

可視光用 CCD の軟 X 線に対する特性*

水方 勝哉**・常深 博**・平松 誠***

(1987 年 12 月 25 日受理)

The Characteristics of Optical CCD in Soft X-Ray Energy Region

By

K. MIZUKATA, H. TSUNEMI, and M. HIRAMATSU

Abstract: We report here the characteristics of a charge coupled device (CCD) in the energy region of 2-8 keV. The CCD device we used is a product of Sharp Corp. named LZ22187 which is widely used in optical region. This device is operated in the same condition as that of a commercial use with the exception that the cover glass is removed for the X-ray to reach the photo diode. It is an interline-transfer type device with 386×488 elements while we summed up internally every two adjacent elements. We exposed the X-ray to the CCD at about -60°C . The energy resolution is about 900 eV (FWHM) which is mainly determined not by the incident X-ray energy but by the read-out noise. We found that this device could yield sufficient information for two dimensional image. The spatial resolution is up to individual element size ($23 \times 27 \mu\text{m}$). The efficiency for the X-ray is much superior to that of the film. We discuss the possibility to improve the characteristics of the CCD in X-ray energy region.

概 要

現在、広く可視光用に使われている市販の CCD 素子(シャープ株式会社製, LZ 22187) に、軟 X 線を照射して、熱雑音、読み出

* 宇宙研特別事業費による研究論文
** 大阪大学理学部
*** キヤノン株式会社

し雑音、転送効率等が、軟 X 線領域でエネルギー分解能、位置分解能にどの様に影響を及ぼすかを調べた。その結果、動作温度 -60°C 程度で、光子計数をした場合、エネルギー分解能は読み出し雑音で決まり、半値幅 900 eV で半導体検出器には及ばない。しかし、二次元撮像をさせる積分型の素子としては各画素単位 ($23 \times 27 \mu\text{m}$) までの位置分解能があり、十分な性能を持っていることが判った。可視光用の CCD でも、X 線領域で連続して二次元像を撮るには、大変有利な素子であると言える。X 線の検出効率から、この素子の空乏層の厚さは $3 \mu\text{m}$ 程度であり、高エネルギー側では検出効率が下がる。この実験を基に、CCD に X 線領域で更に優れた性能を持たせる可能性を探った。その結果、エネルギー分解能を良くするためには、素子に搭載するアンプを低雑音化し、検出効率を上げるためには空乏層を厚くすれば、これまでにない優れた検出器となることが判った。

初めに

軟 X 線の測定に使用できる検出器としては、これまでガス比例計数管を初めとする種々のガス検出器が使用されてきた。入射エネルギーを精密に測定するには、エネルギー分解能の優れた半導体検出器が用いられる。また、二次元像を得るためには位置検出型の比例計数管や、フィルム等が広く使用されている。X 線天文学を初めとする分野では、量子効率が高く、エネルギー分解能が優れ、かつ位置分解能の良い検出器が強く望まれている。エネルギー分解能の点から言えば半導体検出器が優れ、位置分解能の点から言えばマルチチャンネルプレートがよい。フィルムは、位置分解能は優れているが、量子効率が悪く、かつデータの後処理が煩わしい。しかも、時間分解能の点で問題が多い。その両者の優れた性能を兼ね備えたものとして、CCD の使用が考えられ、米国を初めとして、X 線専用の素子が既に開発されている [1, 2]。これは、マルチチャンネルプレートと同じくらいの位置分解能を持ちながら、動作させるためにマルチチャンネルプレートで必要になる高圧電源が要らず、半導体検出器に近いエネルギー分解能を持ちながら、半導体検出器で要求されるほど低温にする必要もないと言われている。しかし、この様な素子は、今のところ広く使用されるには至っていない。特に、わが国では殆ど入手できない。

今回は、将来必要になってくるであろう素子を開発するための手初めに、可視光用に開発されている素子の、X 線に対する諸特性を調べ、その性能や問題点を探ってみた。ここで使用した素子は、インターライン型と分類されるもので、広く可視光用ビデオカメラ等に使用されているものである。CCD 素子としては、この他フレーム転送型と呼ばれるものがある。インターライン型の素子は、受光部分と電荷転送部分とが交互に作られており、可視光領域での開口率が余りよくなる。一方、フレーム転送型の素子は受光部分と電荷転送部分とが全く分離されており、受光部分の開口率が良くなる。可視光領域では、受光部分へ電荷を転送する際に、像の乱れが生じにくい構造のインターライン型が主流とな

っている。しかし、X線領域で考えると、その透過率の強さのためにインターライン型の長所はなく、むしろフレーム転送型の素子の方がよい。ところが、可視光用に製作された素子は、本質的にX線にふさわしくはない。そのため、今回のような初期の段階では、両者の利害得失が表れるほどではない。

実験装置

CCD素子と読み出し方法

使用した CCD 素子は、シャープ株式会社製の LZ 22187 と呼ばれるインターライン型のもので、広く可視光用のビデオカメラ等に使用されている。実験には、X線が受光部分に入射出来るように、特に入射部分の窓ガラスを取り去ったものである。この素子の諸特性は表-1 に示した[3]。図-1 には、インターライン型 CCD の受光部分と電荷転送部の構造

表 1 使用した CCD 素子

シャープ株式会社製	LZ 22187
2/3 インチ型インターライン方式の固体撮像素子	
全画素数	水平 386×垂直 488
水平有効画数	368+遮光画素数 17
画数ピッチ*	23 μm ×13.5 μm
全画像寸法	8.8 mm×6.6 mm
入射窓のガラスは装置されていない。	

注意* 画数は偶フィールドと奇フィールドとをまとめているので、位置分解能は 23 μm ×27 μm である。

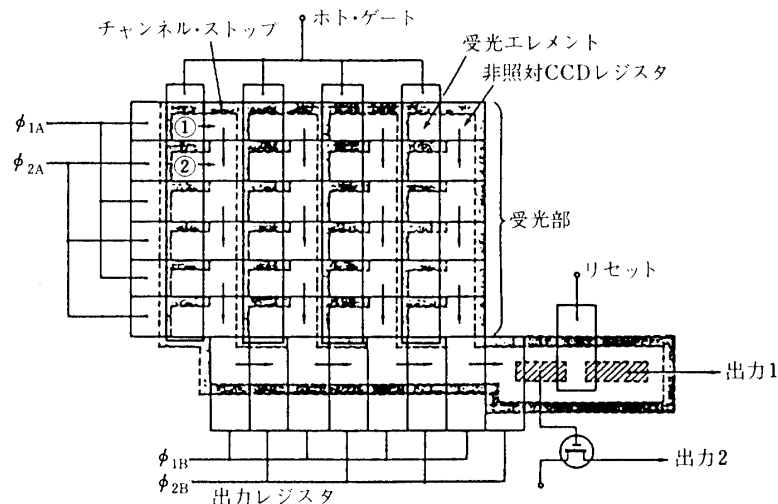


図-1 実験で使用したインターライン型の CCD 素子の受光部分と電荷転送部の構造を示す。電荷転送部分は、アルミニウムの保護膜で覆われ、可視光は入射出来ないようになっている。

を示す。この様に、使用した素子はインターライン型で、受光部分は、TVのインターレースモードのため偶フィールド用と奇フィールド用に分かれており、これが同じ列に交互に並んでいる。更に、その隣の列は電荷転送部分が並んでいる。通常の使用法は、偶フィールドまたは奇フィールドの一方だけの光電子を電荷転送部に移し、これを順次転送部分を通して読み出す。読み出されなかったフィールドは、この間光を蓄積している。こうして一画面のデータを読み終ると、次に読み出すのは前に読み出されずに、光を蓄積していたフィールドとなる。こうして、全データを読み終えるには二回データを読み出す必要がある。受光部分と、電荷転送部分とは、厚み方向の構造が同じであるので、どちらも入射光子により光電子が作られ得る。しかし、電荷転送部分の上部はアルミニウムの遮光膜で覆われているので、電荷転送中に可視光が入るのを防ぎ、像が乱れないようになっている。しかしながら、X線に対してはこの遮光膜の効果はない。

実験に使用した信号処理系の大まかな様子は、図-2に示してある。この素子を動作させるのに必要な種々のクロック等は、専用のIC(LR 3658, IR 2 S 01 T)を使用しており、通常の可視光領域で使用する方法と同じである。各画素からの出力は総てデジタル量に変換し、計算機(NEC PC-9801)に取り込む。そのため、そのままでは読み出し速度が速過ぎるので、動作クロックはTVに使用する場合の14 MHzから60 kHz程度に下げている。更に、今回の実験に使用するkeV領域のX線は、前にも述べた様に電荷転送部分を覆うアルミニウムの遮光膜を透過してしまうので、受光部分にも、電荷転送部分にも同じく光電子を作ってしまう。従って、X線の二次元像を得るには、X線を照射している間は、電荷転送を止め、照射終了後、電荷転送を再開してデータを読み出すようにし、入射光子の位置の情報を失わないようにした。更に、偶フィールドと奇フィールドとを別に読むと、初めに読む画面データには、受光部と電荷転送部とで出来る光電子が加算されるが、後で読む画面データには受光部で出来る光電子だけとなり、同等に扱えない。そこで、CCDを動作させる信号を少し変えて、X線照射後は、偶フィールドと奇フィールドとを同時に電荷転送部分に読み出すようにした。このようにして、読みだしたデータの各点(画素の大きさ)は $23 \times 27 \mu\text{m}$ の領域に相当し、全画素数は 386×244 になる。

CCD素子からの出力は、二重サンプル法を使用して各画素毎にその信号波高をマイクロコンピュータに読み込んだ。読み出し速度の上限は、ここで使用するADCの変換速度や、

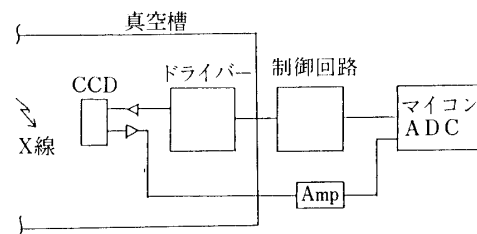


図-2 今回の実験で使用した、信号処理系の概略図を示す。全ての画素からの信号は、最終的にマイクロコンピュータに取り込む。

計算機へのデータの読み込み速度で決っている。この様な信号処理系でも、約3秒で1画面分のデータを読み出し、取得することができる。

冷却系

CCD素子からの出力は、素子を冷却することによって熱雑音を減らすことが出来る。そこで、図-3に示したような装置で、四段のペルチェ素子を使用し、CCD素子だけを冷却出来るようにした。ペルチェ素子の高温側は、容量が約二リットルの氷水により一定温度(0°C)にしてある。また、ペルチェ素子に流す電流を制御することにより、素子の温度を測定中ほぼ一定に保った。また、冷却部に対する結露、及び、可視光の入射するのを避けるた

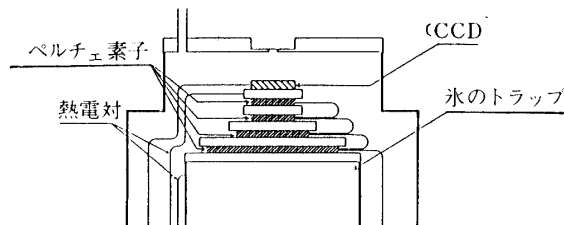


図-3 CCD素子だけの冷却系の概略図。四段のペルチェ素子を使用し、その高温側は氷水により0°Cに保った。

め、全体を真空槽の中に入れ 10^{-4} mmHg程度に保った。この真空度であれば、素子自体の発熱量に比べて、対流により素子に流入する熱量は無視し得るほど小さい。また、CCD素子にリード線を通して流入する熱量を減らすため、全ての信号は、熱伝導率の低いマンガン線を通した。こうして、上記のシステムでは、CCDを動作させなければ素子からの発熱がないため約 -100°C 、動作中でも -70°C 程度まで冷却することが出来る。更に、 -50°C 程度であれば2~3時間氷の補給なしで動作可能である。

X線発生装置

一次X線発生装置は、理学電気株式会社製RU 200を使用した。そのターゲットは銅で、印加電圧は10~30 kVに設定した。この装置では、X線の発光点は1 mm程度の大きさで見なせる。発生するX線は、主に銅の特性X線の他、制動輻射による連続成分を含んでいる。この一次X線を直接CCD素子に照射する時には、素子を発光点から約4000 mm離して置いた。この時、X線導入管の中に、適当に絞りを入れ、壁からの反射等が影響しないようにした。

また、この一次X線を種々の二次ターゲットに照射して、そこからの特性X線だけがCCD素子に入射するようにもした。使用した二次ターゲットは、銅、鉄、チタン、錫、塩化ビニルで、それぞれ主にCu-K(8.1 keV)、Fe-K(6.4 keV)、Ti-K(4.5 keV)、Sn-L(3.2 keV)、Cl-K(2.7 keV)を発生する。なお、二次X線を照射する時には、二次ターゲットからのX線だけが素子に入射するようになっている。

CCD素子の設置してある領域のX線強度分布は、予めガスフロー型比例計数管で測った。更に、CCD素子に実際に入射したX線強度は、そばに設置したガス比例計数管で同時にモニターして、常に素子に入射した総X線光子数を計数出来るようにしてある。

CCDによる二次元像の測定

以上のような装置を使用して、X線の二次元像を得た。図-4は、CCDの前面約4 mmのところ設置したメッシュと錫メッキ線の像である。メッシュは、ピッチが0.3 mm、棧の幅と厚さが45 μm のステンレス製で、フォトリソングによって製作されたものであり、錫メッキ線の幅は、0.7 mmである。図の縦と横との比は同じではないので、メッシュを形成する正方形は少し歪んでいる。この時、X線発生装置の発光点の大きさと発光点までの距離から像のぼける割合は1 μm 程度である。すぐ解るように、極めてシャープな影が得られている。またこの像のある列に沿ってナイフエッジテストをしたのが図-5である。メッシュのパターンがはっきりと分かる。この測定は、CCD素子の温度は -60°C で、素子のクロックを止めてX線を約3秒照射した後、順次読みだしたものである。また、各画素には複数個のX線光子が入射している。図-4では、X線に照射されている各画素に入射したX

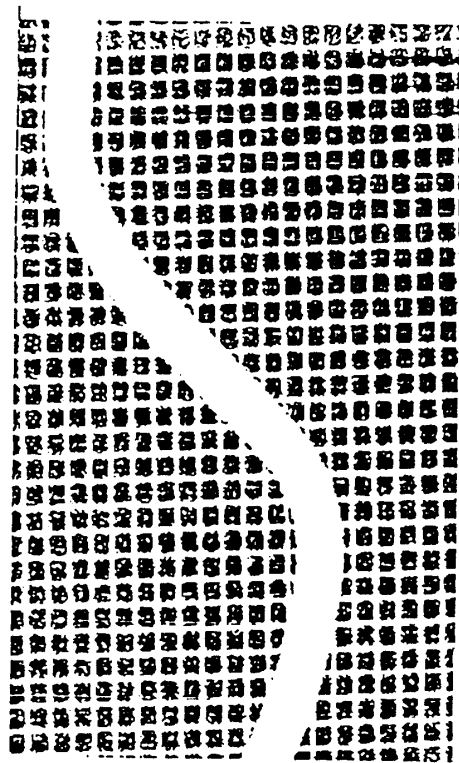
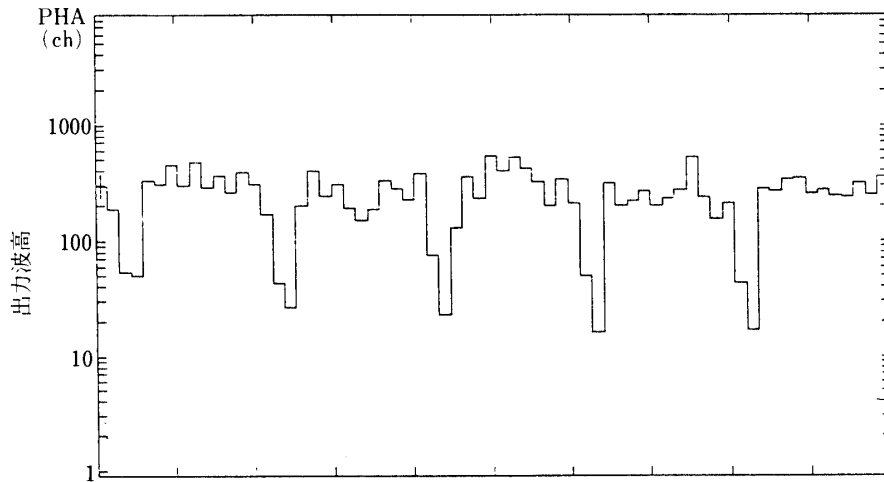


図-4 CCD素子の前面約4 mmのところ設置したメッシュの像を示す。これは、線幅45 μm 、ピッチ300 μm のステンレス製である。また、蛇行した太い影は、直径が0.7 mmの針金の影である。



ある列の各画素

図-5 図-4の像で、ある列に沿って行ったナイフエッジテストの結果を示す。横軸はある列の各画素で、縦軸は各画素の出力波高。メッシュパターンが明確に再現され、各画素単位で十分位置が確定できることが分かる。

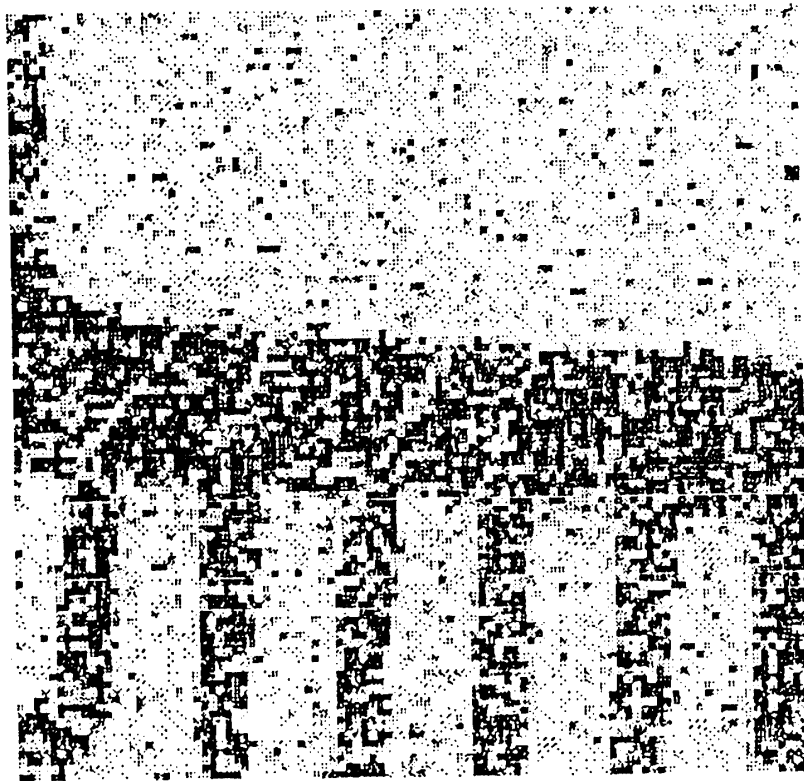


図-6 図-4と同じ測定方法で撮像した厚さ約3 mmのプラスチックモールドのフラット型IC（シャープ株式会社製、LZ 92 E 62）の透過像を示す。基板から、ICの電極に伸びる細い金線（直径が約10 μm ）が見えている。

線のエネルギー総量は約 100 keV である。写真フィルムと比較すると、感度は数桁良いと
言うことができる。

この他、種々の物体を CCD 素子の前面に置いて、その透過像を得た。図-6 には、厚さ約
3 mm のプラスチックモールドのフラット型 IC (シャープ株式会社製, LZ 92 E 62) の透
過像を示す。内部にある金属基板が中央に見え、その周辺にリード線となる金属が細長く
見えている。図中にはこれらの間に細い線の影が見えているが、これはボンディングに使用
している直径約 10 μm の金線である。これからも、各画素の大きさ (23 \times 27 μm) で決ま
る、位置分解能があることが分かる。

CCD による X 線エネルギーの測定

次に、二次ターゲットから出てくる各種の特性 X 線のエネルギーを測定した。この時、
二次ターゲットの発光部分は直径が約 20 mm 有り、これを CCD から約 300 mm 離して配
置してある。二次ターゲットから出てくる X 線を、近くに配置したガス比例計数管で強度
をモニターしながら、CCD 全面に約数百個の X 線光子が検出出来る量を照射した。照射中
は CCD のクロックを停止しておき、照射終了後、再びクロックを動作させてその出力を得
た。CCD に入射する X 線光子の数を制限したのは、素子の各画素に二個以上の X 線光子
が入ってエネルギー情報が失われるのを防ぐためである。使用した X 線のエネルギーは前
述したように 2~8 keV の範囲の特性 X 線である。

図-7 には、各種 X 線を照射した時の、一画面分の各画素の出力波高分布を示す。全部で
約 100000 個の画素が有り、その内、X 線の入射している画素は数百個である。ここでは、
後述する電荷転送効率による波高の低下が、無視できるような領域に限って、波高分布を
示した。特性 X 線を照射した場合の波高分布には、一般にピークが二個得られる。このう
ち、波高の小さい部分に現れる高いピークは、X 線の入射していない画素によるもので、
波高の大きい部分に現れる低いピークは、X 線の入射している画素による。ここでは前者
をゼロピークと呼び、後者を X 線ピークと呼ぶ。ゼロピークは、X 線ピークよりも桁違い
に高くなるように測定しているので、各々のピークが良く見えるように、各図は同じデー
タを縦のスケールを変えて二重に描いている。

ゼロピークから、X 線ピークまでが、入射 X 線エネルギーを表している。図-8 には、入
射 X 線エネルギーと出力波高 (ゼロピークから X 線ピークまでの差) の関係を示す。出力
波高から換算した一次電子の数は、珪素の平均電離エネルギー (3.7 eV) と入射 X 線のエ
ネルギーとから換算したものと良く合っている。また、X 線ピークだけを作っている X 線
光子数 (画素の数) と、その時比例計数管でモニターした X 線強度から、その吸収領域の
厚さを計算すると約 3 μm の珪素に相当することが判った。これは、ほぼこの素子で形成
されている空乏層の厚さ (基板の比抵抗と印加電圧で決まる) と一致するので、X 線ピー
クを作る各画素の信号波高は、一個の X 線光子が空乏層で光電吸収されて作った信号を表
していると言える。

次に、波高分布を見ると、一般に X 線ピークとゼロピークの間、かなりテールを曳い
ているのが分かる。テールを曳く割合は、入射 X 線のエネルギーが高いほど大きい。CCD

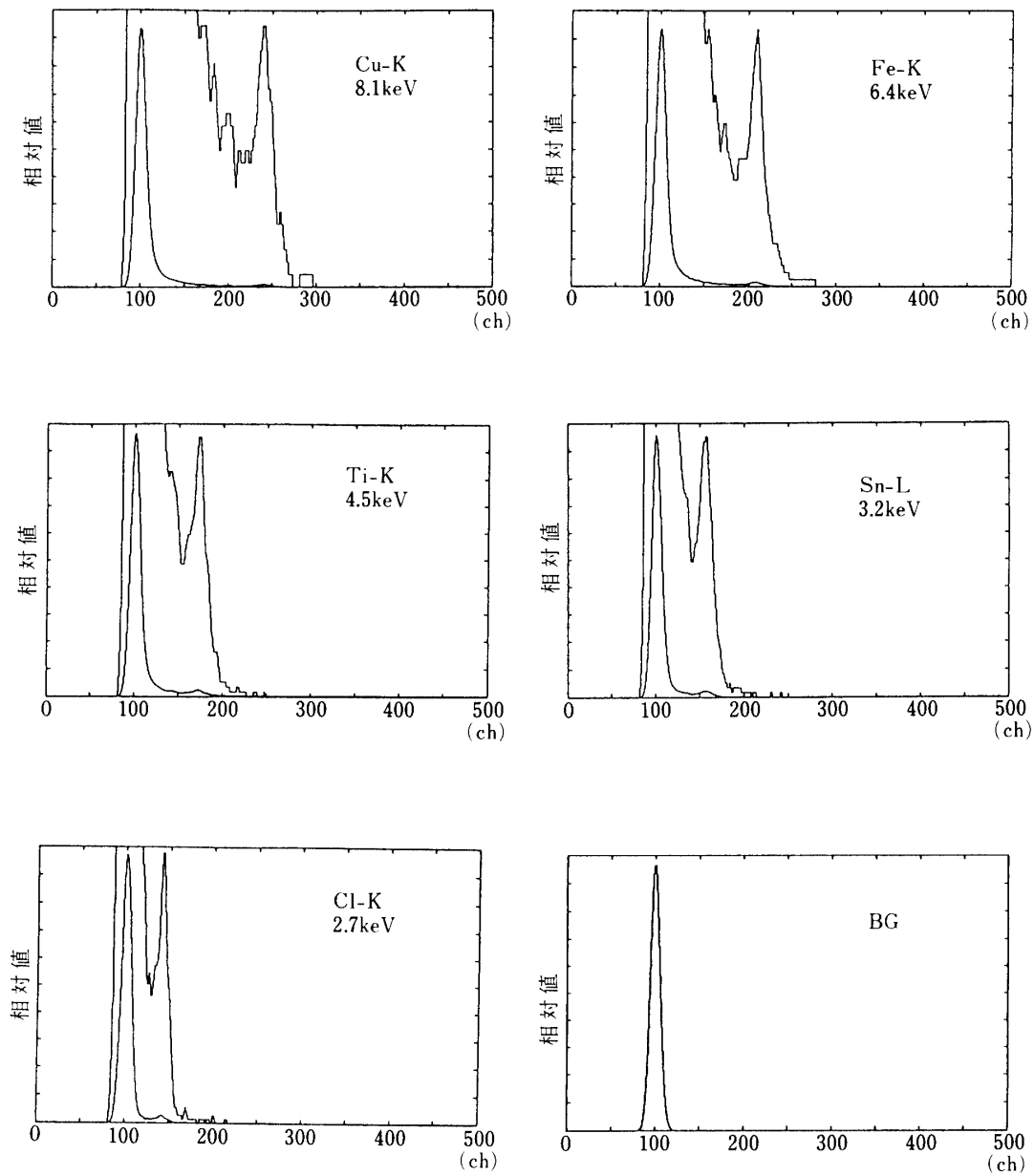


図-7 各種の特性X線を照射して、光子計数を行ったときに得た各画素の出力波高分布を示す。各図には、ゼロピークとX線ピーク(本文参照)が見られるが、両者を比べるために高さ方向のスケールを変えて二重に描いてある。使用した特性X線エネルギーは、銅(8.1 keV)、鉄(6.4 keV)、チタン(4.5 keV)、錫(3.2 keV)、塩素(2.7 keV)である。

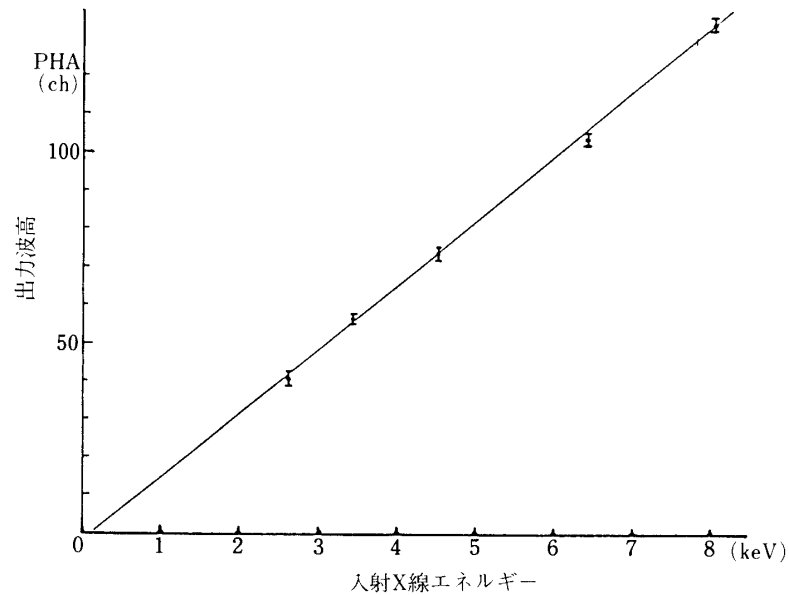


図-8 各種の入射 X 線エネルギーと出力波高（ゼロピークから X 線ピークまでの差）の関係を示す。エネルギーの線型性と、出力信号の大きさから計算できる一次電子数とから、光子計数出来ていることが判る。

素子の受光部分のうち、空乏層領域に生じた一次電子群は、その電場に引かれて、全てその画素の電極の下に集められる。一方、空乏層より更に奥の中性領域で生じた一次電子群は、そこでの電場が弱いため、拡散と再結合とに困って次第に失われ、ごく一部の電子しか電極の下には集まらない。拡散する場合には、周囲の画素に広がり像のぼけを生じ、再結合する場合には、信号波高が低くなってしまう。いずれにせよ、一個の画素からの出力は、入射 X 線のエネルギーよりも低い値しか示さない。

この測定では、CCD 素子に入射した X 線の光子数が少ないので、X 線光子の入射した画素の周辺には殆ど X 線が入っていない。そこで、X 線ピークを作る画素の周辺を調べたが、特に出力の大きいことはなかった。更に、ゼロピークと X 線ピークとの間の出力を出した画素の周辺を調べた。この場合には、周辺の画素の平均値はゼロピークよりも有意に大きいことが判った。これは、拡散による効果を示していると言える。しかし、周辺の画素を加算しても入射 X 線のエネルギーには足りないので、再結合による効果のあることも判る。以上の測定から、ゼロピークと X 線ピークとの間の出力波高は、再結合により波高が下がったものが 90 %、拡散により波高の下がったものが 10 %程度であると推定できた。つまり、ゼロピークと X 線ピークとの間のテールは、主に再結合に困って電子が失われたためであると言える。[4]これは、空乏層の厚さから考えて珪素基板の比抵抗が小さく、従って不純物による再結合の寄与が大きいためであると思われる。空乏層の厚さ (3 μm) と、各画素の大きさ (23 \times 27 μm) を考えると、拡散による電子の広がりや殆どないと考えられる。これは、既に述べたように、X 線の二次元像を撮った場合にも、殆ど像のぼけが生じ

なかったことでも分かる。

エネルギー分解能についての考察

図-7に示した波高分布から、X線ピークだけを考えると、エネルギー分解能を求めると、半値幅で約900 eVとなる。また、同図の中のX線を照射しない場合の波高分布を見ると、ゼロピークの幅も同じく約900 eVとなっている。ここで半値幅について考察してみる。

半値幅 ΔE は、次のように表すことができる。

$$\Delta E = 2.35 \cdot (\sigma^2 + WEF)^{1/2} \quad \text{①}$$

ここで W : 平均電離エネルギー (3.7 eV, Si)

E : 入射光子のエネルギー

F : ファノファクタ (0.12, Si) [6]

σ : 測定系全体からくる揺らぎ

ここで σ の部分は、次のように表される。

$$\sigma^2 = \sigma_{re}^2 + \sigma_{th}^2 + \sigma_{tr}^2 + \sigma_{etc}^2 \quad \text{②}$$

ここで σ_{re} : 読み出し雑音による揺らぎ

σ_{th} : 熱雑音による揺らぎ

σ_{tr} : 電荷転送効率による揺らぎ

σ_{etc} : その他測定系、処理系からくる揺らぎ

つまり σ は、入射光子のエネルギーに関係せず、ゼロピークの幅に相当する。そこで、CCD素子を外し、電氣的に等価な負荷を接続して測定した結果、CCD素子から後ろに設置した測定系、信号処理系による雑音は殆どなかった(50 eV以下)。つまり、式②の σ_{etc} は、無視できることになる。従って、ここで得られたゼロピークの幅は、素子自信の読み出し雑音と熱雑音、及び電荷転送効率による揺らぎの和であることが判った。

式②で、熱雑音 σ_{th} とは、熱的に励起された電子、いわゆる暗電流に起因する揺らぎであるので、

$$\sigma_{th} = \{A \exp(-E_g/2kT)\}^{1/2} \quad \text{③}$$

ここで E_g : エネルギーギャップ (~1.1 eV, Si)

k : ボルツマン定数

T : 絶対温度

A : 定数

と表される。そこで、ゼロピークの幅の温度依存性を測定した。その結果を図-9に示す。素子の温度が-50°C程度までは、熱雑音が主に効いていることが分かるが、それ以下になると読み出し雑音等が主になると考えられるため殆ど一定になっている。今回の測定では、CCD素子を-60°C程度に冷却しているので、熱雑音の影響は、ほとんど無視できる。

次に電荷転送効率による影響を調べるために、転送回数の多い画素と転送回数の少ない

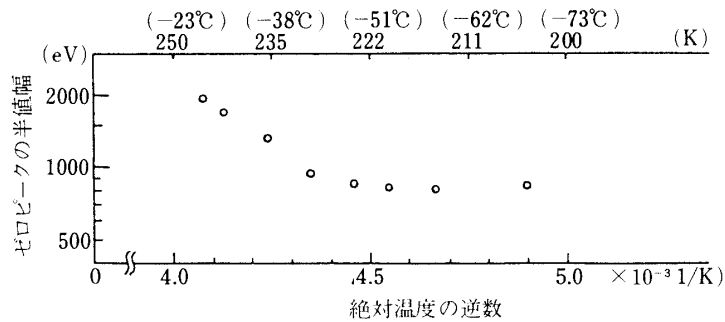


図-9 ゼロピークの幅を種々の温度で測定した結果を示す。温度が高い間は、熱雑音で決まる揺らぎを持つが、ある程度温度が下がると読み出し雑音だけが残り、一定の揺らぎとなる。

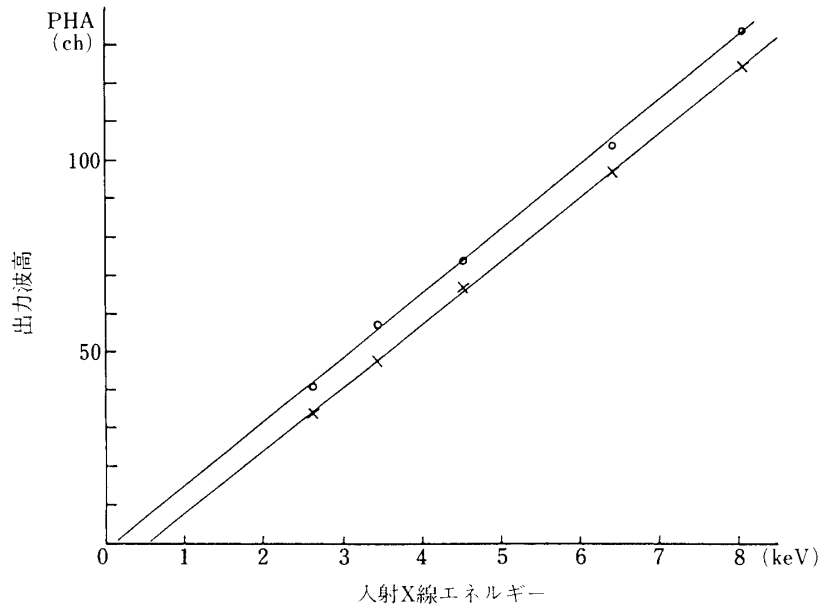


図-10 一画面を二分割して、転送回数の多い部分と少ない部分の画素（両者の転送回数の差の平均は、約120回）からの出力波高と入射X線エネルギーの関係を、図-8の様にして示した。転送回数の多い方（×）が少ない方（○）と比較して、X線のエネルギーによらず、出力波高が約5%小さいことが分かる。これは、転送回数の違いによるもので、転送効率の影響と考えられる。

画素（両者の転送回数の差の平均は、約120回）を各々集めて波高分布を求め、図-8の様にX線エネルギーと出力波高（ゼロピークからX線ピークまでの差）の関係を示したのが図-10である。これから、転送回数が多いと出力波高が小さくなっていることが分かる（約5%）。これは、転送回数の違いによって生じたもので、電荷転送効率が影響していると考え

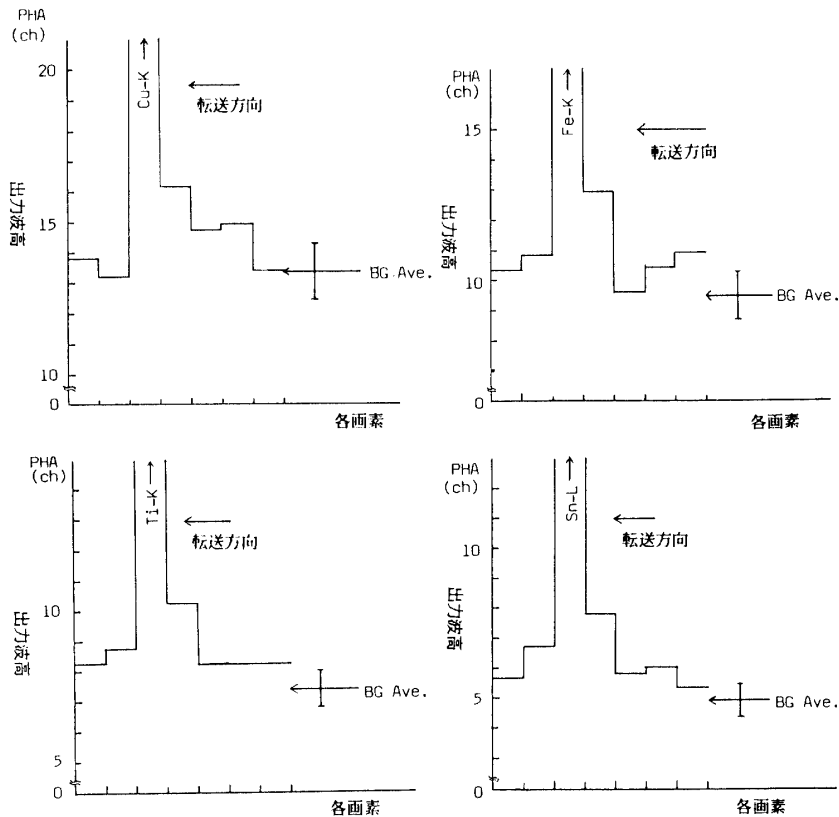


図-11 波高分布で X 線ピークを作っている画素を中心に、重ね合わせ平均を取って、各画素単位で表示した。ここで転送方向は←であるので、X 線の入った画素の後にテールを曳いているのが分かる。これからも転送効率の影響が伺える。この時全画面に入射した X 線のフラックスは弱く、隣あった画素に X 線が入射することは、ほとんどない。

えられる。従って電荷転送効率は、 $0.9994 \pm 0.0004 (-60^\circ\text{C})$ と見積られる。また、波高分布で、X 線ピークを作っている画素を中心にして、その周りの画素を重ね合わせて平均してみた。この時、転送方向に沿ったある列の画素の出力を、その列に沿って順番に示したものが、図-11 である。X 線が入った画素の後にテールを曳いている。これから電荷転送効率を求めると $0.9996 \pm 0.0002 (-60^\circ\text{C})$ となり先に求めたものと良く一致する。この様に電荷転送効率の影響が分かるが、電荷転送効率は、転送させるクロックの波形、電圧、周波数等によって改善できるので一概には言えない。[7] また今回は、電荷転送効率の影響が無視できるような部分で波高分布を求めたので、ゼロピークの幅 (900 eV) の主因が、電荷転送効率による揺らぎとは考えられない。

この様に考えると、ゼロピークの幅は、読み出し雑音を反映していると言える。ゆえに、読み出し雑音による揺らぎは電子 100 個程度 (1σ) に相当することが分かる。これは、可視光用に多用されている CCD 素子の代表的な値 [5] と言える。

次に、X 線ピークの幅の原因は、上のゼロピークの幅の原因の外に、式①の様に一次電

子数の揺らぎが加わる。一次電子数の揺らぎは、例えば銅の特性 X 線の場合には、電子 15 個 (1σ , ファノ因子を 0.12[6]とした) にしかならない。また、今回の実験では、熱雑音が殆ど効かない領域で測定している。このことから、この実験における CCD 素子のエネルギー分解能は、入射 X 線エネルギーよりは、読み出し雑音レベルで決まっていると言える。これが、今回測定した X 線ピークの幅が殆どエネルギーに依らない理由である。幅を決めている読み出し雑音レベルは、CCD 素子に内蔵された最終段のアンプの特性であり、その CCD 素子固有のものである。

まとめ

今回、可視光用に開発された CCD 素子であるが、これに種々の軟 X 線を照射してその特性を調べた。その結果、この種のものでも、二次元撮像素子としては十分な性能を発揮することが判った。X 線を照射した場合にも、生じた一次電子群の拡散に因って、像がぼけると言うことは少ない。二次元像の位置分解能は、各画素の大きさで決まる。更に、フィルムに比べれば量子効率が大変優れており、データを直接コンピュータに取り込むので、画像処理等の解析が、容易にかつ迅速に行うことができる。

次に、X 線のエネルギーを測定する場合には、可視光用の素子では不十分な結果しかでなかった。これは、X 線を測定するには余りにも空乏層が薄いこと (8 keV の X 線の珪素中の平均自由行程は $70 \mu\text{m}$ である)、またビデオカメラ等で使用する場合に比べて信号が小さく (8 keV の X 線による信号の CCD 素子からの出力は約 1 mV で、飽和出力の 1/200 程度)、素子の読み出し雑音が大き過ぎることである。この点では、外国の X 線専用で作られた素子[2]には遙かに及ばない。

今後、X 線に使用できる素子を開発して行くには、空乏層を厚くすること、素子に搭載するアンプの低雑音化 (読み出し雑音の低減) 等が必要である。

謝 辞

今回の測定に当たっては、シャープ株式会社から種々の協力を得ました。それは、大阪大学の宮本重徳教授と、シャープ株式会社 IC 事業本部の青木良正副統轄との支援に依ります。X 線測定のために、入射窓ガラスを取り去った CCD 素子や、周辺専用 IC もいただきました。また、技術的なサポートやアドバイスも数多くいただきました。同社の宮武茂博氏には、これらの実務的な面で大変御世話になりました。以上の関係者に深く感謝します。また、この実験は、宇宙科学研究所の搭載機器基礎開発実験費等により行いました。

参 考 文 献

- [1] Chowanietz E. G., Lumb D. H., Wells A. A. SPIE 597 (1985) 381.
- [2] Wells A., Lumb D. and Willingale R. ESA symp. 239 (1985) 297.
- [3] シャープ株式会社, LZ 22187, 仕様書 EL 59608.
- [4] Lumb D. H. and Hopkinson G. R. NIM 216 (1983) 431.

- [5] 家正則 科研費研究報告, No. 60420001 (1987) 13.
- [6] Goulding F. S. and Landis D. A. IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-29 (1982) 1125.
- [7] Janesick J. R. et al SPIE 501 (1984) 2.