いられるCT装置は、高分解能を意識した撮像条件を用いたとしても空間分解能は実質0.5 mm 程度であり、0.1~0.2 mm とされる骨の微細構造¹⁾、すなわち骨梁や、肺の小葉間隔壁を描出する能力は持たない。近年、0.2 mm の検出器素子サイズを有するフォトンカウンティング検出器のCT装置が登場したが、まず、素子サイズは微小とは言えず、また全身用であるがゆえにその構造的制限から自ずと空間分解能は制限され、空間分解能は素子サイズより大きく(> 0.25 mm)ならざるを得ない。筆者らの研究グループは、CT装置に含まれるX線発生器、検出器、回転機構等の様々な組合せ効果の検討を重ね、四肢骨梁を明瞭に描出できるレベルまで最適化し、ボクセル(3次元データの構成単位)サイズを $0.08 \times 0.08 \times 0.08 \text{ mm}^3$ まで極小化した極超高解像度CT装置の開発に成功した。現在この装置は、人体の手、肘、足、膝等に適用できる構成となっており、臨床試験に向けて準備を進めている。

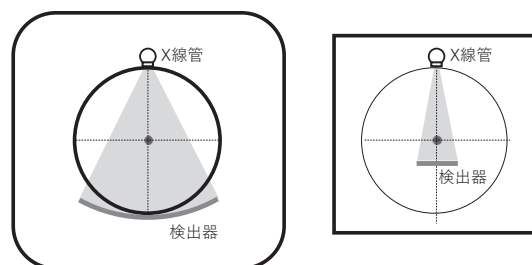


図1 (左) 汎用CTと(右)極超高解像度CTの幾何学的配置

2. 汎用CTの空間分解能

図1に、汎用CT装置と開発した極超高解像度CT装置の幾何学的配置の比較を示す。単に小型化しただけのような構成変更に見えるが、随所にX線画像形成理論に基づくCT装置技術の工夫が施されている。まずは図1の左図の汎用CTの空間分解能について簡単に解説する。

CTの空間分解能は、装置構成に基づく幾何学的要因やX線画像形成条件により決定される。まず、X線発生ポイントであるX線焦点(X線管の中の陽極の中の点状範囲)のサイズはより小さいことが望まれるが、小さくすると必要とするX線量が得られなくなることから、0.5 mm 程度が最小サイズとなり、その場合には撮像対象が限られ、特に外径が300 mm以上となるような腹部や骨盤部等への適用は困難である²⁾。よって、通常のX線量では1.0 mm 程度が選択され、空間分解能の主な阻害要因の1つとなる。また、X線検出器の素子サイズは、前述したX線焦点サイズの制限から微小化する必要性は無く、データ量と転送速度等も考慮して0.5 mm 程度とならざ

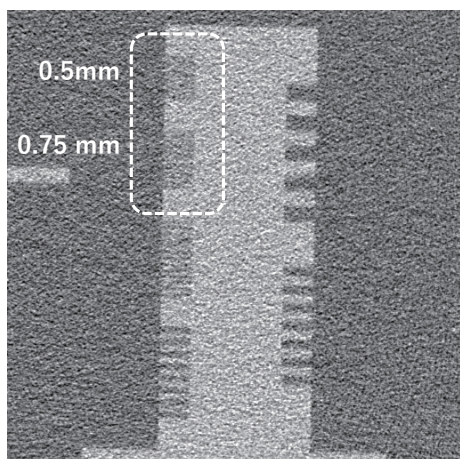


図2 0.25 mm 検出器の汎用 CT による空間分解能測定用ファントムの画像

るを得ない。つまり、全身を検査対象とする汎用 CT の空間分解能は諸要因によって制限され、通常は 0.5 mm の空間分解能を得るのも困難である。最近登場した、0.2 mm の素子サイズとなるフォトンカウンティング CT 装置では、1/2 以下となった素子サイズにより空間分解能は向上するが、焦点サイズを小さくすることができず、先に述べた 0.1 mm の微細構造の描出には不十分である。図2は、フォトンカウンティング CT の登場前に臨床利用可能となった 0.25 mm の検出器素子サイズの汎用 CT 装置を用いて、腹部撮影条件を模擬して撮影した空間分解能測定用ファントムの画像例である。破線で囲った領域のバーサイズは 0.5 mm と 0.75 mm であるが、画像ノイズに阻害され複数あるバーの識別は困難である。このように、素子サイズが従来の 1/2 程度となったとしても、腹部等の比較的大きな被写体では X 線量子ノイズの影響により高い空間分解能を得るのは困難である²⁾。

3. 実験用マイクロ CT 装置及び整形外科用コーンビーム CT

CT の高空間分解能化では、小動物等の実験用に提供されるマイクロ CT 装置や高空間分解能を銘打っている整形外科用コーンビーム CT が論議される。

小動物用のマイクロ CT 装置の空間分解能は非常に高く、0.05 mm 程度にまで及ぶ。これを、人体手部に活用する研究事例³⁾はあるが、撮影時間は約 2 分と非常に長く、約 10 mm のごく狭い範囲の撮影



図3 開発した極超高解像度 CT 装置の外観

であることから臨床利用は困難である。また、整形外科用コーンビーム CT 装置の空間分解能は、装置構成の制限から 0.3~0.5 mm 程度であり⁴⁻⁶⁾、骨梁等の描出には耐えない。また、四肢用に限定した装置開発の研究はあるが、ファントムを回転させる実験機の段階で留まり⁷⁾、筆者らのような実開発には至っていない。

4. 極超高解像度 CT の空間分解能

開発した極超高解像度 CT 装置は、図1の右図のように検出器が回転中心すなわち被写体位置に近くになっており、そのために 20 cm 以下に撮像範囲は限られるものの、手や足等に対象を限ればその範囲は十分である。そして、低出力だが小型の X 線装置、0.099 mm の微小検出器素子からなる高解像度 X 線検出器、それらを配置したガントリ（架台）を 0.1 mm 以下の高い中心精度で回転するモータドライブの回転機構について、各部の構成や位置関係を幾度となく変更しながら最適化した。加えて極超高解像度を実現する専用の再構成アルゴリズムを開発することで、ボクセルサイズを $0.08 \times 0.08 \times 0.08 \text{ mm}^3$ と極小化し、実質的解像度を 0.1 mm（従来の 5 倍）とした⁶⁾。

開発した極超高解像度 CT 装置は図3のような外観になっており、幅と高さは 120 cm、奥行きは 50 cm 程度である。撮影時間 6.5 秒の短時間撮影で、最大で $122 \text{ mm} \times 122 \text{ mm}$ （スライス面） $\times 51 \text{ mm}$ （軸方向）の範囲を画像化でき、撮像時間を 10 秒程度に延長すれば、軸方向は 90 mm 程度に拡幅できる。

5. 極超高解像度の CT 画像

図4は、人体の乾燥骨を封入した足ファントムの極超高解像度CTと汎用CTの画像比較である。5倍の解像度の違いは明白であり、まさに“見えなかったものが見える”という領域に達する。

図5は、倫理委員会の承認のもと撮影した健常ボランティアの手部の断面画像であり、骨梁一つ一つが、明瞭に描出されている。また、左側の横断面だけでなく右側の前額面（手のひらに平行な面）画像でも同様に明瞭であることから、3次元的に極超高解像度であることが分かる。

図6は、このCT画像セットから再構築した極めて写実性の高い3次元画像である。本研究グループでは、極超高解像度のCT画像データを効率的に読影するための革新的画像化技術を同時に開発しており、この画像のように生体からあたかも標本を取り出したかのような画像を生成することも可能である。3次元画像化すると細部の描出が犠牲になることがこれまでの常識であったが、この画像化手法では、右側の裁断画像から分かるように、骨梁がCT画像と遜色なく描出されており、この観察手法を併用することで微細骨構造の診断効率が飛躍的に向上することが期待される。

6. X線被ばく

本装置のX線被ばくの実測値は、0.024 mSvであり、国際放射線防護委員会の勧告（ICRP Publication 103）におけるボランティアの被ばくの最低基準（0.1 mSv）よりも少ない。無用な頻回撮影は慎むべきであるが、人体への影響はごくわずかと考える。

7. 本装置の臨床応用

健常ボランティアの画像は、共同研究の整形外科医師だけでなく多くの整形外科医師に驚きをもって迎えられ、開発した3次元画像化技術とあわせて非常に高い評価を得ている。研究グループは臨床試験に向けて準備を進めており、様々な症例における本装置の効果を試験する機会を待っている。本装置の臨床応用によって、手、足、肘、膝において、骨の微細構造を詳細に観察することが可能となり、傷病

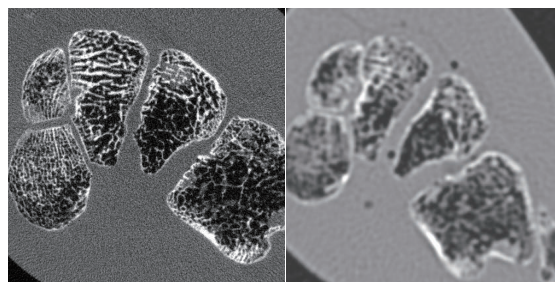


図4 足ファントムのCT画像

（左）開発した極超高解像度CT装置、（右）汎用CT装置

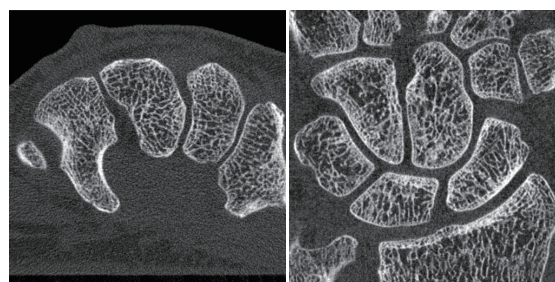


図5 健常ボランティアの手部のCT画像

（左）横断面、（右）冠状断面

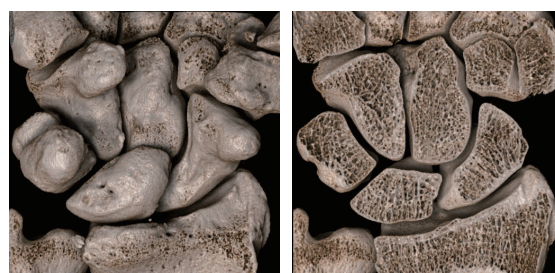


図6 図5のCT画像から再構成した写実的3次元画像

（左）正面から観察、（右）冠状断面で裁断した画像

の診断や治療効果判定等において革新的効果がもたらされることを期待する。

参考文献

- 1) Chiba K., et al., *Osteoarthritis Cartilage*, **19**(2), 180-185 (2011)
- 2) Kawashima H., et al., *Med. Phys.*, **47**(2), 488-497 (2020)
- 3) Chiba K., et al., *Bone*, **66**, 140-145 (2014)
- 4) Neubauer J., et al. *Invest. Radiol.* **49**(7)491-497 (2014)
- 5) John Carrino, Eric Bogner, Cone beam CT : A technical explanation of image quality characteristics, White paper of CurveBeam AI (2024) Accessed on July 18, 2025
- 6) Tani W., et al., *Skeletal Radiol.*, **55**(6), 1385-1392 (2026)
- 7) Cao Q., et al., *Med. Phys.*, **45**(1), 114-130 (2018)

（*1 金沢大学医薬保健研究域保健学系、*2 金沢大学附属病院整形外科）