

はじめに

X線CT装置が開発されて約25年、今や世界中に普及し、画像診断に大きく貢献しています。そこで、「CTなんて簡単、簡単。患者さんを横にして、ボタンを押すだけ。普通のX線写真みたいに白い黒いで悩まなくていいし……」と思っている人はいないでしょうか？ たぶんいないと思います。もっとCTについて知りたいと思っている人ばかりだと思います。最近のCTの進歩には目を見張るものがあります。ヘリカルスキャン、CT透視、リアルタイムヘリカル、マルチスライスCT、……。この進歩は加速を続けています。装置、画像再構成も変化しますし、それによるスキャン技術もどんどん進歩します。医療人としての義務は、患者にとって最高の技術を提供することです。何もしていないでいると、CTはどんどん進んでいって、装置はブラックボックス、技術は言われるまま、ということにもなりかねません。幸いなことに、現在のわが国のCT研究はメーカ、診療放射線技師、その他の切磋琢磨の結果、活発に進められています。これは世界をみても誇ることのできる状況だと思います。今回、1年間、「CTのことをもっと知ろう」をテーマに連続掲載させていただきます。この企画が皆さんのCTに対する興味を引き出し、少しでも「CTが面白い」と思っただけのように願っております。

1. X線CT装置の原理

X線CT装置の原理は「二次元あるいは三次元の物体は、その投影データ (projection data) の無限集合から一意的に再生できる」という「ラドンの画像再構成則」に立脚しています。従来のエックス線撮影では三次元の形状を持つ被写体を二次元の感光体に焼き付けるものでした。いわゆる「影絵」です。三次元を二次元に写し込むわけですから、ある一次元はデータのなかに埋もれてしまいます。CTでは選択された位置の断層像、この二次元データを二次元に再構成します。この画像化される位置を連続的に選択すれば、三次元構造を三次元として取り込むことができます。最近、CTによる三次元表示が活発に行われていますが、それは

微細になったから活用されたのであって、本来、CTは三次元データ収集装置だったのです。

CTの特徴として、CT値やウィンド機能、そしてデジタル画像ということが挙げられます。これらの特徴は従来のフィルム増感紙系のアナログ画像では不可能な世界を開いてくれたのです。

2. X線CTの歴史

2-1 高橋信次先生による回転撮影法

CTの歴史といえばハンスフィールド (Godfrey Hounsfield) ということになります。事実、コンピュータを使った横断撮影法の開発者はハンスフィールドであり、彼の功績は偉大でした。しかし、コンピュータが出現する前の時代、すでにCTと同様のアイデアで横断画像を再構成する方法を考えていた研究者がいました。故高橋信次教授 (名古屋大学) です。これを「回転横断装置」と思われる読者がおられるかもしれません。しかし、回転断層装置は画像再構成を行わずに直接断層像をフィルムに焼き付ける方式です。元来、高橋先生の考案したものは「回転スキャン+画像再構成」であり、analog tomographyといえるものでした。Photo. 1は1946年当時の回転撮影機の様子です。フィルムを記録媒体として全周囲方向の投影データを濃度として記録し、その投影データを用いて紙面上に画像再構成してみせたのです。製品化された回転断層法はその画像再構成の部分を省略し、そのままフィルムに焼き付けたものです。コンピュータのない時代では仕方ないことです。このように、高橋教授の研究がCT開発の源流となったことは記憶にとどめておきたい事実であります。

2-2 ハンスフィールドによるエックス線CT

もちろん、CT装置を開発したのはハンスフィールドです (Photo. 2)。当時のハンスフィールドは英国のEMI会社の技術者であり、その中央研究所でパターン認識などの研究に携わっていました。1967年、ハンスフィールドは外部から測定したデータから物体の内部構造を知るという研究を行っていました。いわゆる

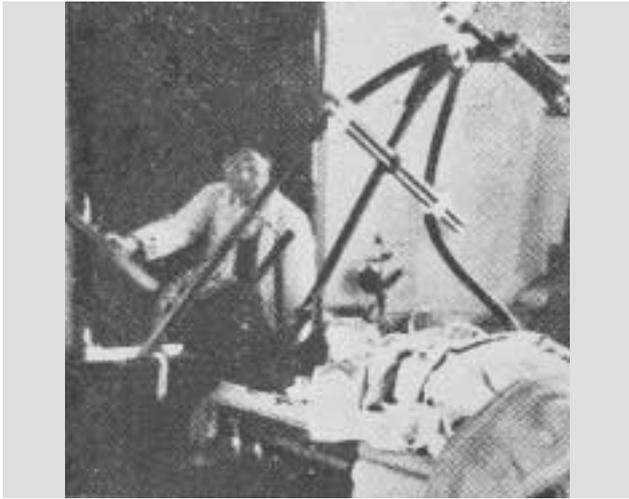


Photo. 1 故高橋信次教授による回転横断撮影機(1946年)。回転アームにエックス線管が見える。その反対側にはスリットとフィルム移動装置があり、エックス線管の回転に合わせてフィルムが移動する。その結果、フィルムにはエックス線管の位置による透過エックス線量が濃度として記録される。フィルム濃度をエックス線強度に変換し、回転角度に合わせて手作業で画像再構成を行った。

“画像再構成”です。そのとき使用した線源は γ 線源でした。データ収集に何日間も要し、断層像の再構成には大型コンピュータを使って2時間以上かかったといえます。やはり γ 線源では線量不足でした。そこで、線量を増やすためにX線管が使われました。Photo. 3は当時の実験装置の様子です。奥にX線管、手前にシンチレーションカウンタが置かれ、その間に回転式の被写体ホルダがあります。被写体のなかには剖検頭部試料が置かれ 1° 間隔で 180° 回転します。被写体の周囲には水が満たされているようです。これは初期のEMIスキャナでも行われていたのと同じです。剖検頭部試料による実験で脳内の白質と灰白質が区別できるまでとなりました(保存に用いられたホルマリンによる造影効果がずいぶん寄与したとの話ではありますが……)。

実験はAtkinson Moley病院のアンブローズ(J. Ambrose)医師とともに行われ、1941年からは同病院で臨床テストが開始されました。その当時はEMIスキャナと呼ばれていました。この装置はスキャン時間が約4分間、スライス厚は10mmでした。Photo. 4は初期のEMIスキャナ、Photo. 5は最初の臨床画像です。これらの功績によりハンスフィールドとアンブローズにはノーベル賞が授与されました。

EMIスキャナは1973年には商品化され、米国のMayo Clinic、英国のManchester大学病院などに設置されました。開発当初は頭部専用のCTばかりでした。それはスキャンに要する時間が約4分と長いからです。その後、後述するスキャン方式の進歩により短時間過が可能となり、EMI社からスキャン時間が20秒



Photo. 2 Godfrey Hounsfield.

以下という全身用CTスキャナが開発されました。

わが国では、1975年には頭部用EMIスキャナが東京女子医科大学に設置されたのを始まりに、37台のCT装置が設置されました。また、国内メーカーでもCT装置の開発は活発に行われました。東京女子医科大学にEMIスキャナが設置されたのが1973年の春ですが、同年の秋、名古屋保健衛生大学(現在の藤田保健衛生大学)に国産CT装置第1号機である日立社製頭部CT装置(CT-H)が設置されました(Photo. 6)。

* Hounsfieldに関する写真、資料は大垣市民病院放射線技術部市川秀男先生の厚意による。

2-3 CTにおける世代

EMIスキャナが開発されてから研究の中心となったのはスキャン時間の短縮です。開発当初、1回のスキャンには約4分の時間がかかっていました。工業用ならまだしも、生きている人体をスキャンするには時間がかかりすぎました。そこで、各種のスキャン方式が考案されました。それが世代分類です。Tableに大まかな世代分類を示します。

このように各種のスキャン方式が開発されました。ただ、このように開発された順番に世代をつけたものであり、現在では疑問が残ります。世代は装置のトータルの性能を比較するものではありません。たとえば、最新のCTではStationary/Rotate方式ではなくRotate/Rotate方式が使用されています。また、Scanning Electron Beam方式にいたっては循環器専用スキャナとして活用されています。過去には、分かりやすくするために使われていた世代分類ですが、最近ではその分類も射っていないように思われます。

2-4 ヘリカルスキャンの開発

1980年代後半、世間ではCTの普及も一段落して、さて次はMRIの時代という感じでした。多くのCT研



Photo. 3 ハンスフィールドによる最初のCT実験装置。奥にエックス線管, 手前にシンチレーションカウンタが見える。テーブルには直線運動を行うためのレールがつけられている。



Photo. 4 臨床用の頭部スキャナ。二つ並んだ検出器を持つ(このときすでにマルチスライスCTであった!)。2枚の断層画像を得るのに3, 4分を要した。

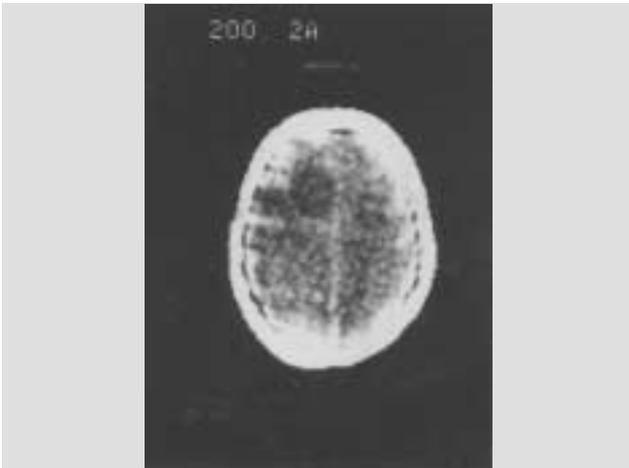


Photo. 5 最初の頭部CT画像
スライス厚は1cm, 1スキャンで2枚の画像が得られる。



Photo. 6 国産1号機のCT装置, 日立CT-H(1975年10月). 名古屋保健衛生大学病院(現 藤田保健衛生大学病院)

究者の興味がMRIに移っていったことと思います。CTは「ボタンを押せば画像が出る」という感じで「成熟」という感もありました。そこで出現したのがらせん軌道スキャン(ヘリカルスキャン, スパイラルスキャン)です。当時開発されたNutate/Rotate方式の東芝TCT-900Sはスリップリングにより連続回転スキャンが可能というものでした。これにより連続的な時間間隔でダイナミックスキャンが可能となりました。当時、筆者らは人体の呼吸運動を画像化するためにdynamic respiratory scan(DRS)というスキャン方法について研究をしていました。呼吸をしながら連続ダイナミックスキャンを行うというものです。そこで考えたのが、呼吸をしてその動きを画像化するなら、寝台を動かしても画像となるはず、という単純なアイデアでした。最初は模型を手で引っ張って可能性を調査しました(Photo. 7, 8)。それ以来、装置の患者寝台の上にトラックと呼ばれる移動式の寝台を加えたりして研究を重

ねました。当時は寝台移動の動力としてインジェクタを使用しましたが、その後、専用のモータを使用し、最終的にはCT装置の患者寝台を可動とした。

ヘリカルスキャンではスキャン中に被写体が体軸方向に動くことからモーションアーチファクトの発生が懸念されました。それに対して、補間計算によりアーチファクトの軽減が試みられ成果を得ました。補間計算は当初、360°補間でしたが、体軸方向の空間分解能の向上のため、180°補間が主流となりました。

当時、ヘリカルスキャンは「スキャン中に被写体は動いてはいけない」という原則を破るスキャン法でした。いわゆる「捻破りのスキャン法」です。そのため、物理的な側面から疑問視されることも多くありました。しかし、実際に生きている人体をスキャンする場合、動きのまったくない状態ではスキャンは行われません。呼吸が止まらない人もいるし、心臓にいたっては誰も止めることができません。ヘリカルスキャンは

Table X線CT装置のスキャン機構による分類。
当初、スキャン機構により世代分類がされていました。しかし、世代分類で装置の優劣が決まるものではないとの意見も出しました。

Translate/Rotate方式(ペンシルビーム)	EMIスカナはこれにあたる。1個の検出器を有し、エックス線ビームは細くペンシルビームと呼ばれている。スキャンはエックス線管、検出器が平行移動、回転運動を繰り返す。散乱線の影響はないが、スキャン時間は長い。頭部専用機。
Translate/Rotate方式(ナローファンビーム)	約10~20個の検出器を有する。エックス線ビームは3~10程度の広がりを持つ扇状(ファン)である。サンプリング角度はファン角度ごとによく、ペンシルビームに比べ短時間スキャンが可能となった。20秒程度であった。
Rotate/Rotate方式(ワイドファンビーム)	初期では約300個、その後500個以上の検出器チャンネルを有する。エックス線ビームは被写体全体をカバーするワイドファンビーム。従来のようなTranslate運動をすることなく、エックス線管、検出器を回転させるだけでスキャンを終えることができる。現在のCT装置の主流である。
Stationary/Rotate方式(ワイドファンビーム)	エックス線検出器がエックス線の軌道の外側にリング状に配置される。検出器のチャンネル数は2,000を超える。Rotate/Rotate方式に比べて回転するのはエックス線のみでよいという特徴を持つが、散乱線が多いのが問題。AS&E社、ピッカー社などがあるが、現在では生産されていない。
Nutate/Rotate方式(ワイドファンビーム)	Stationary/Rotate方式における被写体-検出器間距離を短縮するために、小さなリング状検出器を設置し、それがnutate(章動運動)する。エックス線管はrotate(回転運動)する。EMI社が提案し、東芝がTCT-900Sとして製品化した。
Scanning Electron Beam方式	電子ビームを電氣的に偏向させながらターゲット電極に当てていく方式である。電子偏向スキャンともいう。機械的な動きを必要としないぶん、最短50msecの高速スキャンが可能となる。循環器系スカナである。
Dynamic Spatial Reconstructor(DSR)	多数のエックス線管、多数の平面検出器(I.I.)を用いて短時間で三次元スキャンを行おうということで計画された。28組のエックス線管、検出器が計画された。線量が十分でなく実用化されなかった。



Photo. 7 最初のヘリカルスキャンの実験(1987年11月)。胸部血管模型に紐をつけ、連続ダイナミックスキャン中に手で引っ張るといった原始的な実験を行った。

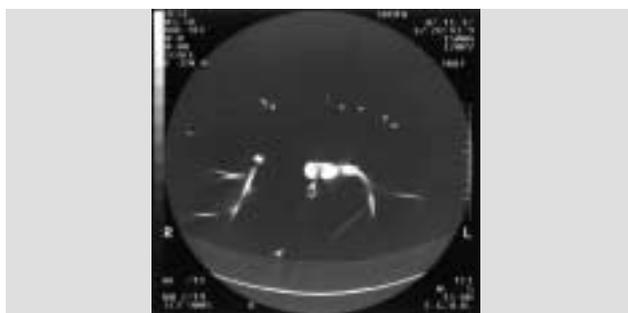


Photo. 8 最初のヘリカルスキャンによる画像。補間計算なし。しかし、体軸方向の連続性に優れ、十分に臨床で利用できる思った。

「検査の短時間性」「体軸方向のデータの連続性」からみれば欠点よりも利益が多いスキャン法です。患者の利益から考えれば、今日のヘリカルスキャンの普及は当然であるとも考えられます。

2-5 マルチスライスCT

最近のCTにおける話題としてマルチスライスCTがあります。従来、CT装置は一列の検出器にデータ収集システム(data acquisition system: DAS)が搭載されていました。これを、多数の検出器列、多数のDASにより、1回転のスキャンで多数の断層像を得ようとい

うものです(Photo. 9)。マルチスライスCTでヘリカルスキャンを行うことにより、従来のシングルスライスヘリカルスキャンよりもさらに高速なCT検査、そして微細な画像の再構成が可能となります。また、スカナは高速化し、0.4秒回転の装置も開発されました。アプリケーションでは心拍同期再構成などにより、今まではScanning Electron Beam方式の専門分野とされてきた循環器まで対象とすることができました。

最近のマルチスライスCTをみて感じることは、それはマルチスライスが、これからのCTの形を予感させ



Photo. 9 最新のマルチスライスCT装置(東芝Aquilion 4DAS).
0.5mm × 4スライス, 0.5秒/回転が可能.

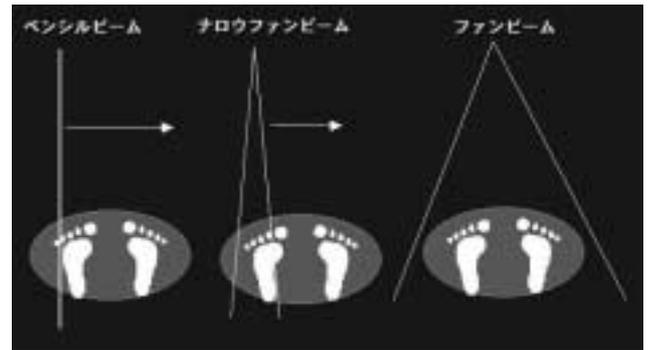


Fig. 1 断面方向の世代分類(従来の世代分類).
従来の世代分類は断面方向についての分類であり, 体軸方向には発展していなかった.

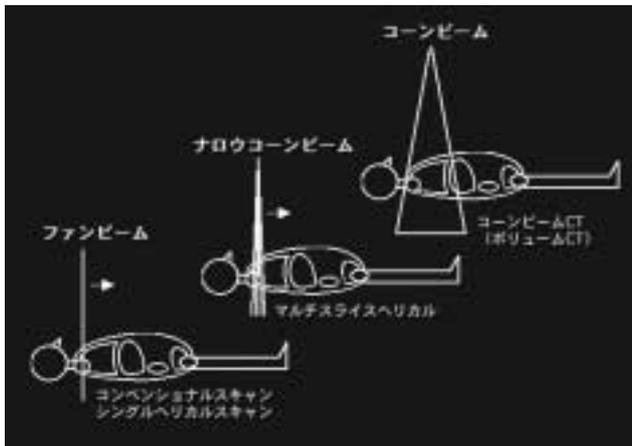


Fig. 2 体軸方向の世代分類(これからの世代分類).
体軸方向へのX線ビームの拡がりによって世代分類が行われると思われます. マルチスライスCTはナローコーンビーム, 将来は特定の臓器を全部カバーするようなワイドコーンビームになるでしょう.

るものであるということです. こう考えるのは筆者だけではないと思います. マルチスライスCTが最終形でなく, 「これが認められれば, CTはどんどんいっちゃんぞ! 」という気迫を感じさせるのです.

2-6 近未来のCTは?

ということで, 未来, あるいは近未来のCTの話です. 前項では若干の否定をしましたが, Fig.1 にCTの世代展開を示します. X線ビームに注目すれば, ここでの世代分類はペンシルビームからファンビ

ームへの二次元的なものでした. さて, ヘリカルスキャンが出現し, マルチスライスCTが開発されて気がついたことは体軸方向への展開です. 独断的ですが, Fig. 2にこれからの世代分類(?)について示します. 実は, 次の世代分類は体軸方向へのビームの拡がりになります. 1列検出器のCTがファンビーム, 現在のマルチスライスCTがナローコーンビーム, そして次はコーンビーム. 1回転で目的臓器をカバーするデータ収集が可能となるCTです. では, ヘリカルスキャンは? たぶん体軸方向への意識を呼び起こす起爆剤になったのでしょうか.

コーンビームCTには面検出器が必要となります. 現在の検出器をさらに多層にするか? フラットパネル検出器をCT用に持ってくるか? いろいろと問題もあります. 画像再構成にも問題があります. 従来のCTでは二次元的な画像再構成が行われてきました. それで, 投影データが平面でないとしたら..... .新しい画像再構成法, データ補間法が要求されます. これらのことは, 以後, 本企画のなかで述べます.

このようにCT装置が進化を続けたとすれば四次元CTですが可能となります. 四次元CTで臨床的に何が可能となるか? 興味深いところです. その効果についても本企画のなかで述べられることを期待して本章を終わります.

次回は「X線CT装置の機器工学(1) - X線の発生と検出 - 」

参考文献

- 1) 高橋信次: 図解コンピュータ断層法. 秀潤社, 東京, (1979).
- 2) 岩井喜典, 斎藤雄督, 今里悠一: 医用画像診断装置 - CT, MRIを中心として -. コロナ社, 東京, (1988).
- 3) 瓜谷富三, 岡部哲夫: 医用放射線科学講座13 - 放射線機器工学 -. 医歯薬出版, 東京, (1998).
- 4) 辻岡勝美: CT自由自在. メジカルビュー社, 東京, (2001).