中性子イメージインテンシファイア撮像カメラの検討

加美山 隆*, 日塔 光一

(北海道大学*, 東芝原子力エンジニアリングサービス(株))

Consideration of the Neutron Image Intensifier Camera

Takashi Kamiyama* and Koichi Nittoh

Hokkaido University* and Toshiba Nuclear Engineering Services Corp.

ABSTRACT

Several detectors have been developed for neutron transmission imaging, but neutron image intensifier (NII) is also an option in terms of field of view and sensitivity. Since NII has a position resolution of less than 0.1 mm, it can be expected to obtain a high-sensitivity, high-gradation fine image with a camera to be combined. In this research, we selected CMOS cameras for industrial applications with linearity in sensitivity as the camera, and examined the performance evaluation of the camera, especially the cooling effect of the sensor which becomes a problem in long time measurement. Based on this result, we developed a portable imaging system that compactly integrates a cooled camera with NII and camera and constructed a system that can be used instantaneously in various facilities.

Keywords: *neutron radiography, image intensifier, CMOS camera, Cooled camera*

1. はじめに

近年小型中性子源の開発が進められており、少ない中性子フラックスによるイメージングに、感度が高く高精細な中性子用イメージインテンシファイア (Neutron Image Intensifier, 以下 NII と略記する) の適用が期待されている。NII は、入力窓で中性子と反応して蛍光体を発光させ、生じた光子を光電変換膜で電子に変換し、加速電界と電子レンズの作用で増幅しつつ出力蛍光面に集束発光させることで、入力中性子イメージを可視画像に変換する真空管を本体とする。NII を用いた撮像システムは、その出力可視画像をレンズ等光学系とカメラを組み合わせることで遠隔撮影する装置になる[1,2]。

NII 本体の真空管は X 線用として開発されてきた。主に動画カメラと組み合わせた X 線テレビシステムとして医療で多く活用されている。中性子用とするために、NII に関しては、X 線用と異なる反応膜の開発やパルス中性子源に適用させるための残光時間の短い出力蛍光面の開発並びに高速カメラの開発が報告されている[3,4]。これらラインナップされている NII では、異なる種類のカメラ (一眼レフ、高速カメラ、動画カメラ等) に対応させるために中性子用の遮蔽容器が大きく、現場に簡便に持って行き撮影するのは難しい状況である。また低フラックス環境での中性子撮影では、

暗闇で撮影するカメラと同様に露光時間を長くするか撮影枚数を多くして積算することが必要となる。長時間での露光撮影や高感度設定でのデジタルカメラ撮影の場合、放射線により発生するノイズの他に特に長時間ノイズや高感度ノイズについても考慮しておく必要がある。本報では、NII システムを移動使用可能なように小型化するとともに、長時間の撮影でもノイズが少なく安定した撮影ができるようにしたシステムの開発について紹介する。

2. デジタルカメラの選定とノイズ

NII に使用するカメラの選定は、NII の出力蛍光面が円形であることを考慮し、最大の有効視野を確保するためにカメラ撮像素子の横と縦の視野構成比率 (画面構成比) を 1:1 で、かつ現状のハイビジョン 207 万 3600 画素以上、60fps 以上の転送速度が可能なカメラを検討した。また、カメラ撮影を遠隔で操作並びに表示するため、通信速度が速く、映像と操作が 1 本のケーブルで対応できる USB3.0 規格のカメラということも条件とした。従来システムに搭載の高画素一眼レフタイプやミラーレス一眼レフタイプも遠隔操作での画像伝送には USB3.0 接続であるが、パルス毎の積算測定に対応できるようバルブ撮影の 16bits/枚ではなく、画像を積算して演算処理後の階調数を確保できる

ことを考慮すると、小型の監視用動画カメラが適当である。そのため、取り込みソフトも 32bits 化してダイナミックレンジを確保するようにして工夫している。今回、小型で USB3.0 接続ができ、視野が 1:1 の正方で 419 万画素、最大 90fps のカメラ (A タイプ) と、A タイプを使った開発中に新たに発表された 501 万画素、最大 75fps のカメラ (B タイプ) を用いて試験と組み込み設計を実施した。

デジタルカメラは、光が撮像素子 (CCD や CMOS) に当たると電子が発生し、蓄積された電子が電子回路で信号に変換され読み取られて画像になる。長時間露光する場合、撮像素子が通電の熱で余計な電子を発生させる。暗電流 (ダークカレントまたは単にダークという場合もある) ノイズとも言われているもので、画面上に輝点として現れる。又、アンプノイズや熱カブリと言われていたノイズも電子回路の発熱から発生し、モニター上では画面全体のバックグラウンドとしてピンク色に現れる。高感度ノイズは、暗い画像に対してデジタルカメラの ISO 感度またはゲインを上げることによって発生するノイズで、一般のデジタルカメラでは暗い被写体を短い時間で撮影する場合に有効となるが、画像全体がザラザラとした荒い画像となる。長時間撮影と合わせると特に暗電流ノイズが目立つようになる。以上のノイズに対してカメラ自体にノイズをキャンセルさせるノイズリダクション機能を搭載しているカメラも多く見られる。特に暗電流ノイズはカメラ固有にはなるがノイズには規則性があり、同一条件 (温度、露出または露光時間、ISO 感度またはゲイン) で撮影すると同じ場所にノイズが発生する。従って、この特性を利用してシャッターを閉じた状態の同一条件で撮影してノイズ画像を引き算処理 (暗電流補正とかダーク補正とも呼ばれる) することでノイズを低減できる。但し、この場合撮影時間は 2 倍になる。同じ設定で繰り返し撮影する場合には、一回暗電流補正用のデータを撮影して常に補正することで効率化できると考えられるが、使用開始時と長時間使用時でカメラ自身の温度が上昇して同一条件の撮影とならない場合は処理が有効にならない。即ち、アンプノイズや熱カブリの現象でノイズのパターンが異なる画像となり、引き算が有効にならなくなる。そのため、カメラの温度を一定に確保することが重要となる。

以上のノイズに関する課題は天体写真用のカメラで同様に検討されており、最近のデジタルカメラでは撮像素子の種類や回路構成、画像処理エンジンや映像エンジンと呼ばれる処理の進化で高感度ノイズが低減してきている。但し、これらの画像処理では演算によりダイナミックレンジが狭くなることに注意が必要である。

カメラノイズの低減で共通する注目点はカメラの温度である。天体写真用の長時間撮影用カメラとしては冷却型 CCD カメラなどが利用されている。NII 用としての冷却型カメラは、高価である

こととカメラ素子の進歩が速く新機種への対応が難しいことから、今回のシステムでは一般の監視用カメラを用いてカメラの特性を把握し、そのカメラに冷却機能をつけることで安定稼働の性能向上を図り、冷却前後の特性の変化を把握した。

中性子フラックスと測定時間の関係は、例えばフラックス $3 \times 10^6 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ 、30fps で動画撮影できていた場合に同様な 1 フレーム画像を得るためには、フラックス $3 \times 10^3 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ では単純計算として 1000 秒 (17 分) 照射する必要がある、フラックス $3 \times 10^2 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ では 10000 秒 (2.8 時間) 照射する必要がある。従来システムに搭載しているカメラは動画用カメラや高精細のデジタル 1 眼レフカメラ、高速カメラであり [3,4]、17 分間あるいは 2.8 時間露光する場合、1 眼レフタイプではその間バルブ撮影とすることになる。高速カメラでは、最大の露光時間を仮に 15 秒間とすると、17 分間は 67 枚の積算、2.8 時間では 667 枚分の画像積算が必要となる。ノイズ処理のためには、この測定時間中カメラの温度を安定に保つ必要があるということになる。

3. カメラの温度と暗電流画像

実際にカメラ A タイプを用いて、カメラに通電した状況下の温度特性と画像の輝度変化について測定した。Fig. 1 にこの状況を示す。ここでは、カメラ本体温度と室温を熱電対により温度測定ロガーで記録するとともに、カメラのレンズにキャップをして外部から光が入らない状態でカメラ露光時間を長くした画像を積算している。図中、モニター画面内の右側黒い■の画像はカメラの露光時間を 15 秒、温度が 14°C 程度で撮影を始めた状態の結果、左側のグレーの□ (実際はピンク色) の画像は同じ露光時間で本体温度が 35°C 近くの状態の結果である。カメラの動作開始からの温度変化の一例を Fig. 2 に示す。室温の状況にも依存しているが、カメラスイッチが入って 30 分程度で急激に温度が上昇し 35°C 近くまで上がっている。カメラの露光時間を 1 秒にしてゲインを上げ、1800 枚の画像積算し、1 回当たり 30 分の撮影を繰り返し、1 枚当たりの平均輝度値を RGB

Fig. 1. Temperature characteristics measurement situation and dark current images of the camera.

Fig. 2. Relation between temperature and elapsed time of type-A camera.

Fig. 3. Elapsed time dependence of dark current image of type-A camera.

成分の経過時間毎にプロットすると、Fig. 3 に示すように暗電流ノイズで輝度値が上昇している様子が確認される。カラーカメラを用いているため RGB 成分で $R > B > G$ の順に輝度が上昇していることがわかる。そこで、次にカメラ本体が冷却されるように熱伝導両面テープでペルチェ素子、熱伝導板を張り付けた。ペルチェ素子からの熱を受ける熱伝導板は、水冷式クーラー (Fig. 4(a)) あるいは空冷式クーラー (Fig. 4(b)) を用いて冷却する。この簡易な冷却システムを用いて、まずカメラ側を断熱樹脂で覆った状態でカメラに通電せず冷却性能を確認した。Fig. 5 に水冷式クーラーの結果、Fig. 6 に空冷式クーラーの結果を示す。共にペルチェ素子は 6A タイプを用い、印加電圧 5V、定常時電流 1.5A に固定して測定を実施した。室温は共に 24°C 程度であるが、Fig. 6 の空冷式クーラーでは微妙な室温変化に対してペルチェ素子側の冷却並びに放熱側の熱伝導板の温度が強調されて変化している状況が確認された。使用したユニットによる特性にも依存すると考えられるが、今回選択した 2 種類のクーラーでは水冷式タイプの方が安定し、冷却能力も高いことが確認された。この水冷式クーラーユニットの電圧・電流による温度特性を測定した結果を Fig. 7 に示す。測定に使用した安定化電源の最大電流が 3A のため、印加電圧

Fig. 4. Camera cooling systems.

Fig. 5. Peltier element cooling properties by the water-cooling system.

Fig. 6. Peltier element cooling characteristics of the air cooling system.

は 8V(2.48A) 迄となっているが、冷却面温度は -15.3°C、温度差 40°C となった。6A タイプのペルチェ素子の最大使用電圧は 15.4V、最大温度差 66°C となっており、更に裕度はあるが、放熱側の冷却性能をあげることが必要となる。

次に、実際にカメラと冷却ユニットペルチェ素子の印加電圧 5V(1.5A) で動作させ、カメラ温度と暗電流画像の関係を測定した結果を Fig. 8 に示す。最初、冷却ユニットを停止した状態から開始して温度 35°C を超えたところで冷却ユニットを On-OFF させ、●印のポイントで温度と露光時間 15 秒の画像を取得した。取得した画像は、37°C の 8 ビットの輝度値 250 階調を超えた白い画像からカメラ温度が下がり、グレーの画像 (実際はピンク色)、ノイ

Fig. 7. Voltage-current characteristics of the Peltier element.

Fig. 9. Relationship between dark current image and temperature of type-A camera.

Fig. 10. Dark current images and temperature dependence of the type-B camera.

ズが減ってグレーから黒い画像に変化していく状況が確認される。この結果をカメラ温度と画像輝度値の関係として Fig. 9 に示す。

次に、A タイプのカメラの特性を評価中に発表された、新たな B タイプのカメラについても Fig. 1 同様にカメラ温度の特性変化を測定した。Fig. 10 のモニタースクリーン内の右側上の ■ 画像はカメラの露光時時間を 15 秒、温度が 10°C、左側の白いノイズのある ■ 画像は同じ露光時間で温度が 37°C の結果である。カメラ温度が高くなるとノイズは増えるものの、A タイプのカメラと比べて圧倒的にノイズ成分が少ないことがわかる。また、Fig. 9 と同様にカメラ温度と画像輝度値の関係を測定して A タイプと比較した結果を Fig. 11 に示す。ペルチェ素子印加電圧 5V(1.5A)で 15°C以下にす

Fig. 8. Dark current images and temperature dependence of Type-A camera.

Fig. 11. Temperature characteristics of the type-specific cameras.

るとカメラ A では暗電流ノイズの輝度が約 1%以下に、カメラ B では 20°Cでも暗電流画像は 0.1%以下に抑えられることを確認した。

4. NII のカメラ並びに冷却ユニット組み込みと撮影結果

次に遮蔽を考慮した新しい NII 撮影システムの設計、製作について記す。9 インチの入力窓を持つ NII を使用する場合、最初に出力蛍光面に内接する正方視野となるカメラまでの光学寸法を求める。特に装置に組み込むためできるだけコンパクトにまとめられるように出力蛍光面からカメラまでの距離を短くすることが望まれるが、実際に設置する場合の遮蔽やレンズ並びにミラー等の寸法を考慮して、レンズ光学系を検討した。カメラは直接中性子に照射されずに遮蔽できるようにするため、ミラーで L 字に曲げて遮蔽できるように工夫している。光学系や遮蔽材などとともに冷却ユニットを組み込み、コンパクトにハンドリングしやすいよう握りバーを付けた構造としている。Fig. 12 にカメラの組み込み構成並びに外観図を示す。全体を炭化ボロン 50%充填のエポキシ樹脂中性子遮蔽材で覆っている。試作して完成させた 9 インチ NII システム (左側) と、同様の概念で試作した 4 インチの NII システム (右側) を並べて Fig. 13 に

Fig. 12. Design drawings 9-inch NII system.

示す。

実際に上記構成で中性子による画像取得が可能か、北海道大学のライナック加速器施設を使用して仮組状態で試験した。この時点では装置に組み込むべき中性子遮蔽材を仮に北大所有のボロン入りの遮蔽材として装置を囲んでいる。Fig. 14 に遮蔽ブロックで覆って実験している状況（左下図）と撮影結果を示す。北大ライナック施設は、パル

Fig. 13. Overview of NII systems.

Fig. 14. NRG results at HUNS.

Fig. 15. Visual field switching NRG results.

ス中性子源で、最初に強いバーストガンマと呼ばれるX線が照射される。そのため、NIIの前にX線に対する鉛（Pb）等のフィルターまたは遮蔽材が無い状態では、Fig. 14 右上に示すサンプル中のASTM規格インジケータ[5,6]は、Fig. 14 (a)の様にバーストガンマによる映像が支配的となる。即ち、(a)図では縦2つの●の鉛ディスク（Pb disc）と、下部の鉛ステップ（Pb step）がはっきり見えている。(b)では鉛フィルターを10mm入れて撮影しているため、(a)の鉛部分が薄くなり、左側の縦2つの●となる窒化ボロンディスク（BN disc）が中性子により見えてきている。この状態で更にボロンフィルターを入れた画像が(c)であり、ビーム中の中性子を吸収することでベースとなる画像上のガンマ成分が確認される。そこで、(b)画像から(c)画像を差分することで中性子画像として(d)画像が得られる。この画像には鉛ディスクの影は無く、BN disc や Cd、アクリルステップ（Acrylic step）が鮮明に映っていることが確認できる。

次に、住重アテックス株式会社のサイクロトロン加速器中性子源を用いて、Fig. 12, Fig. 13 左図に示す試作完成した9インチNIIにより撮影した結果をFig. 15に示す。線源のターゲット電流15μA、コリメータのL/D=44、Biフィルター20mm、照射エリアの熱中性子強度は 1.5×10^5 n/cm²/s、NIIの入力面にPb板3mm挿入し、カメラの露光時間1.5秒、画像積算200枚の条件で撮影した。9インチNIIには視野切り替え機能があるので、Fig. 15には視野切り替え9インチ、7インチ、4.5インチの3モードで撮影した結果を示す。撮影サンプルは、携帯電話とASTM規格のインジケータとしている。撮影結果は全てサンプルの無いバックグラウンドデータでシェーディング補正を行っている。いずれも鮮明かつ濃淡のはっきりした中性子による画像を示しており、視野切り替えによる全体像と拡大像の効果もわかる。Fig. 16は、図中左下に示すコンクリート試験片にスポットで水を垂

Fig. 16. Water-drop NRG results on concrete test.

らした後の時間経過を撮影した結果である。図中上段左の画像は水を垂らす前、上段左から2番目以降上段右端まで時間経過順に並んだ画像である。この上段の各画像はサンプルの無いバックグラウンドの画像 (BG) で割り算してシェーディング補正を行っている。下段の各画像は時間経過(a)左から(e)右の変化に伴う画像を割り算で求めた結果である。割り算の結果、水分のみが強調されて画像に残っており、時間とともに滴下地点の中心にあった水が周りに広がり、最終的には蒸発あるいは全体に薄く浸透して見えなくなっている。つまり、

水の移動、広がり、蒸発の状況を安定して評価できている。画面右下のコンクリートに滴下した水の動きに対して Fig. 17 には、点線枠の ROI を設定して輝度変化を測定した結果を示す。コンクリート上に水の無い輝度が平らな状況から水滴の広がり確認できる。また、時間変化とともに水滴を示す輝度の窪みの深さと幅が変化しており、水の移動も確認できる。この試験の中で、試作した NII システムの変動について約 50 分間連続して輝度変化を測定した結果を Fig. 18 に示す。この結果には、連続中性子源の安定性やイメージインテンシファイア本体の動作安定性、カメラの温度特性が含まれている。16bits の輝度変化の測定で 30302.5 ± 195 , $\pm 0.64\%$ の変動内で測定できていることを確認した。

Fig. 17. Measurement results of water-drop spread.

Fig. 18. Time variation measurement result of the 9-inch NII system piece.

5. おわりに

従来の NII は、RGB の感度特性を変えることのできるマルチカラーシンチレータを NII の出力蛍光面に使用し、カラーカメラと組み合わせ、モニターに表示できる 8bits でダイナミックレンジ広く撮影できる装置として、主に動画カメラ用に開発されてきた。少ない中性子フラックスでのイメージングでは、撮像装置は感度が高く高精細な画像を安定して取得することが要求され、天体写真用のカメラと同様に長時間の露光や画像積算による撮影が必要となる。そのため、従来の 8bits カメラ自体のダイナミックレンジを 16bits に拡張したり、積算・演算したりするため 32bits に撮影ソフトを拡張する必要もある。特に長時間撮影や積算画像の演算では、ベースとなる撮像素子の安定性が欠かせず、温度特性が非常に重要となる。特に暗電流による画像は温度特性の影響を大きく受け、使用する環境の影響を大きく受ける。本試作を通してそれらの影響を受けにくく安定して動作させることが可能な NII システムを開発することができた。カメラの撮像素子の高精細化や高感度化が日進月歩で進んでいる中、今回取り上

げた条件を含め様々な条件を勘案した最善のカメラの選定が重要となってくる。今回の開発中にも新たな素子を組み込んだカメラのアナウンスもあり、その特性も大きく向上していた。広視野かつダイナミックレンジの広い NII の優れた特性を活用するため、今後更に発展していく撮像素子に対しても対応し、撮像の適用範囲の拡大を進めたい。

謝辞

本稿のうち、2 章、3 章、4 章の一部は文部科学省研究成果最適展開支援プログラム A-STEP による「小型定常中性子源を用いた中性子透過画像」の成果です。4 章の 9 インチ NII システムの製作は JSPS 科研費 JP17H03515 の成果です。4 章の 4 インチ NII システムは文部科学省原子力システム研究開発事業「次世代原子炉燃料の健全性評価のための非破壊分析技術の開発」の成果です。

参考文献

- [1] K. Nitttoh, C. Konagai, T. Noji, K. Miyabe, Nucl. Instr. And Meth. A **605**, 107-110 (2009).
- [2] 日塔 光一, 波紋 **22**, 322-328 (2012).
- [3] K. Nitttoh, C. Konagai, M. Yahagi, Y. Kiyanagi, T. Kamiyama, Physics Procedia **69**, 177-184 (2015).
- [4] K. Mochiki, K. Ishizuka, K. Morikawa, T. Kamiyama, Y. Kiyanagi, Physics Procedia **69**, 143-151 (2015).
- [5] ASTM Designation: E545-91 (1991) “Standard Method for Determining Image Quality in Direct Neutron Radiographic Examination”.
- [6] RISO-M-2356 Riso National Laboratory (1982) “Standardization Activities of the Euratom Neutron Radiography Working Group”.