

連載講座



中性子イメージング技術の基礎と応用（基礎編第9回）

中性子イメージングにおけるエレクトロニクス画像取得と処理・解析[†]

持木幸一

武蔵工業大学 知識工学部 情報科学科
東京都世田谷区玉堤 1-28-1

Key Words : neutron, neutron radiography, neutron imaging, electronic imaging

1. はじめに

中性子ラジオグラフィとは、中性子ビームを用いて被検体の内部情報を、透過像を取得することで可視化する技術であり、ここでは、そのための撮像技術の一つであるエレクトロニクス法について述べる。この技術はフィルム法に代わり普及してきたもので、特に対象が動態である場合に、必須の撮像技術である。当初は、 ${}^6\text{LiF} + \text{ZnS} : \text{Ag}$ や $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S} : \text{Tb}$ などの中性子用蛍光コンバータ上に生じる低輝度の透過像を、超高感度な電子管を用いたTVカメラで撮像していた。その後、静止物体用としては、低ノイズで長時間露光が可能な半導体の撮像素子（以後固体撮像素子と呼ぶ）であるCCD (Charge Coupled Device) が開発され、中性子や γ 線による照射損傷を避けるために、二つのミラーを介してビームラインから外れた位置にカメラを設置し、更に鉛で遮蔽して使用している。上述のカメラはレンズにより透過像を撮像素子上に結像する方式であるが、被検体が小さい場合

には、撮像素子表面にイメージファイバを密着させ、イメージファイバの先端面に蛍光体を配置し、空間解像度と集光効率の改善をはかる方法も開発されている。また、イメージングプレートと呼ばれる日本独自の方法も開発された。最近では、イメージングの補助装置として高輝度中性子用イメージ・インテンシファイアが開発され、動画撮像に威力を示し注目されている。これらのエレクトロニクス法の原理と特徴を表1にまとめておく。

これらのエレクトロニクス法で撮像された画像はデジタル画像化が容易である。デジタル画像は正方形の画素に分割され、規則正しく配列されている。デジタルデータであるので記録や保存ができ、コピーや保存中にもノイズの混入による劣化がなく、計算機やデジタル回路で画像演算、データ圧縮及び暗号化などの信号処理が可能で、ネットワークでデータ転送ができるなどの特長がある。ここでは、日本原子力研究開発機構のJRR-3M (Japan Research Reactor No.3 Modified) に設置されている熱中性子ラジオグラフィ照射施設 TNRF-2 (the 2nd Thermal Neutron Radiography Facility) での経験をまじえながら、エレクトロニクス画像取得装置について概説する。

2. 静止画像撮像系

被検体が静止している場合には、S/Nの観

[†]Fundamentals and Applications of Neutron Imaging (Fundamentals Part 9).

Electronic Image Taking and Processing for Neutron Imaging.

Koh-ichi MOCHIKI: Musashi Institute of Technology, 1-28-1, Tamazutsumi, Setagaya-ku, Tokyo 158-8557, Japan.

表 1 エレクトロニクス撮像法の原理と特徴

種類	原理	長所	短所	備考
撮像管式 (SIT管、カ ルニコン管、 HARP管)	筒状のガラス管の端面に光電変換面を形成し、レンズを介して透過像を結像する。管内は真空であり、電子ビームで光電変換面を走査して光量に応じた電気信号を得ることができ	γ線に対して感度が極めて低い。増幅作用を持たせることができる。走査速度を下げ、S/Nを改善できる。	感度の不均一性がめだつ。画像歪みがめだつ。入射光量に対して出力が比例しない場合がある。形状がやや大きい。	TVカメラ用として開発されており、動画撮像に適している。
固体撮像素子 (冷却型 CCD、CMOS)	画素と呼ばれる微小なSiフォトダイオードに光電効果により発生した電荷が蓄積され、一定時間後に蓄積電荷が読み出され、電圧信号に変換されて出力される。	小型堅牢である。入射光量と出力の比例性が良い。素子出力部が低ノイズであるので、高感度である。素子を冷却し、熱に起因するリーク電流を低減すると、さらに高感度となる。最近は、高画素数で高速度撮像が可能なCMOSイメージセンサが開発されている。	γ線による直接反応で小さな輝点状のノイズが生じる。γ線による損傷でフォトダイオードのリーク電流が増加し、白点状のノイズとなる。	静止した被検体の微弱な透過像を、露光時間を長くして撮像する場合に適している。高速度撮像用のCMOSイメージセンサの開発が盛んである。
イメージング・ブレート	輝尽性蛍光体に中性子吸収体である酸化ガドリニウムを混在させ、中性子反応で生じた二次放射線により輝尽性蛍光体の電子を格子欠陥にトラップさせる。中性子の強度に応じた密度で電子がトラップされ、保持される。照射後にレーザ光でトラップされた電子を開放する際に、発光し、発光強度分布から中性子強度分布を推定する。	感度が高い。入射中性子数と出力との比例性が良く、測定範囲が広い。ブレートは再利用できる。	照射後、時間とともに輝尽発光強度が減衰する。	日本独自の技術である。
フラットパネル	中性子吸収材と蛍光体からなる層を多数の規則正しく配列された画素からなる光電変換部に密着し、画素に蓄積された電荷情報を順次電気信号として読み出し、レンズなしで透過像を取得する。	動画像が得られる。画像歪みがなく、CT撮像に適している。	放射線損傷を受けやすい。	中性子用は開発段階である。
イメージ・インテンシファイア	中性子吸収物質、蛍光体、および光電変換膜からなる入射面で発生した光電子を真空中で加速し、出力面に塗布されている蛍光膜に衝突させて高輝度の透過像を生成する。	出力像が高輝度であるので、特に高感度でない撮像素子も使用でき、カラーカメラ、高速度カメラ、高画素数なカメラなど、応用に応じて特徴あるカメラが選択できる。	高価である。	日本では、高輝度な中性子用イメージ・インテンシファイアが開発されている。

点から撮像系を検討すると、画像情報を読み出す時に加わる電子回路ノイズの寄与を抑えるために、読み出し回数は1回とし、信号をできるだけ撮像素子内に貯める方式がよい。したがって、イメージングプレート（第3回基礎編を参照）や冷却型 CCD が使用されている。検査に必要な階調（グレーレベル）を L とすると、1画素中で信号に寄与する中性子の平均数を N_s とし、ノイズ成分を中性子数で換算して N_N 個とする。原子炉から中性子が1フレーム内に飛来する数はランダムであり、ポアソン分布に従う統計的性質を持っている。したがって、 $N_N = \sqrt{N_s}$ の性質があり、したがって、グレーレベルが L となるためには、

$$L = N_s / N_N = \sqrt{N_s}$$

の関係より、1画素には L^2 個以上の中性子数になるまで、露光時間を調整する必要がある。なお、この中性子数は、画像処理を施す場合には、解像度とのトレードオフで少なくすることができる。

JRR-3M の TNRF-2 は、照射野が 260 mm (H) × 300 mm (V) であり、熱中性子束が $1.5 \times 10^8 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ である。ここでは、静止画撮像用として、浜松ホトニクス社製の冷却型 CCD カメラ C4880-50 (1024 × 1024 画素) と、富士フイルム社製の中性子用イメージングプレート BAS-ND2025 と読取機 BAS-2500 (最小読取画素 $50 \mu\text{m}$ 角) が設置されている。両者とも、TNRF-2 での露光時間は秒オーダーである。

2・1 冷却型 CCD カメラ

科学計測用として有感領域が 100% であるフルフレーム型の CCD イメージセンサをメカニカルシャッターで露光時間を調整して使用する。最近の一眼レフ CCD カメラと異なるのは、バルチュ素子でセンサを冷却し、熱雑音に起因する暗電流を極力抑えていることであり、5桁程度の比例性のある入力信号範囲を確保できるので、通常は 16 ビットの ADC (Analog to Digi-

tal Converter) が使用され、コントラストの高い、定量性のある画像を取得できる¹⁾。したがって、中性子 CT 用の撮像素子として、必須のものである。CT 用として必要な水平方向の画素数については、直径が 9 cm 程度の被検体を視野 10 cm × 10 cm で撮像する場合、上述の TNEF-2 での L/D は 176 であるので、 $L=728$ cm を考慮すると、被検体を蛍光板に近接した場合でも、外周部分のボケは約 $260 \mu\text{m}$ 程度となるので、視野の一辺が 10 cm であることを考慮すると、512 画素程度で十分であるが、被検体の中心部分では L/D によるボケは少ないので、より高画素数の CCD が求められる。しかし、再構成にかかる処理時間が画素数とともに飛躍的に増大するので、現在は水平方向 1024 画素の CCD が使用されている。CCD カメラは Si 半導体センサであるので、 γ 線などの放射線と直接反応して白い輝点のノイズが画像中にランダムに発生し、定量測定の妨げとなる。これを除去するために、3 回測定し、三つの画像データより、画素毎に最小値を選んでノイズのない画像とする最小値フィルタ処理が多く利用されている。図 1 は露光時間 1 秒で 8 回の撮像を

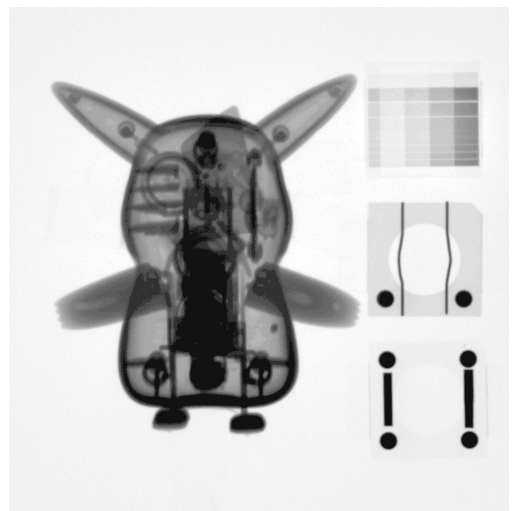


図 1 冷却型 CCD による透過像
被検体は RISO のビーム特性インジケータや解像度チェック用インジケータとプラスチックの玩具である

繰り返し、8フレームのデータで各画素の最小値を集めた最小値フィルタ処理をした画像である。

2.2 イメージングプレート

原理や種類について、基礎編第3回(6月号)に詳しく述べられている。照射済のプレート上をレーザービームで規則正しく走査し、輝尽性蛍光体からの光の強度分布を高感度光検出器で電気信号に変換し、AD変換してデジタル画像を得ている。したがって、ここではエレクトロニクス法に含めておく。感度が高く、ダイナミックレンジが広く、解像度も高いので、静止した被検体の撮像には一般的な装置となりつつある。

3. 動画像撮像系

動画用カメラのフレームレートは、市販の録画装置で記録することを考えると、NTSC (National Television Standards Committee) 規格に準拠して毎秒約30フレームが一般的であるので、1フレームに対する露光時間が約33.3msと比較的短時間であり、十分なS/Nで画像を取得することができない。分解できる階調数は1画素あたりの寄与する中性子数に強く依存し、したがって、まず照射場の熱中性子強度、視野の面積、1画面の画素数などに強く依存し、また、蛍光板での熱中性子吸収率、蛍光のレンズでの集光効率、及び撮像素子の量子効率などにも依存しているので、高検出効率で高輝度の蛍光板、集光効率の高い光学系、量子効率の高い撮像素子などの選択が重要となる。例としてJRR-3Mでは、画素数640×480のカメラで視野12.8cm×9.6cmを撮像する場合、1フレームで1画素に寄与する中性子は、検出効率が100%として平均2000個であるので、グレーレベルは $\sqrt{2000} \approx 45$ となり、6ビット程度のADCで十分であると判断される。しかし、視野が25.6cm×19.2cmとなると、同じ撮像系で、グレーレベルは倍の90となる。

これまでにJRR-3Mで使用されたことのある

動画用撮像系を次に概説する。

3.1 SIT管カメラ

RCA社製のSIT (Silicon Intensifier Target) 管を用いた高感度カメラである。この撮像管は光電面、電子加速部、集束電極、及び加速された電子が衝突して電子増倍するシリコンターゲットからなるイメージ部と、走査電子ビームを操る集束変更部、及び電子銃部で構成されている。このカメラは像倍率をシリコン増倍ターゲットの衝突させる電子のエネルギー、すなわちイメージ部の印加電圧で調整でき、また固体撮像素子で問題となる γ 線との反応に起因するホワイトスポットノイズが目立たないという長所を持ち、中性子ラジオグラフィの草分け時代に、動画像取得のため大いに使用されていた²⁾。しかし、ダイナミックレンジが固体撮像素子と比較して狭く、また、走査電子ビームを制御する電子回路の温度変化により電子ビームが走査される位置に変動があるため、複数の画像を取得して画像間演算を行う場合、画像に位置ずれがあると、画像のエッジが強調されることがある。これは、1画素の半分程度の位置ずれでも発生するので、用途によっては、極めて厄介な問題である。位置ずれ対策としては、カメラ内の電子回路を一定温度に保つ方法があり、長時間測定が必要なX線回折測定用のX線TVカメラで行われていた。

3.2 HARP管カメラ

NHKが開発した高空間分解能特性を持つHARP (High-gain Avalanche Rushing amorphous Photoconductor) 管は、入射面のa-Se膜内の強い電界で信号電荷が1000倍にまでアバランシェ増倍され超高感度特性も有している。図2に4096×4096画素のモードで取得した画像の4分の1の部分を示す。1600TV本のMTF (Modulation Transfer Function) が達成されていた³⁾。HARP管は高感度で高解像度特性を有するが、入射光量 x と出力 y の関係を $y = ax^b$

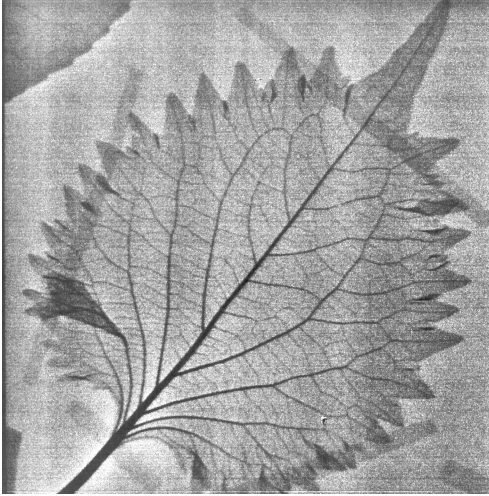


図2 HARP 管カメラに木の葉の透過像
4 096×4 096 画素のモードで撮像し、その4分
の1の部分を示す

+bで示す場合に、傾きを表す γ の値が1ではなく、0.5～0.9の範囲で信号電流に依存している。これは、明るい場合には、信号を抑え気味にして人間の目の特性に合わせたものであり、TV用の撮像管としては望ましい特性であるが、計測用としては、定量性にかけるものとなる。したがって、定量性のある画像が求められる場合には、透過特性が既知のインジケータを同時に写し込むなどの補正処理が必要となる。

3・3 固体撮像素子

Siを基板とする固体撮像素子は赤外波長域に感度ピークがあるので、ピーク波長450 nmのZnS:Ag系よりも、赤色系の蛍光コンバータと組み合わせて使用する場合には、最良の感度を得ることができる。Si系の固体撮像素子で動画カメラに採用されているものとして、CCDイメージセンサ、CMOSイメージセンサ、及びフラットパネル検出器がある。

CCDカメラを動画撮像に使用する例として、後述する中性子用イメージ・インテンシファイアでRGB用に3個の素子を備えた高感度3板式カラーカメラがある。ここでは、イメージ・インテンシファイアの出力蛍光面が赤色発光し

ており、また、RGBの感度比を利用してラチチュードの拡大を意図して、三つのCCDカメラが使用されている。また、CCDパッケージの受光部の保護用ガラスの内側に光電膜を形成し、発生する光電子を加速してCCD素子表面に衝突入射させ、これによる電荷増倍作用により画像の輝度増幅を得る特殊な素子が浜松ホトニクス社で開発され、EB-CCD (Electron Bombardment Charge Coupled Device) として市販されている。

動画用CMOSのイメージセンサの開発は、近年非常に進んでおり、毎秒30フレームでは1280×1024の高画素数化がなされた。また、同じ画素数で、毎秒500フレームの高速化がなされており、後述する中性子用イメージ・インテンシファイアとともに利用して、中速度の高速現象の可視化及び高速にCT用透過像の取得が可能となる。ただし、CMOSの場合には、CCDと比較してシステムノイズなどの電子回路ノイズが大きいため、補正などの画像処理が必要となる。

3・4 中性子イメージ・インテンシファイア

最近、出力面に赤色発光体を用いた入射面9インチの中性子イメージ・インテンシファイアが開発されている。出力面に高輝度な動画像が出現するので、カメラの選択に幅ができ、高性能なカメラとの組み合わせにより、極めて高品質な透過像が得られるようになった。TNR-2の照射場で、上述した3板式カラーCCDカメラからの最も感度が高い赤色用信号を用いて、シャッタースピードの依存性を調べた。通常の毎秒30フレームの標準レートで撮像し、シャッタースピードを30分の1秒から10000分の1秒まで切り替えて撮像した(図3)。被検体は左からステンレス、銅、アルミニウム、テフロンの各段8mm厚のステップであり、各ステップの中心にCdの板を付けて散乱中性子成分の補正に使用している。同図のデータは銅の8mm厚の部分処理したものである。カメラの

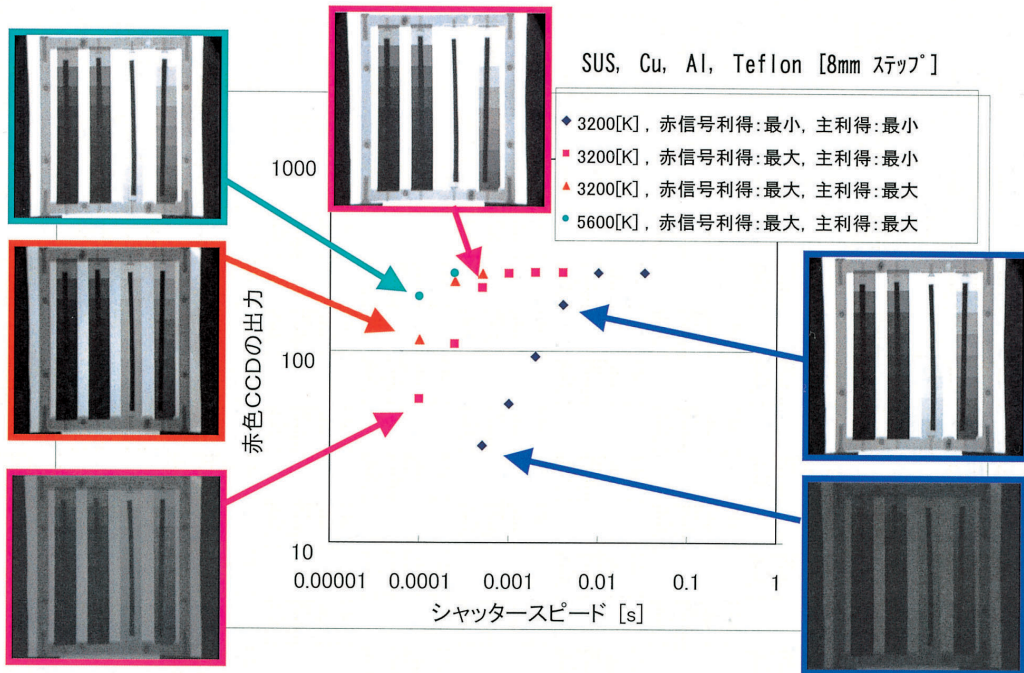


図3 赤色用 CCD の出力とシャッタースピードとの関係

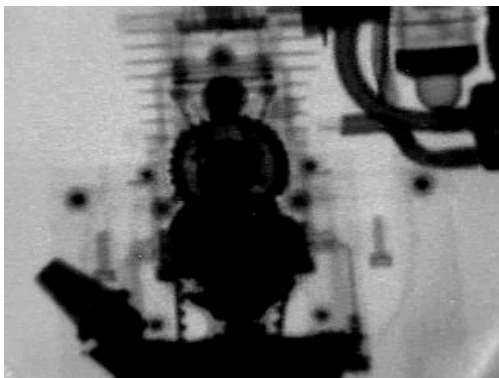
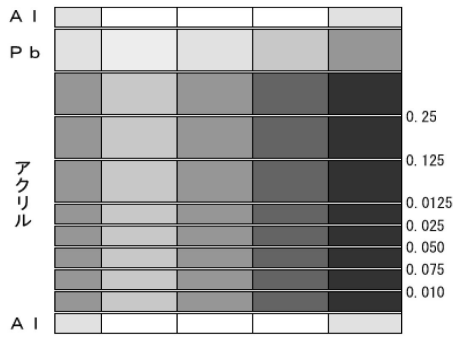


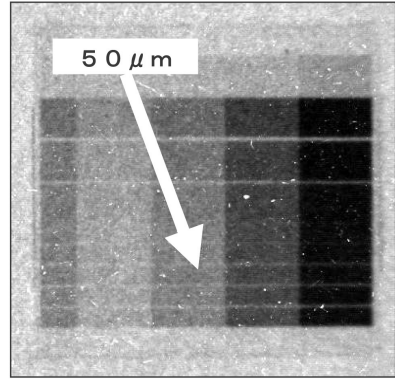
図4 25 cc エンジンの動画像のひとつコマ
回転は 300 rpm でシャッタースピード 1/500 s
で毎秒 30 フレームで撮像

種々のゲインを適宜調整することにより、最小 10 000 分の 1 でも動画像が取得できている⁴⁾。図 4 に富士重工製の 24.5 mL ロビンエンジン EH025 を 300 rpm で回転させて標準レートで撮像したひとつコマを示す。このときのシャッタースピードは 1/500 s であり、ピストンやオイルの動きが鮮明に可視化されている。

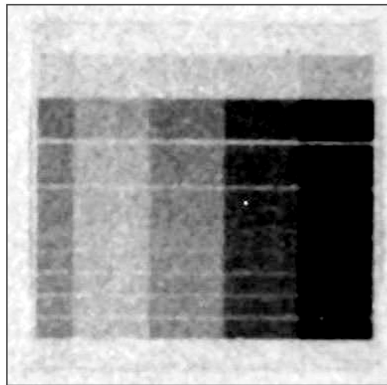
このイメージ・インテンシファイアは解像度も高く、EPIX 社製のモノクロ CMOS カメラ SV9M001 を用いて毎秒 30 フレームで 1280×1024 画素の高精細な動画像が取得されている。図 5(b) は RISO の感度インジケータを撮像した 1 フレームの画像であり、 3×3 の窓幅のメジアンフィルタで処理すると図 5(c) のように、 γ 線によるホワイトノイズが除去されている。図 5(d) は、これを 16 フレーム積算し、階調分解能を向上させた画像であるが、ほぼ 0.5 秒でこの程度の画像が取得できるようになり、CT データの取得の短縮化に大いに寄与することが期待される。図 6 はハードディスクを標準レートで取得した画像の 1 枚である。高品質な画像が得られている。図 7 は 18 秒間で 180 度回転させて 540 フレームの透過像を標準レートの動画像で取得し、4 フレーム毎に積算して 180 の投影データとして重畳積分法で再構成した CT 像である。被検体は直径 10 cm のスリット入りアルミニウム円板である。測定時間の短縮化



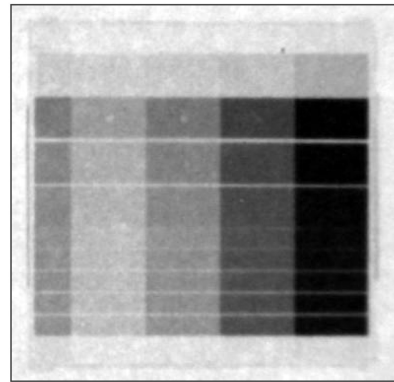
(a) RISOインジケータ



(b) 1フレームの画像データ



(c) (b) の画像にメジアンフィルタ処理



(d) (c) の画像を16フレーム積算

図5 130万画素 CMOS カメラによる RISO の感度インジケータの透過像

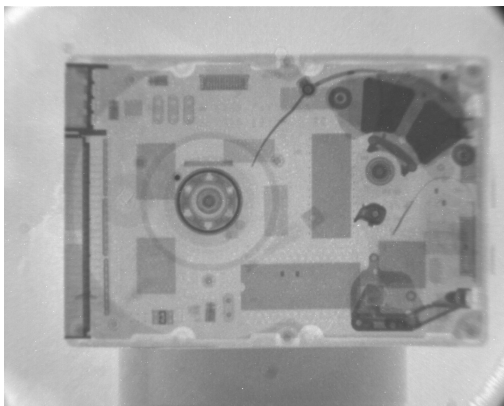


図6 130万画素 CMOS カメラによるハードディスクの透過像

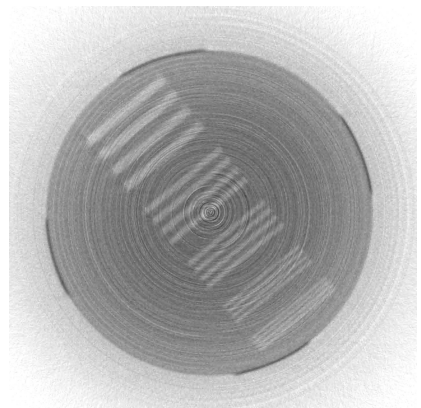
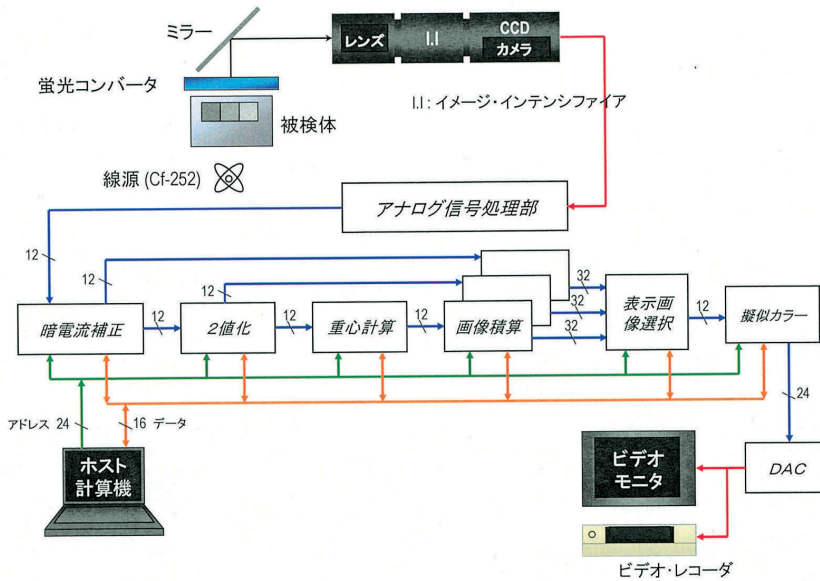
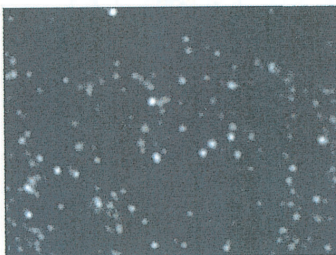


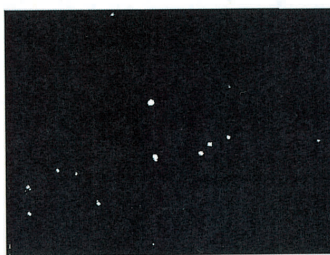
図7 動画用130万画素CMOSカメラによるCT画像
180度を18秒間で540フレーム撮像し、4フレーム毎に積算して180の投影データとして重畳積分法で処理した。被検体は直径10cmのアルミニウムのスリットが入った円板



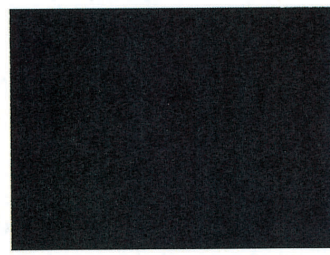
(a) フォトン・カウンティング処理システム



(b) 原画像



(c) 2値化画像



(d) 重心画像

図8 Cf中性子源を用いたフォトン・カウンティング法による中性子ラジオグラフィシステム

が成されている。

4. 画像処理

ビデオ信号をデジタル化すると、実時間での画像処理が容易に行えるようになる。図8はRIからの中性子を用いて透過像を得るシステムのブロック図である。線源強度が弱いために、動画の原画像には中性子の信号は輝点としか現れず、2値化処理後に重心を演算し、メモリに積算すると、図9の(b)~(d)のように透過像が

得られる。図9(b)の単純積算画像は大きな輝点の積算のために平均化処理されると等価の効果があり、ボケぎみではあるが階調分解能が良い画像となる。重心を積算した図9(d)の画像は最も解像度が良く、図9(c)の2値化画像はこれらの中間的な特性を有している。

以上は実時間による画像処理の例であるが、パソコン上でのオフラインによるソフトウェア処理も可能である。表2にこれらの処理例と特徴をまとめておく。

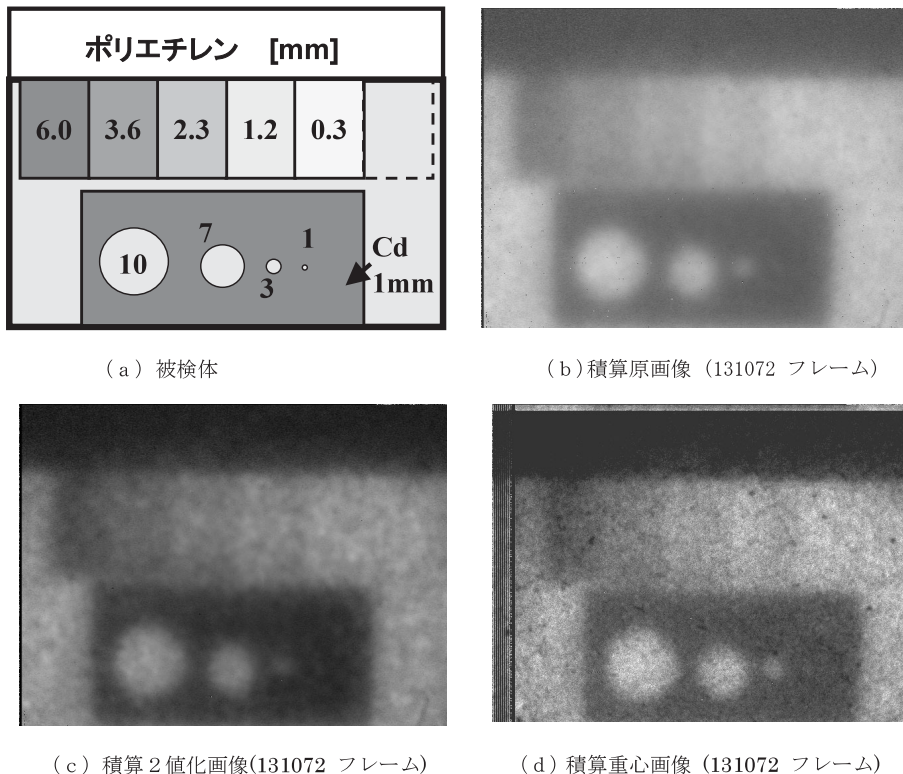


図9 フォトン・カウンティング法で積算後の画像

表2 ハードウェアとソフトウェアによる画像処理の比較

	画像処理の種類	長所	短所	備考
ハードウェア	暗電流補正 シェーディング補正 2次元デジタルフィルタ 時間軸でのデジタルフィルタ 特殊処理 (平均ボイド率、軌跡) カラー信号の合成によるラチチュード拡大 擬似カラー化 フォトンカウンティング	実験中に必要な情報を確認できる。 実験条件の最適化作業が短時間でできる。 結果をその場で確認できるので、データの取りこぼしを防げる。	専用の装置を製作する場合は、電子回路の専門知識が必要である。 回路素子の性能が年々向上するので、定期的な開発が必要である。 処理後の動画を高精度で記録できない。	動画処理用である。 専用の装置は少ない。
ソフトウェア	オフラインで上記の画像処理 CT再構成 複雑な適応型デジタルフィルタ	目的に応じて、時間をかけて最適な処理ができる。 処理を再試行できる。 演算速度の改善は、アルゴリズムを改良しなくても、パソコンの技術革新により達成できる。	動画をオフラインでフレーム毎に処理し、再度動画像に編集する場合、多大な労力を要する。	動画処理と静止画処理のどちらでも対処できる。

5. おわりに

エレクトロニクス法で重要なイメージセンサの技術革新には目覚ましいものがあり、近年では高性能な動画用 CMOS イメージセンサが次々と出現している。また、J-PARC などの新しい中性子源の開発も進みつつあり、今までにない応用分野が開かれることを期待する。

文 献

- 1) Matsubayashi, M., Tsuruno, A., Kodaira, T. and Kobayashi, H., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A* **377**, 107-110(1996)
- 2) Mochiki, K., Murata, Y., Takenaka, N., Kobayashi, H., Matsubayashi, M. and Tsuruno, A., *Nucl. Instrum Methods Phys. Res., A* **377**, 130-132(1996)

- 3) Mochiki, K., Uno, T., Murata, Y., Kobayashi, H., Matsubayashi, M. and Tsuruno, A., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, **A377**, 126-129 (1996)
- 4) 持木幸一, 日塔光一, 中性子カラーイメージンテンシファイア, 応用物理, **75**(11), 1349-1353 (2006)
-