

Title	Diagnostics of the X-ray CCD with Subpixel Resolution
Author(s)	平賀, 純子
Citation	大阪大学, 2002, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/43605
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉 大阪大学の博士論文について 〈/a〉 をご参照ください。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

氏名	平賀純子
博士の専攻分野の名称	博士(理学)
学位記番号	第 16794 号
学位授与年月日	平成14年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当 理学研究科宇宙地球科学専攻
学位論文名	Diagnostics of the X-ray CCD with Subpixel Resolution (画素サイズより高い位置分解能でのX線 CCD 詳細診断)
論文審査委員	(主査) 教授 常深 博 (副査) 教授 高原 文郎 京都大学教授 小山 勝二 立教大学教授 北本 俊二 助教授 林田 清

論文内容の要旨

Charge-Coupled Device (CCD) は小さな画素が二次元に多数並んだ撮像素子で、デジタルカメラなどの可視光用だけでなく、X線検出器としても活躍している。X線が CCD に入射した場合、CCD 内部で光電吸収され、最終的に入射 X 線に比例した数の電子を作る。X 線光子一個から生成される電子数を計測すれば、CCD は撮像素子としてのみならず、エネルギー分解能をもつ検出器としての性能も発揮する。一個の X 線光子により生成される電子数は、珪素の平均解離エネルギー 3.65eV で決まり、我々が注目する 0.1~10keV の X 線の場合、その数は数百から数千個にもなる。この電子の集団を電子雲と呼び、電子雲が電極まで引かれ、信号として検出されるときにはある程度広がってしまう。故に、X 線光子一個による信号 (X 線イベント) には、一画素だけでなく、複数画素にまたがって、高い信号強度を検出しているイベントなど、様々なパターンがあることが知られていた。

CCD の位置分解能は原理的に画素の大きさで決まっています、10 μ m 程度である。また、その表面は、画素境界を形成するチャンネルストップ構造や、電荷転送するための複数の電極が配置され非常に複雑である。これら表面構造は低エネルギー X 線にとっては吸収体として働くため、検出効率は一画素内で様ではない。ところが、CCD から画素を単位とした信号強度しか分からないため、これまで CCD の応答関数構築では、画素内構造を実測することなく較正する他なかった。より詳細な応答関数構築のためには表面構造を考慮した較正が不可欠で、そのために X 線入射位置を画素よりも高い精度、つまり μ m オーダーで制御できなければならない。細いペンシルビームで画素内を走査すればよいが、一本のペンシルビームを μ m オーダーで制御することはもちろん、ビームの照射位置を CCD 画素内で特定することは不可能である。そこで現実的な手法として、我々は CCD の持つ大量の画素を限なく活用したマルチペンシルビームを実現することで、全てのビーム位置を一挙に特定できる実験手法、「メッシュ実験」を考案した。

メッシュ実験では、CCD 受光面直前に厚み 10 μ m 程度の金属メッシュを置く。メッシュには画素よりも小さい直径 2 μ m の穴を周期的に多数あけ、メッシュの穴だけを X 線が通過することで、マルチペンシルビームを実現する。さらに、メッシュ穴が周期的に開いていることを利用して、メッシュを CCD に対しわずかに傾けて配置すれば、各々のビーム (穴) の画素内照射位置が画素毎に微妙に異なり、画素内構造を拡大したモアレパターンが生じる。実験で得られるモアレパターンを利用して、メッシュと CCD との相対位置関係を決めれば、全てのメッシュ穴の位置、つまりビームの画素内照射位置を特定できる。また同時に、メッシュを動かすことなくマルチペンシルビームで画素内

を走査できる。

様々な素子を用いてメッシュ実験を行い、画素内検出効率の違いを明らかにした。また、様々なエネルギーの異なるX線を用いた実験により、不感層の探さ構造を調べることができる。低エネルギーX線検出効率を上げるために電極の一部を削って薄くした特殊な表面構造を持つ EPIC MOS CCD (XMM-Newton 衛星搭載) について実験した結果、削った部分は他と比べて $1\ \mu\text{m}$ 程度不感層が薄くなっていることを初めて実測した。

メッシュ実験により、X線入射位置を高精度で決定できたので、X線画素内入射位置に対する CCD 一面素からの出力信号変化を詳細に調べることができ、一画素からの出力信号が電子雲形状を一画素の範囲で積分した値であることを用いて、CCD 内部でX線光子により生成されるもとの電子雲形状を初めて実測した。異なるエネルギーのX線、Al-K (1.5keV)、Mo-L (2.3keV)、Ti-K (4.5keV) について電子雲形状を実測した結果、いずれも軸対称なガウス関数で良く表せ、大きさは標準偏差で $0.7\sim 3.5\ \mu\text{m}$ となった。また、珪素中の平均吸収距離が長いほど電子雲は大きく、その違いは CCD 内部の拡散過程で説明できた。

一旦電子雲形状を実測しておけば、CCD のイベントパターンからX線入射位置を高精度で決定できるはずである。我々は、実測した電子雲形状を元に、各X線イベントパターンからX線入射位置を高精度で推定し、推定したX線入射位置の位置決定精度は標準偏差で $0.7\ \mu\text{m}$ まで向上することを実証した。これはX線 CCD が究極の位置分解能を持つ撮像素子として活用できることを明らかにした初めての例である。

論文審査の結果の要旨

Charge-Coupled Device (CCD) は小さな画素が二次元に多数並んだ撮像素子で、デジタルカメラなどの可視光用だけでなく、X線検出器としても活躍している。平賀さんは CCD のX線検出における素過程やその性能評価を行うために、メッシュ実験を行った。もともとは、CCD の画素内構造を評価する手段として開発された手法であるが、その評価方法を改善し、完成させた。その結果、ヨーロッパのX線観測衛星ニュートンに搭載した CCD の測定なども行った。また、この手法を発展させた結果、X線が CCD 内部で光電吸収された時に発生する多数の電子 (電子雲) がどのような形状になっているかを初めて実測した。こうして、X線エネルギーや素子やその動作状況に依存するが、電子雲形状は標準偏差で $0.7\sim 3.5\ \mu\text{m}$ の広がりを持つガウス分布になっていることを見つけた。この電子雲形状と実際にX線検出時のイベントパターンとから、X線入射位置をサブ μm で決定する手法を考案し、それを実験的に実証した。今後、裏面照射型素子、あるいは高エネルギーX線に対しては、CCD が実用的なサブ μm レベルの画像検出器となることを示している。以上の観点から、博士論文として十分価値あるものと認める。