

File No. 73

岐阜大学医学部附属病院放射線部

三好利治

はじめに

「本当に使いやすい製品、何がありますか？」と伺われた時に、私が一番最初に思いついたのは当院のCT装置であった。当院では、今回紹介するGE HealthCare社製CT装置のRevolution Apex Eliteが本邦1号機として2023年7月より臨床稼働している(図1)。使用感がよく納得した画質を得ることができるCT装置として当院の診療放射線技師・放射線科診断医師に高い評価を受けている。この装置はGE HealthCare社の最新鋭CT装置であるため、今まで蓄積された現場の意見を反映し、従来機能のブラッシュアップに加え、新世代の多くの機能を有している。今回は、これらの洗練された機能について、特に気に入っている部分を紹介させていただく。

Revolution シリーズ

GE HealthCare社のRevolution Apexシリーズ及びRevolution CTは体軸方向0.625mm×256列、16cmになるWide Coverage Gemstone検出器を備えたDual Energy CT装置である。Dual Energy画像を作成するための被写体透過情報の収集方式は、1回転に4,000回もX線エネルギーを変化させる超高速スイッチングを行う、Fast kV Switching方式であるため、複雑な腹部での多相ダイナミック造影CTもDual Energy撮像で問題なくこなすことができる。現行、多くのメーカーから臨床に導入されているDual Energy CT装置という括りの中では、TOPを争う部類の高い能力を有するCT装置である。当院においても、Revolution Apexを数年使用してきたが、その汎用性の高さと、使用感の良さ、納得した画質を得ることができる能力に惹かれて、放射線治療計画専用CT装置としてRevolution CTを、64列の診断CT装置の更新時にはRevolution Apex Eliteの導入に至った。現在は当院で3台のRevolution CTが稼働している。

新時代の検査技術と 運用効率を目指して 「GE HealthCare社製 Revolution Apex Elite」



図1 装置外観

Dual Energy 撮像技術

GE HealthCare社のDual Energy CT装置は、Revolution Apex Eliteを頂点に多くの機種が存在するが、このDual Energy撮像技術で得られる画像をGE HealthCare社ではGemstone Spectral Imaging (GSI) と呼んでいる。このGSIを得るための多岐にわたる撮像技術をすべて投入しているのが、Revolution Apexシリーズである。このGSI撮像技術の中核を成しているのが、GE HealthCare社が独自開発した検出器と、X線管球である。独自開発した検出器とは、先程来述べているGemstone検出器のことである。一方、元となるX線を出力するX線管球は、Fast kV Switching方式によるDual Energy撮像を可能にするため、「Quantix Tube」(図2)と呼ばれる高性能管球が搭載されている。ガントリー1回転0.5秒間に4,000回もX線エネルギーを変化させる必要があり、従来のフィラメント方式の陰極ではなく、Flat Emitter方式の陰極を採用している。このFlat Emitter方式の陰極は、最大1600mA出力可能な大容量Generatorで作成された。2種類の印加電圧の高速切り替えを受け入れることが出来るだけでなく、実効焦点サイズの縮小化、方向依存性の少ない実効焦点の形成、kV Switching精度の向上を可能にしている。それに加え陰極とターゲットの間に設置された高効率のMagnetic Fieldにより、ターゲットに向かう電子群を効率よく収束させ、半影による画像のボケを抑える

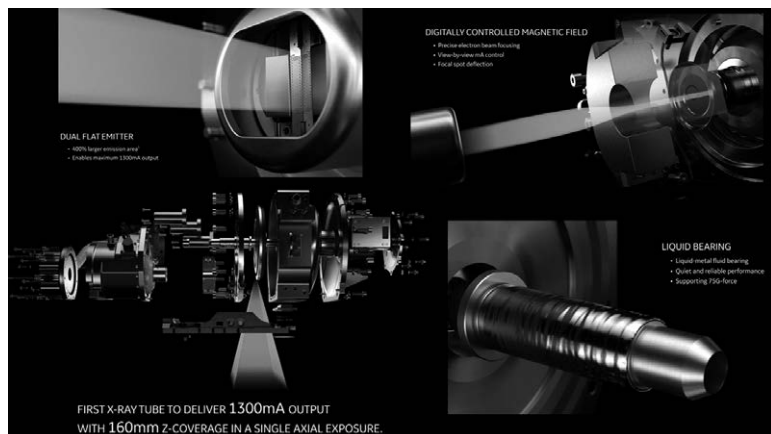


図2 Quantix Tube

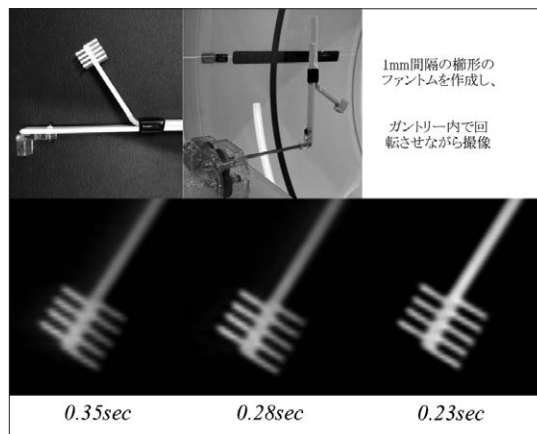


図3 動いているものに対する撮像精度

ことも可能にしている。これほどの大容量かつ、精度の高い熱電子制御を行うとなると、管球熱容量の問題が気になるところではあるが、陽極軸に液体ベアリングを採用したり、熱交換器の効率を高めたりしたことにより、現場で使用する私たちは「冷えすぎるX線管球」と言っても過言ではないレベルで、熱問題を感じていない。また、この最新式の「Quantix Tube」を搭載することにより、GSI撮像の精度が上がり、旧管球と同等の撮像条件を設定しても15%程の被ばく低減かつ、GSIの画質が向上するという研究結果も得られている¹⁾。このように、GSIの画質の向上や、現場の診療放射線技師がストレスを感じない使用感もあって、当院ではRevolution Apex及びRevolution Apex Eliteでの検査において、体幹部の造影CT検査は、全てGSIで行っている。

Revolution Apex Eliteでの心臓

前項にて、Dual Energy撮像技術の話をしていただいたが、Revolution Apexシリーズ及びRevolution CTは体軸方向16cmになるWide Coverage CTでもある。

この、16cm Wide Coverageは、多くの診療放射線技師が周知のように、脳CT検査、心臓CT検査を1回転で撮像可能としている。この1回転撮像で行える心臓CT検査に、Revolution Apex Eliteの最大の特徴が生かされている。その特徴は、ガントリーの回転速度が、現行のCT装置最速の1回転0.23秒の速度が出せることである。いうまでもなく、絶えず動いている心臓に対応するための心電同期撮像で、この高速撮像は大きな効果を得ることができる。従来のRevolution CTも、静音性が高く高速回転可能なリアドライブ方式を採用しており、0.28秒の回転速度であった。これでも十分心電同期撮像が可能であったが、0.23秒台まで高速になることで、動いている物に対する撮像精度や、患者さんの心拍数に対応する幅が大きく変化した。たったの0.05秒の差しかないが、こ

表1 Auto Gating Configuration

← 平均心拍数 →

		Average Heart Rate (BPM)					
		30	40	50	60	70	80
↑	Normal	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase
	Variable	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase
	Irregular	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase
↓	Normal	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase
	Variable	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase
	Irregular	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase	Center Axis 0.23 sec 140% 100% SSP MDV 1.5 Center Phase

の領域では大きな影響を与えた速度である(図3)。

Revolution Apexシリーズで採用されている最新のUser Interfaceでは心電同期撮像の簡略化が大きく進み、誰でも正確な心臓CT検査が可能になってきている。心電同期撮像前に息止めの練習をする際に、心電情報を収集し、その平均心拍数と、心拍の変動率を自動的に認識し、最適な撮像手法を装置が選択してくれる「Auto Gating」という機能がある。その選択される撮像手法は、事前に「Auto Gating Configuration」(表1)にて設定しておくことで、施設の心拍に対する考え方の撮像手法に合わせたセッティングが可能である。実際に心電同期撮像を行う際、診療放射線技師は撮像条件に悩むことがなく、「Auto Gating」が働き、装置が自動でプロトコルを選択してくれる仕組みである。撮像後も、指定した心位相範囲において自動的にMotion解析を行い、全体で最もMotion Artifactが少ない心位相を最適静止位相として画像再構成を行ってくれる「Smart Phase」という機能がある。「Smart Phase」は、Backgroundで自動に処理されるため、次の検査を行っている間に、最適静止位相の画像が出来上がってくる仕組みとなっている。これに加えてGE HealthCare社の画像解析用Work Stationである「Advantage Workstation」に搭載された、「SanpShot Freeze2.0」が最後のブレ補正を行ってくれる。最適

静止位相であっても、Motion Artifactが発生してしまうケースは多々あると思うが、この「SanpShot Freeze2.0」は心臓全体のベクトル動態解析を行なうことで、Motion Artifactの原因となる要素を検出、補正し、Motion Artifactが抑制された画像にしてくれる。こちら、CT装置から自動転送された処理用の画像をWork StationがBackgroundで自動に処理するため、他の仕事をしている間に、Motion Artifactが抑制された綺麗な画像が作成されてくる。「Auto Gating」「Smart Phase」「SanpShot Freeze2.0」に1回転0.23秒の高速撮像が加わったRevolution Apex Eliteは、実質19.5msecの時間分解能を有し、自動機能を用いることで心臓CT検査の壁をなくしてくれた装置であると言える。実際、当院においても、1年目の診療放射線技師が、ストレスなく冠動脈造影CT検査を行い、とても綺麗な画像を作成している。数年前まで必死に考えながら行ってきた心臓系のCT検査が、装置やシステムの発展に伴い、新時代の考え方に変化してきているのを犇々と感じるばかりである。また、当院はHeartFlow社の「ハートフローFFR_{CT}」を検査に盛り込んでいるが、「SanpShot Freeze2.0」は、この動態解析に適応する唯一のMotion Artifact Correction Algorithmであることも、この機能の精度の高さを感じるところである。



TrueFidelity DL

TrueFidelity DLはGE HealthCare社のDeep Learning Imaging Reconstruction (DLIR) 技術である。同社のEdison platformで作成されたDeep Learning型のNeural networkを使用して、画像ノイズの低減を行う画像再構成手法で、その画像はTrueFidelity Image (TFI) と言われている。TFIには強度がLow、Medium、Highの3段階あり、Highが最もノイズの低減効果が高いが、その反面、画像の鮮鋭度が低下しているように見える。TFIはGSIや心電同期検査でも使用できるため、多くの検査での画質改善や、被ばく低減に大きな影響を与えている。当院の研究における視覚評価の検証では、Single Energy 撮像の薄いスライス厚(0.625mmや1.25mm)にはTFI - Highとの相性が良く、GSIの薄いスライス厚にはTFI - Mediumとの相性が良い傾向にあるようである^{2,3)}。通常使用しているスライス厚5mmにはSingle Energy画像、GSIに関係なくTFI - Mediumが視覚的な違和感が無く使用でき、放射線科診断医師に高い評価を受けている。Deep Learning型のNeural networkを使用している関係上、多少再構成速度は遅くなっていたが、Revolution Apex Eliteでは画像再構成ユニットも一新され、再構成ユニットのサイズは半分ほどのサイズになったのにもかかわらず、再構成速度は向上し、臨床でも全く問題ない速度で使用できている。TFIを臨床で活用し始めてから、すでに5年近く経過しているため、放射線科診断医師や診療放射線技師の中でもこのTFI画質が当たり前という世代が増えてきており、ここも新時代への流れを感じさせる部分である。



Effortless workflow

Revolution Apex Eliteに搭載された特長的な機能として、Deep Learningカメラを用いたEffortless workflowがある。簡単に述べてしまえば、カメラで人体を把握し、撮像範囲を自動で設定してくれる機能である。しかし、この「DLカメラ」(図4)には多くの最新技術が導入されている、カメラ部は2つの目を持つ3Dカメラと、赤外線カメラで構成されており、認識システムには、人体の形をDeep Learningで学習した認識機能を有している、人体の頭尾方向の認識はもちろん、左右の側臥位もしっかりと認識する。このカメラは動画で撮像しており、リアルタイムで体位を認識する。体位を認識するだけでなく、患者のOM、SN、XY、IC、KN、AJの6カ所基準点を認識し、プロトコルに設定された撮像範囲内での体厚で、設定する高さ中心を認識し、撮影開始位置まで自動にポジショニングする。勿論、前後左右でガントリー内に入らない範囲に患者の体の一部などがあった場合は、警告が出て自動には動かない安全機構もある。つまり、患者さんにベッドに寝ていただき、プロトコルを選択すれば自動的に撮影開始位置までベッドが動くということである。当院にてこのEffortless workflowにおける検査効率を検証するため、カメラのついていないRevolution Apexと同一検査内容の検査時間を計測した結果、ベッドの高さは正確に保ちつつ、40秒ほどEffortless workflowの方が早く検査が終わる結果となった、この検査は入室から退室までの時間が約5分なので7~8人行えば1人分の差が出るという計算になる。どの施設でも慌ただしいCT検査部門においてこの運用効率の改善は大きく影響すると思われる、なにより自動化により検査を行うスタッフの負担も大きく軽減されることとなる。今までは、診療放射線技師の技術力や経験でベッドの高さや撮影開始位置を設定していた行為が、Deep Learningカメラを用いて誰でも正確かつ迅速に行われる時代が来ており、このシステムも新時代の代物と言わざるを得ない。



図4 DLカメラ



まとめ

Revolution Apex Eliteは、先に述べたように従来機能のブラッシュアップに加え、新世代に向けた新しい機能を多数搭載し、本当に使い勝手が良く、簡便に高画質な画像が取得できるCT装置である。それは、今後のCT検査手法のあり方に変化をもたらす部分でもあり、古い検査手法の考え方に一石を投じる装置であるともいえるので、新時代を迎えるために是非とも導入を検討していただきたいCT装置の1つである。

<文献>

- 1) Noda Y et al: Effect of X-ray tube on image quality and pancreatic ductal adenocarcinoma conspicuity in pancreatic protocol dual-energy CT. Clin Radiol 2024,79(4):e554-e559
- 2) Takai Y et al: Deep-learning image reconstruction for 80-kVp pancreatic CT protocol: Comparison of image quality and pancreatic ductal adenocarcinoma visibility with hybrid-iterative reconstruction. Euro J Radiol 2023, 165: 110960
- 3) Noda Y et al: Deep learning image reconstruction algorithm for pancreatic protocol dual-energy computed tomography: image quality and quantification of iodine concentration. Eur Radiol 2022, 32(1):384-394