山 岸 義 雄 ((株)東芝 医用機器技術研究所)

田之上 司 ((株)東芝 医用機器技術研究所)

1. はじめに

医療診断のために、現在広い範囲にわたる多様な臨床あるいは病理検査が実施されており、生理、化学、物理の多種の技術が応用されてきている。これらの検査は、患者への負担、迅速性からみて、非観血で無侵襲であることが重要になっている。非接触であることは望ましいが、そのために高価になりデータの信頼性を劣下させることには代えられない。医療機関で広く行われている採血による血液検査や血清の生化学分析、あるいは生体組織の病理検査は除き、電極装着による生体電気信号測定やプローブ接着による超音波検査なども本テーマからはずしていくと、ある範囲の検査に限られてくる。

無侵襲・非接触検査の代表としてあげられるのは、X線検査を中心とした画像診断用のシステムである。X線撮影法は、1895年のレントゲンによるX線の発見に遡るほど長い歴史をもつが、画像診断が医療診断の大変革として急激な進展を見せたのは1970年代以降のX線CTと、それに続く磁気共鳴画像法(MRI*)の普及による。画像診断では電磁波、光、放射線にわたる高いエネルギーを利用して、生体の吸収、反応をとらえ、検出信号を処理して画像を作成していくのが基本になる。現在、医療で利用されているエネルギーと波長の代表を図1に示す。光を利用した検査機器では、 $10\mu\text{m}$ の赤外線応用のサーモグラフィや、体腔内挿入スコープの内視鏡ほか多様な応用がなされているが、医療特異なセンサ技術とは考えにくい。また最もエネルギーの高いガンマ線発生放射線同位元素を使った、標識薬液注入によるガンマカメラの利用も必ずしも無侵襲といいにくい。

ここでは、代表的な画像検査としてのX線、X線

図1 医学応用の電磁エネルギー⁽¹⁾

CT, MRIについて、そのセンサ技術とシステムへの応用について述べる。エネルギー発生効率向上技術、微細な素子による多素子高性能センサ、大容量データを高速に収集・処理・記録するエレクトロニクス技術とプロセッサ技術の滞ることのない進展が、ここでは共通の課題である。

2. X線診断システム⁽²⁾

2.1 X線発生とX線受像

高電圧印加により、X線を発生する変換器としての

Non-contact Sensors and the Applied Systems for Medical Care.
By Yoshio Yamagishi and Tsukasa Tanoue (Toshiba Corp.)

キーワード: X線管, イメージングテンシファイア, X線フィル
ム, CT, MRI

*: Magnetic Resonance Imaging: 当初は核磁気共鳴CT(NMR-CT)と呼ばれていたが、核が放射線を使用した装置の印象を与えるため、核を除きMRIと称するようになった(NMR: Nuclear Magnetic Resonance)。

X線管球と、人体吸収後、透過してきたX線を映像化するための受像ユニットがX線システムの基本になっているが、撮影部位や検査法によってユニット構成とユニット仕様は異なり、数えきれないほどの多様な診断機器が使われている。この多様な用途に適用させるため、X線管とセンサとしての受像系も多種数えられるが、基本機能をここでは眺めておく。生体用に適用されるX線のフォトンエネルギーは数十keVの範囲である。X線管に印加される高電圧は、軟組織である乳房用の20kVから最高でも150kVが中心になり、管電流は最大で数百mAに及ぶ。管球から発生するX線の焦点は0.1~2mmのものが多い。変換部であるターゲットにはエレクトロンビームをX線ビームに換えるための特殊な金属が用いられているが、電気からX線へのエネルギー変換効率は極めて低い(タングステンに100kV印加して0.74%)。ほとんどは熱に変換されるため、回転陽極形をとり、患者検査の多いX線CT用には、100~200MHUの容量のものが使われている。今後、ますます大熱容量化と共に、小焦点の追求、広い範囲のX線エネルギーへの対応に向け開発が続いていくとみられる。

X線の受像で従来から変りなく多用されているセンサはX線フィルムである。高解像のセンサとしてだけでなく、画像の記録と表示の機能も兼ね、かつ薄く使用が簡便であることは他の追随を許していない。このフィルムも感光材料としては光学用と同じハロゲン化銀使用のため、X線に対する感度は良くない。X線装置では増感紙を前後に挟んで、この増感紙による蛍光の露光も含めX線利用効率を上げている。増感紙には Gd_2O_2S のような希土類蛍光材が使用され、緑発光のオルソタイプが高感度用として用いられている。

フィルムでは、撮影後即時に画像は得られない。透視しながら画像監視する場合など、CRT上のリアルタイム画像が求められる。CRT表示のためにビデオカメラを使うとすると、欠かせないのはイメージンテンシファイア(I.I.,図2)である。このI.I.に入射

してくるX線は入力蛍光面に当って光学像を生じ、この蛍光面に接して設けられた光電面の陰極から光電子を放出する。フォーカス電極と陽極で集束・加速されて出力蛍光面上に光電子は集められ、可視光像に変換される。像の縮少率に二乗反比例して輝度は増す。このI.I.には、入力窓をガラスからメタルに変え薄くしたり、蛍光材の主流になっているCsIの結晶形状を改良したりして、散乱除去や効率向上の努力がされてきている。

I.I.出力の光像を読み取るにはテレビジョンカメラでよい。ただし画像重視の点から、S/N、感度と残像特性を撮影対象に合せて、慎重に撮像管は選ばれる。ビジコン、カルニコン、サチコンと呼ばれる光導電管が主流だが、今後CCDなど半導体素子が多素子化されてくると実用化域に入ってくるだろう。

1980年代になって、新しい技術によるX線診断システムの提案が幾つか出てきた。その中で特に注目され、商品化が進んでいるものにコンピューテッド・ラジオグラフィ(CR)がある。このCRシステムには独特のイメージングプレート(IP)が使われていて、X線像デジタル化への具体的な道を開いたこと、患者の被曝低減に効果が大きいことなどユーザの導入期待

図2 新しいイメージンテンシファイア

図3 CR用イメージングプレート原理

図 4 循環器 X 線診断システム

が広がっている。この IP は高分子材料支持プレート上にハロゲン化物の輝天性蛍光体を密に塗布したもので、X 線照射を受ると蛍光結晶内にエネルギーがいったん蓄積される。これに赤のレーザビームを走査すると蓄積エネルギーが青の蛍光で取り出され、光-電気変換で X 線像が電気信号に変わる。プレート残像も更に光を当てて消去できるので、IP は繰り返し使用できる (図 3)。

2.2 X 線診断システムの新しい方向

X 線診断システムは小形の歯科用から、二方向撮影のできる循環器用システム (図 4) まで病院で最も広く、多種類のシステムが使われていて歴史も長い。最近の傾向は前述の CR の例のようにデジタル化してコンピュータを利用し、画像の処理、記録、検索を容易にすることにより、より高度な診断に役立てようとしていることにある。大容量メモリー IC や高速プロセッサなどの半導体技術が積極的に採り込まれているのは無論だが、診断に不可欠の高画質の追及はセンサを中心にしてますます重要になってきている。ここで要求される画像の精度は一画面上で、 $2,000 \times 2,000 \sim 4,000 \times 4,000$ のピクセルを 1 ピクセルあたり 12 ビットの濃度分解能、80 dB のダイナミックレンジと 60 枚/秒の動画収集など画像に対する期待性能は高い。この実現には、現在の商用 IC 技術でもまだ不足している。

図 5 X 線 CT 頭部画像

図 6 CT 用 Xe ガス検出器

3. X 線 CT システムとセンサ^{(2)~(4)}

我が国に CT が登場して 15 年が経過し、世界一の CT 保有国になった (図 5 に CT 画像例)。この間、高画質化への追求が絶え間なく続いている。CT で求められる画質向上は、(1)空間分解能を上げること、(2)病変組織識別のための濃度分解能を高めること、(3)時間変化を細かくとらえるための時間分解能を短くすること、の三つに集約される。このためデータ収集と再構成と呼ばれる画像作成の高速化とデータの大容量化が必要となり、コンピュータ・トモグラフィ (CT) のコンピュータの性能向上技術の進歩を大いに享受してきた。センサへの要求は必然的に、①多素子化、②微細化、③高ダイナミックレンジと高感度化、④高い S/N、⑤高速特性、⑥高い X 線吸収効率、⑦素子間均一性、になってくる。こうした要求にこたえられる X 線検出器として現在主流になっているのは、Xe の電離を使ったガス検出器 (図 6) と、シンチレータと光電素子から成る固体検出器である。半導体素子を直接 X 線-電気変換に用いる試みもなされたが、現在 S/N 不足などのため CT を含め画像用には使われていない。

CT は管球からの X 線ビームを人体透過後、対向する検出器で受け、X 線ビームを人体の周りに円周上に回転させながらデータを収集し、再構成法によって回転面上の断層像を作り出す原理に基づいている。現在、医用 CT としては、第三世代システムと呼ばれる X 線管球と対向する検出器群 (人体の直径以上の

長さをカバーできる多素子検出器配列)が一体で円周上に回転する方式と、第四世代の検出素子配列が円周上に固定され、X線管球だけが回転する方式およびそれらの派生方式が使われている。それぞれに長があって、第三世代では常に全検出器が使われ有効利用されているのに対し、第四世代では対向する検出素子部分のみしか使われていないが、反面、回転機構は管球用だけになり、高速化ができる。どちらの方式もX線ビームは人体の断面直径以上の広がりをもつファン形状を使う。このファン状のX線人体通過ビームを受けるセンサは、第三世代で数百個の素子数になる。第四世代では円周上に数百から数千個配列される。第四世代用センサには固体検出器が、第三世代にはガス検出器か固体検出器が使われている。固体検出器としての主流は、 CdWO_4 や CsI の蛍光クリスタルのシンチレータとホトダイオード（一部光増倍管）の組合せである。1素子の開口は1mm以下になっており、断層像のコントラストの高い箇所では空間分解能で0.5mm以下が得られている。濃度分解能としてみると、X線の吸収係数に比例するCT値が診断で用いられていて、このCT値は空気のマイナス値と水の0から最大値で数千に及ぶスケールにわたる。このため理想的には20ビットのデータ精度がほしい。また、時間分解を決める一断面スキャンの時間は数秒から1秒以下に達している。

最近、改新的な方式として回転機構のないCTが臨床で使われ出した⁽⁵⁾。人体を包み込む横置き鐘状の真空スキャナの中で電子ビームを大円環ターゲットに照射し、X線ビームを作る。ターゲットを複数層設けて同時複数スライスの断面像も得られる。スキャンタイムも数十msと高速で、心臓の動きに十分追従でき、新しい診断応用が広がっている。

4. MRI システムとセンサ⁽⁴⁾⁽⁶⁾

人体内に一番多い原子核と、NMRで最も感度の高い原子核とは共に同じ水素原子核(^1H)である。NMR現象を応用した医療機器MRI装置は、癌の診断、代謝診断などに有効であることから、医者の方の期待を受け、提案から10年ほどかかって開発製品化されてきた。

NMR信号には測定対象原子核の密度、その存在している環境(T_1 , T_2 の緩和時間)とその原子の運動が含まれ、MRI装置はそれらを分離・統合して画像化する技術である。

我が国でMR装置が市販され始めてから8年が経過し、市場も本格的な成長期を迎え急速に普及してお

図7 MRIの原理

り、現在600~700台が稼働していると思われる⁽⁶⁾。しかし、まだ開発当初予測、期待された技術のすべては完成されてはいない。呼吸・拍動・体動などの動きによる画像劣化を防止する技術、画質向上(X線CTと同じ)のための信号のS/N向上、撮影時間の短縮化、血液、脳脊髄液などの体液の流れや血管の画像化技術、実時間撮影を可能とする数十msの超高速走査技術、代謝診断を可能とする ^1H 、 ^{31}P 、 ^{13}C などの化学シフト映像法、 ^{23}Na や ^{19}F (人体内には存在しないが人工血液の構成元素、 ^1H の次に感度高)などを対象とする他核種映像法などの開発が実用化を目指し続けられている。すべてが完成するには、今後10年程度は要すると思われる。これらの技術の完成により当初期待された形態診断、機能診断の可能な診断装置が完成することになる。

図7にMRIの原理を示す。同図に示されるようにMRI装置では、均一で高安定(ともにppm台)な静磁界、その静磁界に対しxyz各方向に一次の傾斜を作る傾斜磁界、 ^1H を励起するための高周波磁界の組合せが必要であり、被測定対象の原子核スピン運動は、与えられた磁界の強さに比例した周波数で共鳴する現象を基本にしている。測定には、まず見たい断面に垂直方向の傾斜磁界をかけ、共鳴周波数が傾斜方向に変わるようにし、目的励起部周波数の帯域をもつ高周波磁界を印加する。するとその部分が励起され、緩和時間 T_1 , T_2 で減衰する信号を発生する。次に、傾斜磁界を見たい断面に平行で互いに直交する2方向に順に印加し、場所に応じ周波数、位相の組合せが変わるようにして、高周波コイルの励起により生じた信号を受信する。受信信号の位相変化量を傾斜磁界の大きさに置き換え、画像作成に必要な段階数(現在は256回が多い、多いほど画質向上が図れる)だけ変えるようにし、その回数だけ上述の工程で励起、受信を繰返して画像データを収集する。収集したデータをコンピュータで処理し画像化する。

図 8 MR 像

体部用フレキシブルコイル

すい臓レベルの横断像。皮下脂肪が薄く信号量の少ない人体でも高いS/N比と適切なRFパワー入力で鮮明な画像が得られる。

図 9 高周波コイル

①体内の ^1H の分布・状態を直接画像化するため、形態診断だけでなく機能診断が可能、②傾斜磁界、高周波磁界の制御だけで走査ができるため、何も動かすことなく任意断面の撮影ができる、③ ^1H がないか少ない骨、空間部の撮影不可、④励起、緩和の繰返しでデータを収集するため撮影時間が長い(数秒～数分、撮影法により異なる同時多断層撮影法で全撮影時間の短縮を図っている)などの得失がある。図9にMR像の一例を示す。

MRIのセンサは高周波コイルであり、高周波(現在の装置では0.8～80 MHzが使用されており、静磁界強度に比例する)の印加および受信に用いられる。NMRは原理上対象物に存在する ^1H の数ppmしか信号に寄与しないため、S/Nの最も悪い測定法の一つである。このため一般の装置では全身をカバーする励起・受信兼用コイル、測定部位ごとに最高感度が得られるようにした複数個の受信専用コイルを使い分けしている。図9に一例を示す。

現在も医療側の要求に応じS/N向上、部位別コイル開発のため努力が続けられている。ポイントとしては、(i)コイルを測定部に可能な限り近づける、(ii)目的部位からの信号のみを効率よく収集する(表面コイル)、(iii)コイルの密度を上げる(四重極コイル)、(iv)コイルが接続される回路の低ノイズ化、などがある。これらの技術の追求と静磁界強度向上(信

号が増大する)、3種類の磁界の制御の高精度化技術開発とで前述の究極のMR装置の実現を図るべく現在研究開発が盛んに行われている。

5. 終りに

非接触センサとそのシステムについて、代表的なX線と核磁気共鳴技術を中心に展開してみた。これらの技術は人体以外の、例えば有機・無機材料分析やユニットのテストにも応用は可能であり、製品適用もされている。人体が水分を主成分にしているのに比べ、材料分析ではもっと高いエネルギーのX線、 ^1H 以外の磁気共鳴信号が得られる原子核選定が必要になる。

人体自身が非常に感度の高い各種センサを保有し、高い識別能力を備えていることを考えると、今後このバイオセンサの工業応用が非接触センサの分野でも話題になってくると思われる。

(平成2年1月23日受付)

文 献

- (1) 山岸：「医学応用」テレビジョン学誌, 42, 703(昭63-7)
- (2) 日本放射線機器工業会：医用放射線機器ハンドブック(昭61)電子計測出版社
- (3) 岩井編：CTスキャナ(昭54)コロナ社
- (4) 岩井、他：医用画像診断装置(昭63)コロナ社
- (5) D. P. Boyd & M. J. Lipton: "Cardiac Computed Tomography", *Proc. IEEE*, 71, 298(1983)
- (6) 「MRI 機種別設置台数一覧」新医療, p. 142 (平成-6)

山 岸 義 雄

社医用機器技術研究所所長。

昭和37年早稲田大学理工学部電子通信学科卒業。同年(株)東芝入社。医用電子, CT, 医学コンピュータ応用機器開発に従事。現在、同

田之上 司

昭和38年九州大学理学部物理学教室卒業。同年(株)東芝入社。X線分析装置の開発に従事。53年より医用機器部門に移り、X線CT用検出器, MR装置の研究開発に従事。現在、同社医用機器技術研究所主幹