

## イメージを写す I (CCD 検出器)

上杉健太朗 勸高輝度光科学研究センター  
E-mail : ueken@spring8.or.jp

竹内晃久 勸高輝度光科学研究センター  
E-mail : take@spring8.or.jp

星野真人 勸高輝度光科学研究センター  
E-mail : hoshino@spring8.or.jp

### 1. はじめに

CCD (Charge coupled device, 電荷結合素子) を利用した X 線用 2 次元検出器は、今日、放射光利用研究において、X 線イメージング、単結晶・粉末構造解析、小角散乱などの幅広い分野で普及しているだけでなく、ミラー・分光器などの光学系調整時でも利用されるようになってきました。同じ X 線用 2 次元検出器である、イメージングプレート (次号予定) や写真乾板などと異なり、ほぼリアルタイムで画像化できるのが最大の利点でしょう。

CCD 撮像素子を利用した X 線検出器には様々な方式があり、性能にも幅があります。撮像法の種類や性能を熟知したうえで、対象とする計測法には、どのタイプが最も適しているかを判断することはたいへん重要です。

本稿では、まず、第 2 章で CCD 検出器の概要を示し、第 3 章で CCD 撮像素子について解説します。第 4, 5 章で、二つの X 線撮像法、すなわち、間接撮像型 (間接 X 線カメラ、ここでは特に可視光変換型) と直接撮像型 (直接 X 線カメラ) について説明します。第 6 章では、間接 X 線カメラ、直接 X 線カメラの使用例を、最後に直接 X 線カメラのカラーカメラへの応用例を紹介합니다。

### 2. CCD 検出器の概要

#### 2.1 CCD 検出器の基本構成

CCD 検出器は一般に、可視光光学系・CCD 本体・データ処理系 (通常は PC) で構成されます (Fig. 1)。可視光光学系は、カメラレンズや光ファイバーです。X 線用カメラではその前段に可視光変換用の蛍光面が挿入されるタイプもあります。CCD 本体は撮像素子や A/D 変換回路等で構成されます。撮像素子の写真を Fig. 2 に示します。画素サイズ  $6\ \mu\text{m}$ – $20\ \mu\text{m}$  程度、画素数は  $640 \times 480$  から  $2000 \times 2000$  の素子が多く利用されています。最近では  $1000$  万画素を超えるような高精細 CCD カメラの利用も増えています。CCD カメラからの信号はデジタル信号としてデー

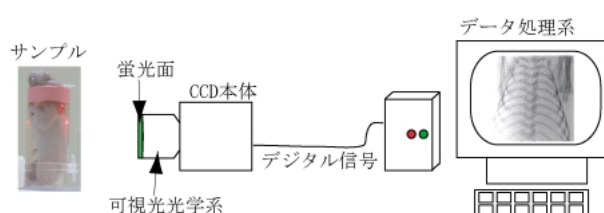


Fig. 1 一般的な CCD 検出器の構成。例として間接 X 線カメラを挙げている。この場合、可視光光学系の前段に蛍光面が設置されている。

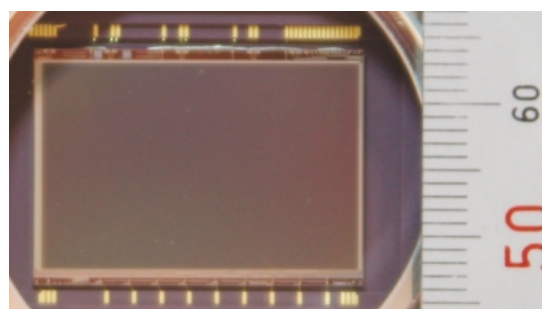
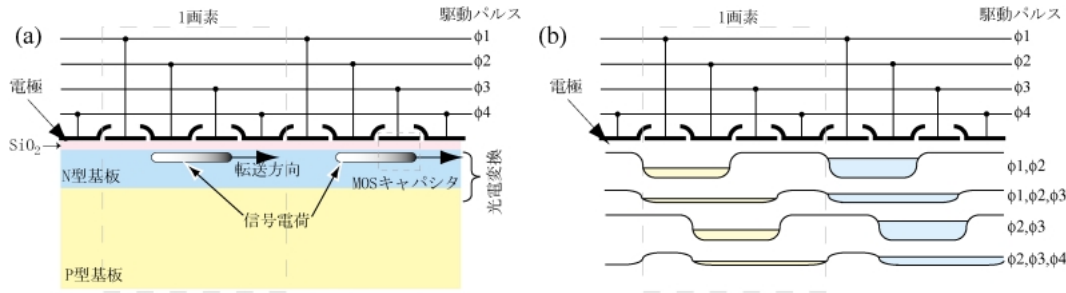


Fig. 2 CCD 撮像素子の正面写真。Sony 製 ICX263AL。画素サイズ  $5.9\ \mu\text{m}$  四方・有効画素数  $4000 \times 2624$ 。

タ処理系に転送されます。データ処理系では、デジタル信号の取り込み・表示などを行います。

#### 2.2 X 線用カメラの撮像方式と特徴

X 線のイメージを CCD 撮像素子を使って計測する場合、その撮像方式には、間接撮像型 (間接 X 線カメラ) と直接撮像型 (直接 X 線カメラ) があります。このうち、間接 X 線カメラは、X 線を蛍光面で可視光に変換し、それを可視光光学系を介して CCD 撮像素子で観測するタイプです。可視光光学系には、ファイバーカップルとレンズカップルがあります。一方、直接 X 線カメラはその名の通り、可視光光学系がなく、X 線を CCD 撮像素子で直接検出するタイプです。



**Fig. 3** (a) 4相 CCD の構造と信号電荷の移動の模式図 (側面から見た図)。(b) 電極の下に出来る potential well とその中に溜められている信号電荷の模式図。駆動パルスを適切に与えることにより、potential well の深さが段階的に変わる。信号電荷はその中を移動していく。ここでは、4相 CCD を示したが、このほかにも 2 相や 3 相のタイプもある。

間接 X 線カメラと直接 X 線カメラそれぞれの主な特徴は以下のようになります。まず、間接 X 線カメラの特徴として、(1)放射線損傷に強い。(2)像の拡大・縮小等の取り扱いが容易。(3)CCD カメラとの組み合わせ方により検出器としての特性を変えられる。などがあげられます。一方、直接 X 線カメラは、(1)MTF (4.3.3参照) の応答や感度が良好。(2)微弱光測定で威力を発揮する。(3)一定条件下でエネルギー分解ができる。などの特徴があります。個々の特性の詳細は第 4 章、および第 5 章で解説します。

### 3. CCD 撮像素子<sup>1)</sup>

カメラを選ぶ際には撮像素子の性能を知ることが重要です。CCD 撮像素子の仕様書は各メーカーが公開しており、基礎知識をもって調べましょう。この章では、その基本的知識について示します。

#### 3.1 動作原理

CCD 撮像素子の基本的な動作について解説します。CCD 撮像素子上でなされている動作は大まかに言うと、光電変換・電荷蓄積・電荷転送・信号出力の 4 つです。

光電変換はシリコンのバンドギャップ約 1.1 eV よりも高いエネルギーを持つ光子 (波長 1130 nm 以下) に対して起こります。このことから可視光だけでなく X 線によってもシリコン中で光電変換が起こることが分かります。

**Fig. 3** に CCD の構造と電荷転送の模式図を示します。光電変換により発生した信号電荷は MOS (metal oxide semiconductor) キャパシタの電極近傍に形成している potential well に蓄積されます。蓄積された電荷は受光部から、信号出力部に向かって転送されていきますが、この転送を CCD が担います。**Fig. 3(a)** に示すように MOS キャパシタを形成している電極がオーバーラップして並べられているため、**Fig. 3(b)** のように  $\phi 1 \sim \phi 4$  の駆動パルスを順番に与えると、蓄積されていた電荷は potential well が相対的に低くなる方向に流れます。このような転送が繰り返され、電荷検出および信号出力部であるフローティング・ディフ

ュージョン (FD) アンプ<sup>†</sup>を通して信号出力が行われます。各画素からの信号出力手順は以下の通りです。まずリセットゲート (RG) を開き、FD アンプをリセットドレイン (RD) の電圧 (例えば DC12V) にリセットします。RG を閉じた後、出力ゲート (OG) が開き信号電荷が FD アンプに転送されると、FD アンプに電圧変化が起こります。この電圧変化を撮像素子からの信号として出力します。

CCD 撮像素子の種類は、転送方式、照射面の違いによって、大きく分けられます。以下に (3.2) 転送方式、(3.3) 照射面の違いについて解説します。

#### 3.2 電荷転送方式

CCD 撮像素子の電荷転送方式はいくつか存在しますが、本稿ではそのうち (3.2.1) フルフレームトランスファー型と (3.2.2) インターライントランスファー型について解説します。

##### 3.2.1 フルフレームトランスファー型

CCD 撮像素子を表面から見た模式図を **Fig. 4(a)** に示します。この方式では CCD が光電変換と信号電荷の蓄積を担い、そのまま (垂直) 電荷転送を行います。画素中に複雑な構造がないため、後述のインターライントランスファー型に比べると、蓄積電荷量が多いのが特長です。垂直転送時に光が照射されると、垂直転送方向にストリーク (輝線) が現れてしまうので、転送開始前にメカニカルシャッターにより光を遮断することが必要です。

##### 3.2.2 インターライントランスファー型

**Fig. 4(b)** に模式図を示します。広くビデオカメラなどで用いられており、現在最も多く用いられているタイプです。この方式では、光電変換と電荷の蓄積はフォトダイオードで行い、転送は CCD が受け持つこととなります。

<sup>†</sup> 周辺回路から電氣的浮遊状態にあり、信号電荷を電圧に変換するキャパシタと発生した電圧を出力するアンプで構成されている。

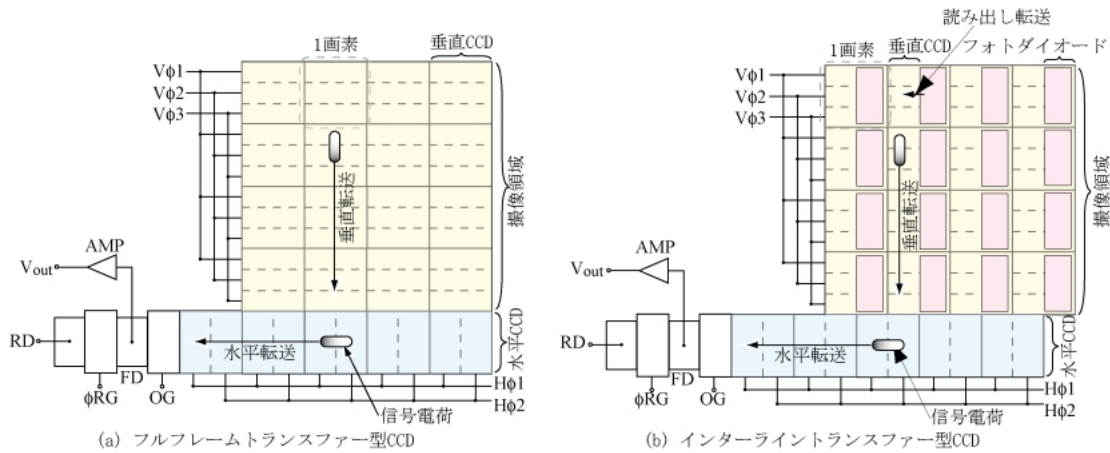


Fig. 4 フルフレームトランスファー型 CCD とインターライントランスファー型 CCD の模式図。どちらも垂直転送は 3 相 CCD で水平転送は 2 相 CCD。

実際は蓄積が終わった時点で、すべてのフォトダイオードから同時に垂直 CCD に電荷転送を行い、その後全画素読み出しのための垂直および水平転送を順次行います。この間フォトダイオードは次の光電変換と電荷蓄積を行うことができます。転送用の CCD を遮光しているためメカニカルシャッターは不要です。

ただし、画素の構造が複雑なため、フルフレームトランスファー型に比べて、最大蓄積電荷量 (= 飽和電荷量) が少なくなる傾向があります。また、画素の一部が転送用 CCD として遮光されているため、開口率が低くなっていますが、撮像素子上にマイクロレンズを配置することにより、開口率の低下を防ぐ事も出来ます。

### 3.3 正面照射と背面照射

Fig. 3 に示されているように、撮像素子の前面を転送電極が覆っていますが、これらは透明な導電材料を用いた薄膜などで形成されているため、ある程度の光は透過します。しかし、可視光の短波長側では、電極などによる透過率低下が深刻な問題になります。短波長側まで高い変換効率を確保したい場合は、「背面照射 (Back illumination)」という方式が使われます。これは、Fig. 3 の下側から基板を削り込み、撮像素子の背面から光を入射させるものです。これに対して Fig. 3 上側から光を取り込むタイプを正面照射 (Front illumination) 型と呼びます。多くの市販の CCD 撮像素子では、正面照射型と背面照射型の両方がリリースされており、用途によって選択できます。

### 3.4 主な機能と注意点

CCD 撮像素子が備えている代表的な機能として、(1)電子シャッター、(2)ビニング、(3)アンチブルーミング、(4)ADC (analogue-digital conversion) について説明します。

(1) インターライントランスファー型の CCD カメラは、通常は電子シャッターという機能を持っています。こ

れはメカニカルシャッターの連続動作では実現できない、数十  $\mu\text{sec}$  というような露光時間を可能にします。電子シャッターは読み出し転送までの時間を逆算し、設定された露光時間だけ電荷蓄積が出来るように、電荷蓄積中のフォトダイオードを適宜リセット (後述のアンチブルーミング用の電極に高い電位をかけて電荷を強制排出させます) することで実現しています。

(2) 解像度と引き替えに感度を向上させる方法として、ビニングと呼ばれる手法があります。これは隣り合う画素の信号電荷を加算して取り出すことにより実現されます<sup>2)</sup>。通常読み出しの場合は垂直転送を 1 回行ったあと水平転送を横の画素数分繰り返しますが、1 回の水平転送毎に FD アンプをリセットして信号電荷を読み込んでいきます。これに対して隣り合う  $2 \times 2$  画素分を扱う  $2 \times 2$  ビニングの場合は、垂直転送を 2 回行った後に水平転送が始まります。さらに、水平転送 2 回に対して FD アンプのリセットを 1 回行うことで、FD アンプ上で信号電荷を積算することが出来ます。これにより、4 画素分の信号電荷に対して 1 回分の読み出しノイズだけがかかることになり、S/N が 4 倍になります。ちなみに、全画素を読み出した後に、 $2 \times 2$  ソフトウェアビニングを行うと、S/N は 2 倍にしかありません。

(3) 単純な作りの CCD 撮像素子に強い光が入ると、垂直転送 CCD の容量に入りきれない信号電荷が potential well からあふれ出し、垂直転送の方向に強いストリークを発生してしまいます。つまり 1 点に強い光が入っただけで、その画素が属する垂直転送部に影響が及んでしまうのです。これを防ぐ機能がアンチブルーミングです。これは Fig. 3 (a) の基板の最下段に転送とは別の potential well を形成し、あふれた電荷を捨ててしまうことにより実現されます。この機能は長時間露光と短時間露光を組み合わせた、擬似的にダイナミックレンジを広げるような撮影を行う際に有効です。しかし、この機能を持つ場合、信号電荷

Table 1 SPring-8 BL20B2 で利用可能な CCD カメラ (すべて浜松ホトニクス社製)

	C4880-41S	ORCA II-ER	C4880-10-14A	C9300-02	C9300-201
画素サイズ	5.9 $\mu\text{m}^2$	6.45 $\mu\text{m}^2$	12 $\mu\text{m}^2$	8 $\mu\text{m}^2$	7.4 $\mu\text{m}^2$
フォーマット	4000×2624	1344×1024	1000×1018	1000×1000	640×480
飽和電荷量	13000 electrons	18000 electrons	60000 electrons	70000 electrons	20000 electrons
ADC*	12 bit/14 bit	12 bit/14 bit	10 bit/14 bit	14 bit	12 bit
素子タイプ	IT, ML	IT, BI, ML	FFT	EM, FT	IT
フレームレート*	1.7 Hz/0.1 Hz	6.0 Hz/0.86 Hz	7 Hz/0.25 Hz	30.1 Hz	82 Hz/150.6 Hz
読み出しノイズ	5 electrons	4 electrons	15 electrons	10 electrons	20 electrons
冷却温度	-50°C	-60°C	-50°C	-50°C	室温

\*Fast scan と Slow scan モード。読み出しノイズは Slow scan 時。

注釈：IT: Interline transfer, FFT: Full frame transfer, FT: Frame transfer, BI: Back illumination, ML: Micro lens, EM: Electron multiply

が多い領域では、線線性が落ちるので、十分注意しなければなりません。

(4) CCD 撮像素子のダイナミックレンジは、画素サイズや構造で決まる飽和電荷量を読み出しノイズで割った値となります。例えば、Table 1にあるC4880-10-14Aという機種の場合、飽和電荷量は60000e<sup>-</sup>で、読み出しノイズは15e<sup>-</sup>です。したがってダイナミックレンジは4000となります。単純に考えると信号電荷を画素値に変換するためのADCは12 bitで良いのですが、暗電流や固定ノイズなどが入る事などを考慮し、14 bitのADCを選択しているようです。まれにCCDカメラ製品で撮像素子のダイナミックレンジに対して極端に大きなbit数のADCを搭載している機種を見かけますが、データがいたずらに増える以外特に意味はありません。

## 4. 可視光変換型 X 線画像検出器 (間接 X 線カメラ)

### 4.1 概要と特徴

可視光変換型 X 線画像検出器 (間接 X 線カメラ) の基本構造は、蛍光面・可視光光学系 (ファイバーカップルあるいはレンズカップル)・CCD 撮像素子の組み合わせです。可視光変換ユニットを介さない直接撮像型 X 線画像検出器 (直接 X 線カメラ) と比べた時の間接 X 線カメラの具体的なメリットは次のようになります。

(1) 放射線損傷に強い (CCD への直接照射線量が少ない)。これは放射光施設で利用する際には重要な特性です。後で示すように、L 型光学系を持つレンズカップル式の場合、SPring-8 のアンジュレータービームラインにおいて光子数が  $10^{13}$  photons/mm<sup>2</sup>/sec 以上の単色 X 線の観察にも使われています。ただし、あまりに長時間の連続照射を行うと、蛍光面に焼き付きが発生し、画像計測を行う上で支障が出てしまいます。この場合は蛍光面だけ交換すれば新品同様に生まれ変わります。また、白色 X 線を利

用するビームライン (例えば、SPring-8 BL04B1) では、ミラーなど光学系からの高エネルギーの散乱 X 線により CCD 素子と周辺回路が破壊されてしまったこともあります。このように回路系への放射線損傷が予見される場合は、散乱 X 線が撮像素子に到達しないように鉛ガラスを挿入しておいたり、CCD に向かってくる散乱 X 線が少なくなるような配置を採ったりするなどの対策を施しておくといでしょう。ファイバーカップル式の場合も、直接 X 線カメラに比べると桁違いに高い耐放射線特性を持ちますが、ダイレクトビームの照射ではファイバーが着色してしまう可能性がある上に、その交換が容易ではありません。したがって、ダイレクトビームを利用した X 線イメージングよりは、回折光を捉えるための検出器として利用するほうが適しているでしょう。

(2) X 線画像を可視光に変換することにより、像の拡大や縮小などの取り扱いが容易。通常利用可能な CCD 撮像素子の画素サイズは  $6\ \mu\text{m}$ - $20\ \mu\text{m}$  程度です (視野はその 1000-2000 倍程度)。そこで X 線画像を可視光に変換し、可視光光学系で拡大あるいは縮小してから CCD 撮像素子に投影することによって実効画素サイズが可変になります。X 線に比べて技術が確立している可視光光学系により、簡便かつ安価に分解能  $1\ \mu\text{m}$  程度までの高分解能イメージングが可能になります\*。同様に、縮小光学系を導入すれば広視野測定も可能です。しかし、視野が 50 mm 角以上になる場合は、それに対応するためのレンズ系が巨大かつ複雑になるためレンズカップル式よりもファイバー光学系でコンパクトにまとめることが出来るファイバーカップル式の方が適していると言えます。

この拡大縮小系は、特に、画像計測を行う上で非常に重

\* 更に細かい構造を観察するために、後述の使用例 (6.2) のように、X 線用の結像レンズを使って像を拡大する X 線結像顕微鏡や、レンズを使わずに画像処理によって高解像度の画像を得られる X 線回折顕微鏡などが開発され、実用化されている。これらの手法により検出器の空間分解能を補うことが出来る。

要なポイントになります。その一例を紹介します。一般に、X線カメラを使って被写体のX線透過像を得る方法には、被写体の直後にカメラを置く密着法と、微小光源からの発散光を利用し、被写体とカメラの距離を離して像を拡大する拡大投影法の2種類あります。両者を比べると、分解能がほぼ検出器の画素サイズと同じ程度に制限されてしまう密着法より、拡大投影法の方が高い分解能が得られそうですが、拡大率を上げるためにカメラを試料から離せば離すほど、試料によるX線の回折で像がボケるため、必ずしもそうはなりません。つまり、回折などの影響が少ない高品質な画像計測を行うには密着法が適していることとなります。放射光を使った実験の場合、ダイレクトビームを利用した観察のほとんどは平行照明だと考えて差し支えありません。これら二つのことから、X線画像の空間分解能を向上させるには、X線カメラの実効画素サイズを、カメラの拡大縮小光学系を用いて小さくし、密着法に近いセッティングをすることが最良といえます。

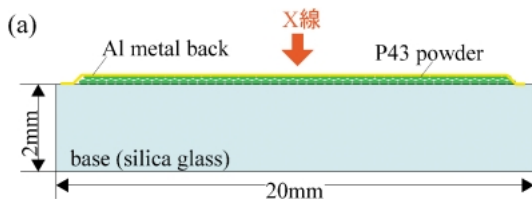
(3) CCDカメラの組み合わせ方により、検出器としての特性を変えられる。これは(2)とも密接に関わってくるのですが、高速化・高精細化などもCCDカメラを交換することである程度対応できます。SPring-8 BL20B2では、Table 1にまとめたようなCCDカメラを揃え、様々な共同利用実験に対応しています。

#### 4.2 蛍光面

可視光変換の際に用いられている蛍光面は用途により複数存在します。代表的な材料とその特性をTable 2にまとめました。ほとんどすべての間接X線カメラには粉末のP43( $Gd_2O_3:S:Tb^{3+}$ )が用いられています。これは、現在手に入れられる蛍光面のうちで最大の発光効率をもつため

Table 2 蛍光体のパラメーター

	LSO	P43	YAG
組成	$Lu_2SiO_5:Ce^{3+}$	$Gd_2O_3:S:Tb^{3+}$	$Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$
密度	7.4 g/cm <sup>3</sup>	7.3 g/cm <sup>3</sup>	4.5 g/cm <sup>3</sup>
発光波長	420 nm	545 nm	530 nm
減衰時間	40 nsec.	1-2 msec.	300 nsec
形状	単結晶	粉末( $\phi 1 \mu m$ )	単結晶・粉末
厚さ	10 $\mu m$ -20 $\mu m$	8 $\mu m$ -50 $\mu m$	10 $\mu m$ -200 $\mu m$



です。ただし、1  $\mu m$  程度の空間分解能が必要な場合に限り、単結晶のLSO( $Lu_2SiO_5:Ce^{3+}$ )が用いられています。PET (Positron emission tomography) 用の検出器として知られているLSOですが、密度の高さや劈開性が無いという特長はX線に対しても有効で、高空間分解能観察用に10  $\mu m$  程度に薄く研磨して利用されています。

Fig. 5にはレンズカップル式で用いられている蛍光面の様子を示しました。P43はシリカガラスの上に沈着されており、光量を稼ぐためにその上からアルミ蒸着が施されています (Fig. 5(a))。P43はX線光軸上に接着剤などの放射線損傷に弱い材料が無いため、耐放射線性に優れており、 $10^{14}$  photons/mm<sup>2</sup>/secの単色X線を連続1時間以上照射しても、変化が見られない程です。一方でLSOはアモルファスカボンの板に接着剤(紫外線硬化樹脂)で貼り付けられており (Fig. 5(b))、過度なX線照射を行うと、接着剤が分解しその影響で蛍光面にひびが入り使用不能となってしまいます。

Table 2にも挙げていますがP43は他の蛍光面に比べると減衰時間が1-2 msecと若干長めです。これは500 Hz以上の速度での観察が出来ないことを示しています。より短い時間の観察が必要な場合は、YAG( $Y_3Al_5O_{12}:Ce^{3+}$ )の粉末を用いる事が出来ますが、同じ厚みのP43と比較すると、約1桁落ちの発光量となります<sup>3)</sup>。

#### 4.3 可視光光学系

##### 4.3.1 レンズカップル式<sup>4)</sup>

レンズカップル式は、間接X線カメラの中でももっと

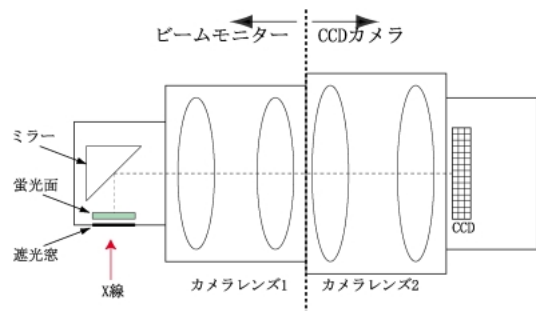


Fig. 6 レンズカップル式間接X線カメラの模式図。ここでは便宜上、蛍光面から初段のレンズまでの可視光変換ユニットを「ビームモニター」それ以降を「CCDカメラ」と呼ぶことにする。

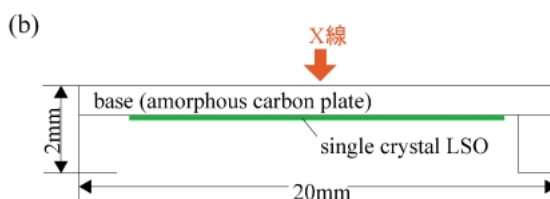


Fig. 5 蛍光面の模式図。(a)粉末状 P43 蛍光面。(b)単結晶 LSO 蛍光面



Fig. 7 可視光変換ユニット「ビームモニター」(浜松ホトニクス製 AA40P (f=2.4mm))・「CCD カメラ」(同社製 ORCA II-ER (f=35 mm)) の組み合わせ。SPring-8 BL20B2 に設置された様子。

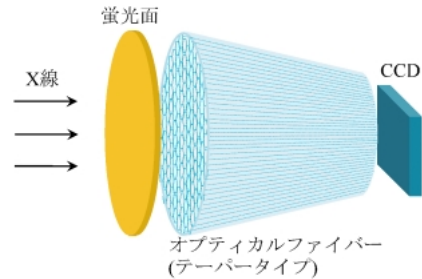


Fig. 8 ファイバークップル CCD カメラの模式図。実際はお互いの隙間は存在せず、透明な接着剤などできれいに張り合わされている。

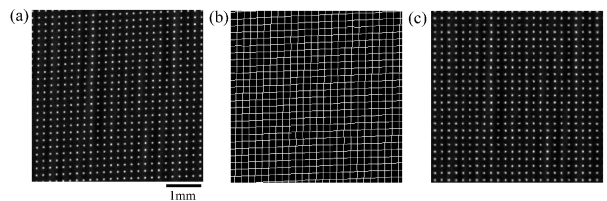


Fig. 9 (a)歪み測定用パターンの透過像。(b)(a)から作成した歪みグリッド。(c)画像歪み補正後の透過像。

も自由度が高く、X線イメージング実験に多く利用されています。

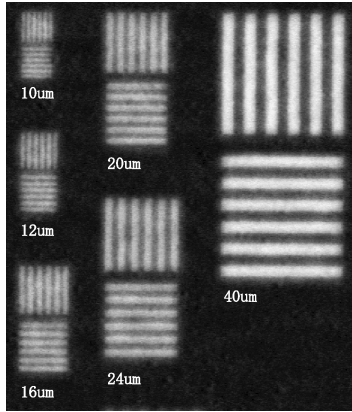
Fig. 6 に構造の模式図を示します。まず、X線の強度分布が薄膜蛍光面に投影されます。次に蛍光面の発光をタンデムレンズ系あるいは顕微鏡用の対物レンズで CCD に結像させます。ただし、レンズや CCD 撮像素子に直接 X線が照射されないように、出来るだけ蛍光面の直後にミラーを配置した L 型光学系を採用しています。空間分解能を上げるために顕微鏡用の対物レンズを用いる場合は、ミラーの前に対物レンズが入り、カメラレンズ 1 と 2 は取り除かれます。ビームラインに設置した写真を Fig. 7 に示します。

#### 4.3.2 ファイバークップル式<sup>5)</sup>

ファイバークップル式 X線カメラは、蛍光面と CCD 撮像素子の間にオプティカルファイバーを装着しています (Fig. 8 参照)。蛍光面に入射した X線は可視光に変換され、ファイバーにより CCD 撮像素子上に導かれます。SPring-8 BL20B2 で使用しているファイバークップル式 CCD カメラ (C9300-124F21, 浜松ホトニクス) の場合、蛍光面として厚さ 20  $\mu\text{m}$  に積層した粉末 P43 を用いています。ファイバーの縮小率は 1.8 倍なので、撮像素子の大きさ 36 mm (H)  $\times$  24 mm (V) に対して、撮像素子の面積よりも広い 65 mm (H)  $\times$  43 mm (V) での撮像が可能となります。この場合、撮像素子の画素サイズ 9  $\mu\text{m}$  に対して実効画素サイズは 16.2  $\mu\text{m}$  となります。なお、検出器の入力面には、レンズカップル式と同様に可視光遮蔽用窓が装着されています。特徴として、変換効率の良い検出器ですが、

ファイバーや蛍光面の交換は出来ないため、拡大・縮小率が固定であるなど、検出器としての自由度は低いです。また、長時間の露光によりファイバーへの着色が起こると、強度ムラとなって画像に現われます。これを軽減するには、X線シャッターを適宜利用し、検出器への照射線量を可能な限り減らすことが重要です。また、テーパファイバーが原因で、得られる画像には歪みが生じます。このため、定量測定への利用の際には歪み補正を行ってから画像処理を行います。この歪み補正について以下に詳しく説明します。

ファイバークップル式間接 X線カメラの画像歪みの例として、Fig. 9 に、縦横に等間隔 (ピッチ 200  $\mu\text{m}$ ) に並んだ歪み測定用テストチャートを撮影した画像を示します。Fig. 9(a) は、カメラによって撮影した生データです。この画像データを基に、各列各行のパターン位置を強度重心演算で求め、線形補間によってグリッド状に示したものが Fig. 9(b) です。この図を見ると、ファイバーに起因した像の歪みが、特に水平方向に顕著に現れていることが分かります。このまま画像処理を行うと計算結果にエラーを生じてしまいますので、最初に歪み補正をかけます。補正用テーブルは Fig. 9(a) のデータを用いて作成します。Fig. 9(c) が補正後の像で、パターンの直線性・均等性が回復されているのがわかります。ファイバーを CCD 撮像素子から取り外さない限り、両者の位置関係は一定なので、一度補正用テーブルを作ってしまうえば良いことになります。Rayonix や ADSC などの有名メーカーの場合は、出荷前に作成した補正データをシステムの中に組み込んでいます。特に生データを出力するという命令を実行しないと、



**Fig. 10** 分解能評価用テストチャート（電子線リソグラフィー方式により作成。NTT-ATN 製）の X 線画像（チャートの一部分のみ表示）。チャートの材質は Ta で厚みは約 1  $\mu\text{m}$ 。それぞれのチャートの下に書いてある数字はピッチで、線幅はその半分。検出器は AA40P（BM2,  $f=24\text{ mm}$ ）+C4880-41S ( $f=105\text{ mm}$ ) を用いた。蛍光面は粉末の P43 で厚みは 7  $\mu\text{m}$  程度。実効画素サイズは 1.37  $\mu\text{m}$ 。露光時間は 4 sec。照射 X 線エネルギーは 10 keV。

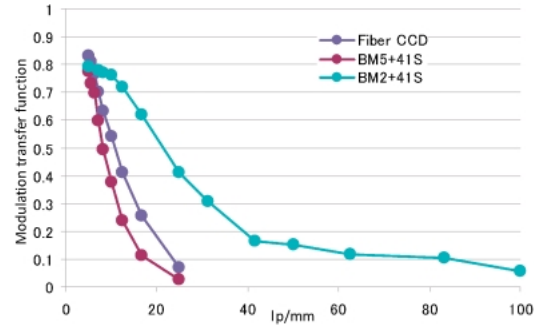
補正済みのデータのみ目にするようになります。

#### 4.3.3 レンズカップル式、ファイバーカップル式の性能比較

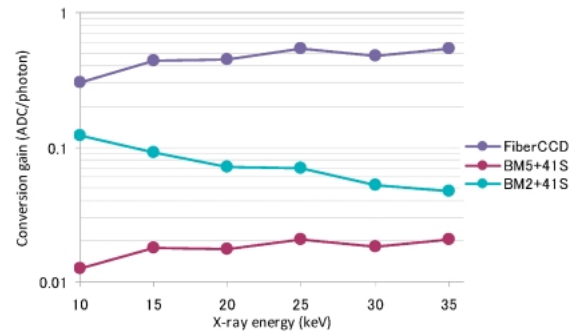
ここで、2つの可視光光学系について、性能比較をしてみます。一般に検出器の性能を表す要素として、空間分解能、変換効率、ダイナミックレンジ、読み出し時間などがありますが、これらのうち、(i)空間分解能および(ii)変換効率について比較します。

##### (i) 空間分解能

空間分解能を定量的に評価する手段として、変調伝達関数 (Modulation transfer function, MTF) があります。実験的には、様々なパターンピッチをもったテストチャートの像のコントラストを測定し、テストチャートの材質、厚さから計算できる理想的なコントラストとの比をプロットすることで求めることができます。**Fig. 10** に、比較的高空間分解能型のレンズカップル式検出器 (BM2+C4880-41S) で得られた MTF 測定用テストチャートの像を、**Fig. 11** にはその像から上記の方法で求められた MTF を示します。比較のために、別のレンズカップル式検出器 (BM5+C4880-41S) とファイバーカップル式検出器 (Fiber CCD, C9300-124F21) の MTF も示しています。このグラフからもわかるように、MTF 曲線は一般的に、低い空間周波数領域では値が 1 に近く、周波数が高くなるにつれ一様にゼロに向け減少していく形になります。つまり、大きな構造のパターンは、吸収係数から単純に見積もられるコントラストに近い値が得られますが、パターンが細くなるにつれ、コントラストが落ちてきて、空間分解能よりも細かいパターンではコントラストがゼロになります (パターンが見えなくなる)。すなわち、高周波数領域まで



**Fig. 11** 各検出器の MTF の比較。BM2 ( $f=24\text{ mm}$ ) + C4880-41S ( $f=105\text{ mm}$ )、BM5 ( $f=200\text{ mm}$ ) + C4880-41S ( $f=70\text{ mm}$ ) と Fiber CCD。それぞれの実効画素サイズは 2.7  $\mu\text{m}$ 、16.7  $\mu\text{m}$ 、16.2  $\mu\text{m}$  である。縦軸は変調度、横軸は空間周波数を表す。



**Fig. 12** Conversion gain の比較。各検出器は **Fig. 11** で使用したものと同一。

高い MTF 値を示すものが、分解能が高く、高いコントラストが得られる検出器ということになります。2次元検出器の場合、空間分解能は画素サイズで制限されるので、MTF の高周波数側は最大でもナイキスト (Nyquist) 周波数 (サンプリング周波数の 1/2 の周波数。カットオフ周波数とも言う) となります。**Fig. 11** では、実効画素サイズが小さい “BM2+C4880-41S” が他の 2 つよりも高い周波数領域まで 0 以上の MTF 値を示していることから、他よりも高い分解能が得られていることが分かります。また、の “BM5+C4880-41S” と “Fiber CCD” は同程度の画素サイズですが、あらゆる周波数領域で “Fiber CCD” の方が MTF が高いので、“BM5+C4880-41S” に比べると、高コントラストが得られる検出器であることがわかります。

##### (ii) 変換効率

**Fig. 12** に、MTF 比較で用いた各検出器の変換効率 (Conversion gain) を示しました。“Fiber CCD” の方が、レンズカップル式検出器に比べて、変換効率が高いことがわかります。つまり、同じ強度の X 線像を撮像しても、ファイバーカップル式の方はレンズカップル式よりも大きな信号強度が得られるということです。

##### (iii) 性能比較のまとめ

同じような実効画素サイズの検出器では、Fiber CCD

の方が変換効率がよく、空間分解能も高いという結果が得られました。実際は蛍光面の種類やその厚み、可視光光学系と CCD 撮像素子の組み合わせにより検出器としての特性は変わりますので、それらを考慮して、どの検出器が対象とする実験に適しているかを判断することが重要です。

一例として Rayonix 製 SX165 (15  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ ) と浜松ホトニクス製 C9300-124F21 (16.2  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ ) の比較を試みます。カタログによると SX165 の信号電荷への変換効率は  $8e^-/\text{photon}$  (12 keV) であるのに対して、C9300-124F21 の変換効率 (実測値) は  $4.4e^-/\text{photon}$  (15 keV) です。また、SX165 の空間分解能のカタログ値は 100  $\mu\text{m}$  であるのに対し、C9300-124F21 の場合、MTF から求めた空間分解能は 64.8  $\mu\text{m}$  でした<sup>§</sup>。つまり、「SX165 は C9300-124F21 よりも信号電荷への変換効率が高いが、空間分解能では劣る」ということになります。おそらく、SX165 が採用している蛍光面 P43 の厚み 40  $\mu\text{m}$  と C9300-124F21 の蛍光面 P43 の厚み 20  $\mu\text{m}$  の差が出ているのでしょう。

ただし、空間分解能と変換効率は検出器の重要なファクターですが、検出器を選定する際には、これら以外のダイナミックレンジや読み出し時間などの要素にも注意を向けなければなりません。

## 5. 直接撮像型 X 線画像検出器 (直接 X 線カメラ)

### 5.1 概要

CCD 撮像素子は可視光を検出するために開発されましたが、X 線に対しても感度を有するので、X 線用の検出器としても使うことができます。ただ、その場合は、可視光用と異なる幾つかの最適化がなされます。たとえば、素子前面の窓には可視光を遮断し X 線だけ素子に到達するようにベリリウム窓が使用されます (多くの場合、素子を冷却しているので、断熱真空保持の意味もあります)。硬 X 線よりも低いエネルギー領域での使用時など、場合によっては直接真空チャンバー内に組み込まれます。光電変換と電荷蓄積は空乏層と呼ばれる電子・正孔などのキャリアが存在しない領域で起こりますが、物質に対する透過力が高い硬 X 線領域で利用する場合は、より高い検出効率を得られるようにシリコンの空乏層が厚めに設計されることもあります。軟 X 線領域で使う場合は素子表面の電極による減衰を避けるために、背面照射型 CCD が多く利用されています。また X 線領域での利用の場合には、必ず CCD と同期可能な X 線シャッターを使用します。X 線の場合、透過力があるので、可視光領域で有効だったセンサ

上での遮光処理が役に立たないためです。これらのことから、直接 X 線カメラ用の CCD 撮像素子には受光面積が大きく蓄積電荷量が多い、フルフレームトランスファー型が適しています。

### 5.2 特徴

像のボケ、歪み、強度の減衰を生じがちな前段の可視光光学系がない分、前述の間接 X 線カメラと比べて MTF の応答や感度は良好です。

MTF に関しては、X 線エネルギーによっては光電効果で生じる電子雲の広がりによる画素外への広がりを多少考慮する必要はあるにせよ、Nyquist 周波数まではほぼ 1 に近い MTF が得られます。

CCD 撮像素子では X 線光子 1 個が素子内で光電吸収されると、数百～数千  $e^-$  の信号電荷が生成されます。具体的には、センサの材質がシリコンの場合、光子エネルギー E (eV) の X 線光子 1 個に対して  $E(\text{eV})/3.65(\text{eV})$  個の電子-正孔対が生成されます<sup>6)</sup>。たとえば銅の特性 X 線 (8040 eV) の場合、1 光子につき大体 2200 個の電子-正孔対が生成する計算になります。このため、飽和電荷量が数万程度の CCD 素子であっても、画素あたり X 線の光子が数十個程度で像が飽和してしまい、大強度の X 線像を観察するには適していません。そればかりか、放射光実験のような大強度の X 線源を利用する場合は、直接光はもちろん、散乱光が撮像素子に入るだけでも過度の照射によりセンサが破壊されてしまう恐れがあるので、取り扱いには注意が必要です。

現在よく使われている直接 X 線カメラは、暗電流 (熱的ノイズ) を極力抑えるために、撮像素子をペルチェ素子や液体窒素を使って  $-50^{\circ}\text{C}$  程度まで冷却します。これにより、ノイズ電荷は読み出しノイズを合わせてもせいぜい数  $10e^-/\text{pixel}$  程度に抑えられます。つまり X 線 1 光子から発生する数千もの信号電荷に比べると格段にノイズが小さいため、各画素毎に X 線光子 1 個の計測 (フォトンカウンティング) が可能になります<sup>7)</sup>。X 線光子 1 個が生成する信号電荷の量は入射 X 線のエネルギーに依存して決まりますので、1 撮像時に 1 画素に対して X 線光子が 0 または 1 個しか来ないようなフォトンカウンティング条件下では半導体検出器と同様に信号電荷の量から X 線エネルギーを求めることが出来ます<sup>8,9)</sup>。この手法によるエネルギー分解 (X 線カラー) 画像は現在では天体物理学の X 線望遠鏡の分野では既に用いられています<sup>10)</sup>。ただし、この手法で十分な統計量をもった高品質な像を得るには、撮像を多数回繰り返す必要があります。

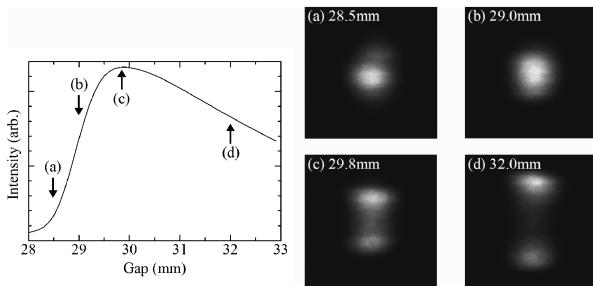
## 6. 利用例

### 6.1 レンズカップル式間接 X 線カメラの使用例

レンズカップル式の間接 X 線カメラは、その取り扱い

<sup>§</sup> MTF をフーリエ変換することにより分解能の特性を表わす点像分布関数 (point spread function, PSF) を求めることができます。SX165 の空間分解能は、PSF のカタログ値。





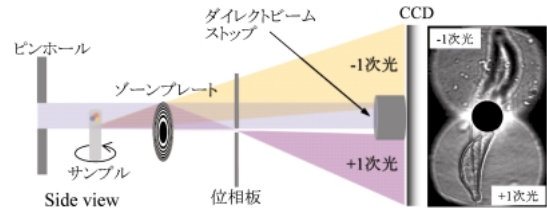
**Fig. 13** SPring-8 BL47XU で取得した、アンジュレータのギャップ値を変化させたときのビーム強度変化（左）と、X線イメージ（右の4つ）。それぞれの画像の視野は $1300\ \mu\text{m}$ 四方。分光器のエネルギーは $18\ \text{keV}$ に固定させて、アンジュレータのギャップを変更した。ギャップ値はそれぞれの画像に示した。画像のコントラストは適宜調整しているため、露光時間は省略。

の簡便さから非常に多くの種類の実験に用いられています。また、 $10\sim 12\ \text{bit}$  というダイナミックレンジの広い CCD 撮像素子を用いることにより、ダイレクトビームのプロファイルをほぼそのまま捉えることが出来るため、ビームライン調整に対しても有効です。分光器の定位置射出調整はもちろん、ベントミラーやスリット調整なども「見たまま揃えればよい」という簡単さです。これらの用途では、X線強度分布を瞬時に得ることが重要で、画像の情報量の多さが活かされています。**Fig. 13**には、SPring-8 BL47XU で取得したデータを示しました。

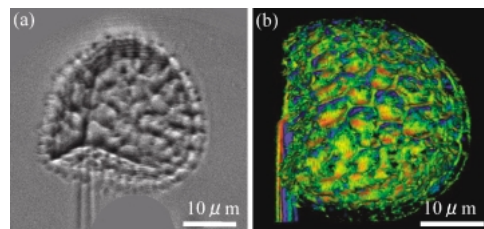
## 6.2 直接 X 線カメラの使用例—FZP を用いたゼルニケ型 X 線位相差顕微鏡<sup>11)</sup>

直接 X 線カメラを用いた撮像例として、高エネルギー加速器研究機構フォトンファクトリー (KEK-PF) での、ゼルニケ型の X 線位相差顕微鏡の検出器として用いたときの画像を示します。顕微鏡光学系の概略図を **Fig. 14** に示します。最外線幅  $50\ \text{nm}$  のフレネルゾーンプレート (FZP) を対物素子として用いた X 線拡大結像光学系の検出器として直接 X 線カメラを用いました。検出器面上での X 線像の拡大率は  $225$  倍なので、このときの物体面での画素サイズは  $53\ \text{nm}$  となります。この CCD 撮像素子の場合、飽和電荷量は  $60,000\ \text{e}^-/\text{pixel}$  ですので、1 画素あたりエネルギー  $5\ \text{keV}$  の X 線フォトンが約  $44$  個検出されると飽和する計算になります。

直接光に比べて、結像に利用される FZP の 1 次回折光は非常に微弱ですので (回折効率約  $4\% @ 5\ \text{keV}$ )、これを検出するためには、間接 X 線カメラよりも直接 X 線カメラの方が適しています。**Fig. 15 (a)** に、石松子 (ヒカゲノカヅラの胞子) の位相差コントラスト像を示します。また、X 線位相差コントラスト結像 CT によって得られた石松子の 3 次元像を **Fig. 15 (b)** に示します。3 次元画像では、石松子表面上の網目状の構造を測定できていることがわかります。かつては限られた実験ハッチのスペース内で高分解



**Fig. 14** 直接撮像型 CCD カメラを用いたゼルニケ型 X 線位相差顕微鏡光学系概略図 (実際に PC 上では上下反転した画像が出力されるので、+1 次光像は正立像として見える)



**Fig. 15** (a) 石松子の X 線位相差コントラスト像。(b) 石松子の X 線位相差コントラスト 3 次元像。

能画像を得るためには検出器自体の分解能が高い写真乾板を用いていました<sup>12)</sup>。しかし、現在では、高い倍率の光学素子とあわせて写真乾板のような現像処理が不要な直接 X 線カメラを用いることにより、高い空間分解能で質の良い測定が可能となっています。

直接 X 線カメラの場合、X 線光子 1 つが生成する信号電荷が極端に多いために、間接 X 線カメラと比べて実効的にダイナミックレンジが小さく、S/N の良い画像を得ることは難しいとされています。しかしながら、繰り返しアナログ積算を行うことで、この問題を緩和することは可能です。実際に、**Fig. 15 (a)** に示した画像は、 $20$  枚の画像を積算したものです。この実験条件での検出面における X 線強度は、1 秒あたり 1 画素に入射したフォトン数換算で約  $0.2$  個 (AD 変換係数:  $25\ \text{e}^-/\text{count}$  とした) と、非常に微弱な信号をとらえていたことがわかります。

## 6.3 直接 X 線カメラの使用例—エネルギー分解測定例

最後の例として、直接 X 線カメラのフォトンカウンティングを利用した X 線カラー (エネルギー分解) イメージングの例を挙げます。**Fig. 16 (a)** に結像型蛍光 X 線顕微鏡光学系を示しました。この光学系では、試料全体に X 線を照射し、そこから発生する蛍光 X 線を X 線用の対物素子で拡大結像して画像検出器上に蛍光 X 線の発光分布像を得ます<sup>13,14)</sup>。可視光で言えば、**Fig. 16 (b)** に示すような、太陽光などの照明で照らされた物体を、虫眼鏡を通してカラー CCD で観察することと同じと思っていいでしょう (可視光では照明によって物体から散乱された光を見ますが、X 線の場合は散乱 X 線と蛍光 X 線を観察するとい

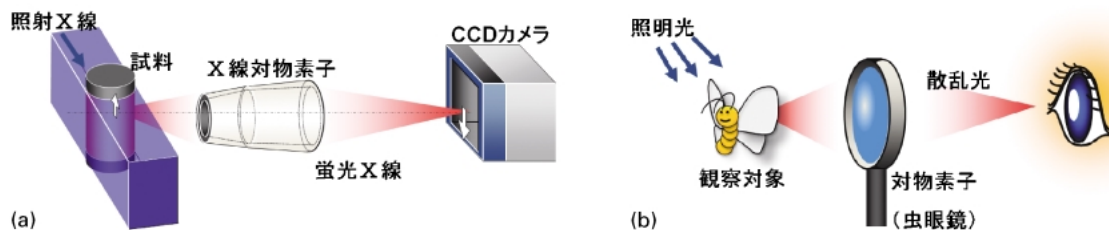


Fig. 16 CCDカメラを利用した、X線カラーイメージングの例：(a)結像型蛍光X線顕微鏡。試料全体にX線を照射し、それによって発せられる蛍光X線や散乱X線の発光分布像を結像素子を通してCCD撮像素子で計測する。(b)可視光領域での同様の光学系。太陽光などに照らされた観察対象を虫眼鏡を通して観察する。

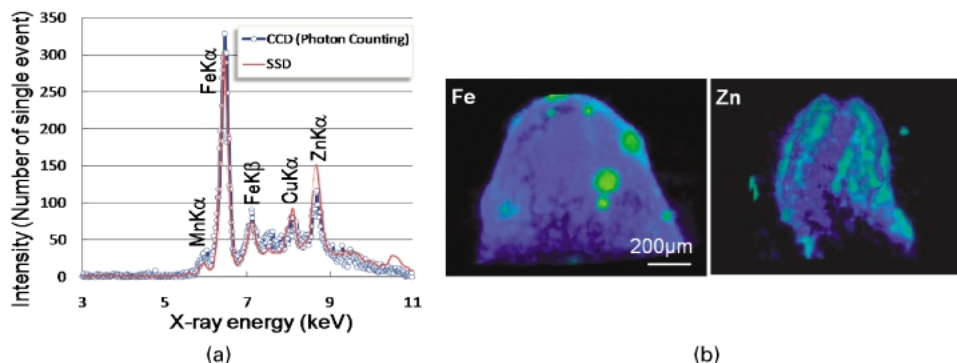


Fig. 17 結像型X線顕微鏡で測定した、アルファルファ種子。(a)フォトンカウンティングで得られたこの試料のエネルギースペクトル。比較の為に半導体検出器(SSD)で測定したスペクトルも示してある。(b)蛍光X線による鉄と亜鉛の3次元分布。

う違いはあります)。このような光学系は、可視光領域では最もシンプルでなじみ深い光学系であるにも関わらず、X線領域では長年、良質の対物素子がなかったため、実現されるようになってきたのはつい最近のことです。さて、蛍光X線は元素固有のエネルギーを持つので、検出器で得られる像は元素の情報も内包します。つまり、元素毎に色分けされたカラーX線像が得られるわけです。

X線カラーイメージングの例として、アルファルファの種子の蛍光X線による3次元CT像をFig. 17に示します<sup>15)</sup>。この実験はKEK-PF BL3C2で行われました。照射するX線は、偏向電磁石からの白色光をそのまま利用しています。画像検出器に用いたCCDのフォトンカウンティング法によって得たスペクトルがFig. 17(a)になります。鉄と亜鉛の蛍光X線が存在していることから、これらが種子に含まれている事がわかります。ちなみに、赤線は半導体検出器で測定した同じサンプルのスペクトルですが、直接X線カメラで測定した結果と、良く一致しています。鉄と亜鉛の3次元分布を示したそれぞれのCT像がFig. 17(b)です。これらの像から、種子の内部に鉄は局所的に存在し、また、亜鉛は胚珠部分に分布していることが分かりました。

X線を使った元素マッピングは、微小ビームを試料上でスキャンする走査型が主流ですが、この手法では走査に時間がかかり、3次元空間(3D)や2次元空間+時間変

化といった測定への応用は難しいという問題があります。しかし、ここで紹介した、結像型蛍光X線顕微鏡とCCDのフォトンカウンティング法を組み合わせた手法が実用になれば、この問題が解決される可能性があるだけでなく、4次元(3D+時間変化)測定への夢も現実味を帯びてきます。技術的な問題点としては、既存のCCDでは読み出し速度が遅いため、フォトンカウンティングの繰り返し測定に必要以上に時間がかかってしまうことが挙げられます。

## 7. おわりに

本稿ではCCD撮像素子の構造や動作の仕組みからそれを利用したX線画像検出器の説明を行いました。CCD撮像素子についてより詳しく知りたい方は、本文でも紹介した専門書をご参照ください。また、間接X線カメラの利用例<sup>16-18)</sup>や、本稿では触れられていない、X線I.I.(イメージインテンシファイア)と組み合わせたCCD検出器などは文献が複数あるので、それらを参照してください<sup>19,20)</sup>。

最後に本稿で説明した検出器が現状で抱える問題と展望を示します。

間接X線カメラは高効率化が課題です。高効率化には、初段の可視光光学系の開口を大きくし、蛍光面での発

光量を増やす(X線から可視光への変換効率を上げる)ことが唯一の方法ですが、ファイバーカップル式検出器の項でも触れたように、蛍光面を厚くすると空間分解能の低下を招きます。また、新奇蛍光物質の探索もなされていません<sup>21)</sup>が、LSOやP43を超えるような材料はなかなか存在しないようです。Olsenら<sup>22)</sup>が提案しているような柱状の穴に蛍光面を埋め込むといった構造も検討するなど、新しい発想が出てくれば、高効率化と共に現状で対応が遅れている50 keV以上の高エネルギーX線領域での有効利用も期待できるでしょう。

CCDカメラの読み出し速度の遅さはどの撮像タイプでも問題ですが、単純に読み出し速度を上げるとノイズも増えてしまうため、その代わりに読み出し口を複数搭載するなどの工夫がなされています。また、直接X線カメラの最大の問題は「放射線損傷を受けやすい」すなわち、「使えばいつかは壊れる」ことです。しかし、「壊れにくい」かつ「壊れてもすぐに交換可能」な直接X線カメラが、XFELプロジェクトなどで積極的に開発が進められているようですので、今後の展開に期待が持てます<sup>23)</sup>。

また、高速撮影とエネルギー分解が両立すると非常にインパクトが強いと思われます。これらが解決された暁には、X線カラーイメージング撮影がスタンダードになり、今主流の「X線モノクロ画像」は、可視光で言えば昭和初期のモノクロ映像のように、古き良き時代のレトロな遺産となっているかもしれません。

## 謝辞

本稿を記述する上では多くの皆様にお世話になりました。特に浜松ホトニクス株式会社の原和弘さんには、CCD撮像素子に関して、親切にご説明いただきました。感謝いたします。

## 利用情報

### X線用画像検出器全般

- 浜松ホトニクス, <http://www.hamamatsu.com>
- ADSC, <http://www.adsc-xray.com/>
- Rayonix/Mar USA, <http://www.mar-usa.com/index.htm>
- Photonic Science, [http://www.photonic-science.co.uk/cameras\\_x2.html](http://www.photonic-science.co.uk/cameras_x2.html)
- 日本ローパー, <http://www.roper.co.jp/>

### CCD, CMOS カメラ

- DALSA, <http://www.dalsa.com/>
- アルゴ, <http://www.argocorp.com/>
- PCO, <http://www.pco.de/>
- フォトロン, <http://www.photron.co.jp/>
- Vision Research, <http://www.visionresearch.com/>

- Andor Technology, <http://www.andor.com/>

### CCD 撮像素子

- 浜松ホトニクス, <http://www.hamamatsu.com>
- コダック, <http://www.kodak.com/global/en/business/ISS/Products/>
- ソニー, [http://www.sony.co.jp/Products/SC-HP/pro/image\\_senser/](http://www.sony.co.jp/Products/SC-HP/pro/image_senser/)
- E2V, <http://www.e2v.com/>

## 参考文献

- 1) 米本和也, C&E 基礎解説シリーズ7「CCD/CMOS イメージ・センサの基礎と応用」, CQ 出版社
- 2) 浜松ホトニクス「デジタル CCD カメラ 応用・特長」  
<http://jp.hamamatsu.com/resources/products/sys/pdf/jpn/c4880at.pdf>
- 3) N. Yagi, K. Inoue and T. Oka: J. Synchrotron Rad. 11 (2004) 456.
- 4) A. Koch, C Raven, P. Spanne and A. Snigirev: J. Opt. Soc. Am. A. 17 (1998) 1940.
- 5) S. M. Gruner, M. W. Tate and E. F. Eikenberry: Rev. Sci. Instrum. 73 (2002) 2815.
- 6) 加藤昌弘, 齋藤則生: 放射光, vol. 21, No. 3, (2008) 168-175.
- 7) R. C. Catura and R. C. Smithon: Rev. Sci. Instrum. 50(2) (1979) 219.
- 8) R. A. Stern, K. Liewer and J. R. Janeik: Rev. Sci. Instrum. 54(2) (1983) 198.
- 9) H. Tsunemi, M. Wada, K. Hayashida and S. Kwai: Jpn. J. Appl. Phys. 30 (12A) (1991) 3540.
- 10) L. Struder: Nucl. Instrum. Method Phys. Res. A, 454 (2000) 73.
- 11) S. Aoki, M. Hoshino and N. Watanabe: J. X-ray Sci. Technol. 15 (2007) 65.
- 12) H. Yokosuka, N. Watanabe, T. Ohigashi, Y. Yoshida, S. Maeda, S. Aoki, Y. Suzuki, A. Takeuchi and H. Takano: J. Synchrotron Rad. 9 (2002) 179.
- 13) S. Aoki, A. Takeuchi and M. Ando: J. Synchrotron Rad. 5 (1998) 1117.
- 14) A. Takeuchi, S. Aoki, K. Yamamoto, H. Takano, N. Watanabe and M. Ando: Rev. Sci. Instrum. 71 (2000) 1279.
- 15) M. Hoshino, T. Ishino, T. Namiki, N. Yamada, N. Watanabe and S. Aoki: Rev. Sci. Instrum. 78 (2007) 073706.
- 16) 米山明男, 竹谷 敏, 武田 徹, 兵藤一行, 平井康晴: 放射光, vol. 20, No. 5 (2007) 315-321.
- 17) 竹内晃久, 上杉健太郎, 高野秀和, 鈴木芳生: 放射光, Vol. 16, No. 2 (2003) 108-112.
- 18) 安田秀幸, 大中逸雄, 土山 明, 中野 司, 上杉健太郎: 放射光, vol. 16, No. 2 (2003) 21-26.
- 19) Y. Amemiya, K. Ito, N. Yagi, Y. Asano, K. Wakabayashi, T. Ueki and T. Endo: Rev. Sci. Instrum. 66 (1995) 2290.
- 20) 八木直人: 放射光, vol. 19, No. 6 (2006) 349-355.
- 21) T. Martin and A Koch: J. Synchrotron Rad. 13 (2006) 180.
- 22) U. L. Olsen, S. Schmidt and H. F. Poulsen: J. Synchrotron Rad. 15 (2008) 363.
- 23) 矢橋牧名 他: 放射光, vol. 22, No 2, pp. 56-69 (2009).