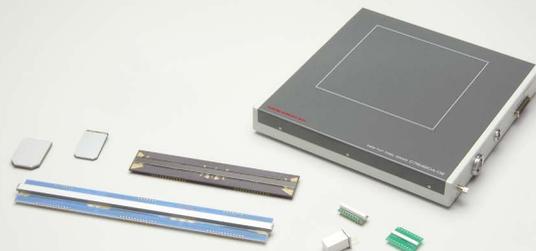


X線検出器



目次

1. Siフォトダイオード

- p.02 1-1 構造
1-2 応用回路例

2. Siフォトダイオードアレイ

- p.04 2-1 特長
2-2 構造
2-3 応用例

3. アンプ付フォトダイオードアレイ

- p.06 3-1 特長
3-2 構造
3-3 動作原理
3-4 特性
3-5 使い方

4. CCDエリアイメージセンサ

- p.08 4-1 ダイレクト式CCDエリアイメージセンサ
4-2 シンチレータ式CCDエリアイメージセンサ
4-3 使い方
4-4 応用例

5. CMOSエリアイメージセンサ

- p.13 5-1 特長、構造
5-2 使い方
5-3 応用例

6. フラットパネルセンサ

- p.15 6-1 特長
6-2 構造
6-3 動作原理
6-4 特性
6-5 使い方
6-6 応用例

1895年にドイツのレントゲン博士によって発見されたX線は、物理学から産業・医療などの幅広い範囲に利用されています。X線検出器は、a-Si検出器をはじめとして単結晶検出器・化合物検出器など幅広い範囲にわたります。特にSi単結晶を材料とした検出器には、多くの種類があります。X線検出器は、手荷物・食品・工業製品の非破壊検査装置、物理学実験などに加えて、医用機器分野では歯科X線撮像装置・X線CT（コンピュータ断層撮影）などの機器で使用されています。

X線のエネルギー領域の中で、軟X線と呼ばれる数百eVから20 keV程度までの低エネルギー領域では、Siフォトダイオード・Si APD・CCDエリアイメージセンサなどのダイレクト式検出器が利用されています。これらは検出効率が高く、高いエネルギー分解能が得られるため、X線分析・X線天文観測機器・物理学実験などに使用されています。

軟X線より高いエネルギー領域である硬X線領域は、物質に対する高い透過率を利用して産業機器・医用機器に応用されており、シンチレータを用いてX線を可視光に変換し、変換された可視光を検出することで間接的にX線を検出するシンチレータ式検出器が広く使用されています。特に医療分野では、従来のフィルム方式に取って替わり、大型受光面のX線検出器を利用したデジタルレントゲンが主流となってきています。また非破壊検査では、高・低エネルギーのX線を同時に検出して深い階調の画像取得を可能とするデュアルエネルギーイメージングが普及してきています。

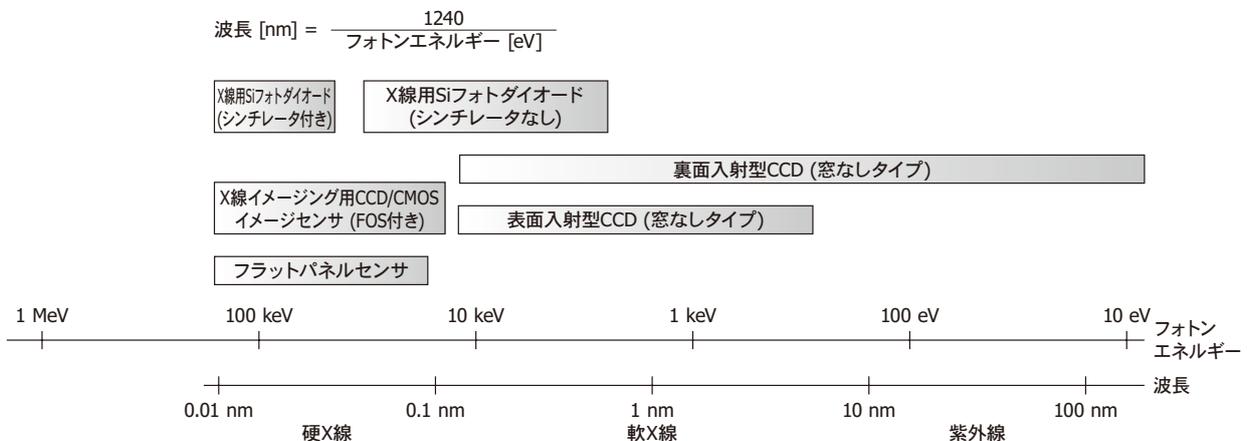
当社は、X線検出器としてSiフォトダイオード・Si APD・CCDエリアイメージセンサ・CMOSエリアイメージセンサ・フラットパネルセンサなどを用意しています。

医療診断などに使用する場合、お客様側で医療機器としての認可を取得する必要があります。

◆ 浜松ホトニクス の X線検出器

タイプ		特長
Siフォトダイオード		<ul style="list-style-type: none"> ● CsI(Tl)またはセラミックシンチレータと組み合わせた製品を用意 ● X線ダイレクト検出用のSiフォトダイオードを用意 ● タイリング(2次元配列)が可能な裏面入射型CSPフォトダイオードを用意
Siフォトダイオードアレイ		<ul style="list-style-type: none"> ● 複数配列によって長尺イメージセンサを構成できる ● デュアルエナジーイメージングにも対応
イメージセンサ	アンプ付フォトダイオードアレイ	● 複数配列によって長尺イメージセンサを構成できる
	CCDエリアイメージセンサ	<ul style="list-style-type: none"> ● FFT-CCDにFOSをカップリング(シンチレータ式CCD) ● X線ダイレクト検出用の表面入射型CCDを用意
	CMOSエリアイメージセンサ	● CMOSイメージセンサにFOSをカップリング
	フラットパネルセンサ	<ul style="list-style-type: none"> ● 大面積2次元撮像用 ● 画像歪みのない高精細デジタル画像をリアルタイムに得られる

◆ 検出可能な光子エネルギー・感度波長範囲の例



KMPDC01783C

1. Siフォトダイオード

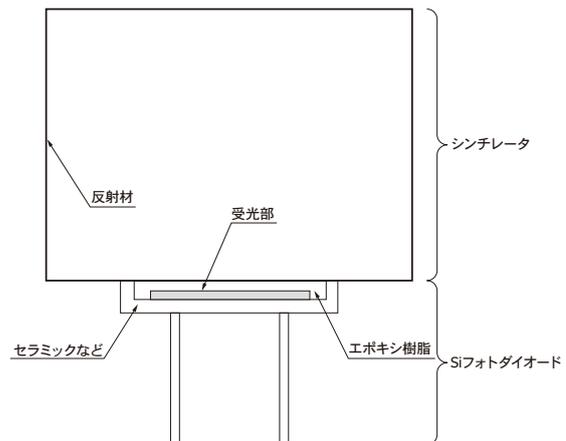
SiフォトダイオードをX線検出用に使う場合、通常はシンチレータと組み合わせてシンチレータ式検出器として使用します。当社では、シンチレータ付Siフォトダイオードと、ユーザー側でシンチレータを貼り合わせることを想定したシンチレータなしの2種類のX線検出用Siフォトダイオードを用意しています。いずれもシンチレータの発光帯に合った感度をもっています。

1-1 構造

◆ シンチレータ付Siフォトダイオード

シンチレータ付Siフォトダイオードは、CsI(Tl)シンチレータまたはGOSセラミックシンチレータとカップリングされています。シンチレータの周りには、シンチレータの発光を受光部以外に逃がさないように反射剤が塗布されています [図1-1]。

【図1-1】 シンチレータ付Siフォトダイオード



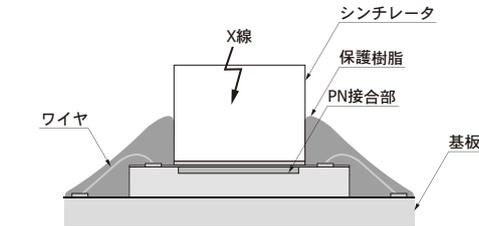
KSPDC00031D

裏面入射型Siフォトダイオードは、PN接合部が光入射面の反対側(裏面)にあるSiフォトダイオードです [図1-2 (b)]。シンチレータの接合面は平坦でワイヤがないため、ユーザー側でシンチレータを接着する際にフォトダイオードの損傷を防ぐことができます。また表面入射型のようにワイヤのエリアが存在しないため小型にするこ

とができます。さらに、複数のフォトダイオードを少ないデッドスペースで並べることができ、大面積のX線検出器として使用することが可能です。

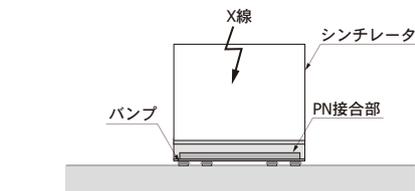
[図1-2] Siフォトダイオードとシンチレータを組み合わせた例

(a) 表面入射型Siフォトダイオード



※デメリット
シンチレータを付ける際に、パターンやワイヤを損傷させる可能性がある。

(b) 裏面入射型Siフォトダイオード



※メリット
ワイヤがないため、シンチレータを付けやすい。複数のフォトダイオードの間隔を詰めて、タイル状に配置できる。

KPDC00373A

◆ ダイレクト式Siフォトダイオード

X線は電荷をもたないため、直接的にはSi結晶中に電子-正孔対を作りません。しかし、Si原子とX線との相互作用によって、照射されたX線が失ったエネルギーと同じエネルギーの電子が基底状態から解放されます。この電子のクーロン作用で電子-正孔対が生成され、これをとらえることによってX線を検出します。したがってダイレクト式のX線検出においては、X線がSi原子と相互作用をする確率が大変重要になってきます。

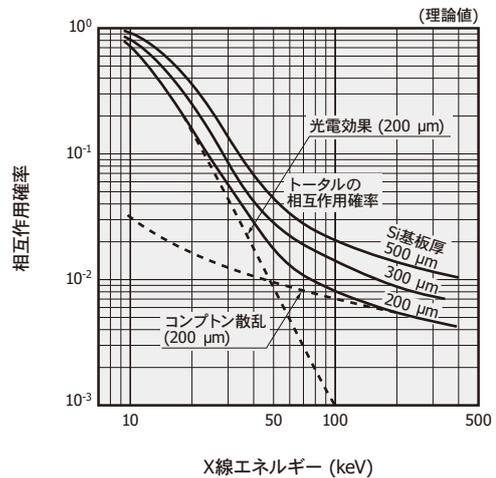
ダイレクト式Siフォトダイオードは、50 keV以下のレベルのX線を効率よく検出することができます。50 keV以下のX線の検出では、X線のエネルギーを電子のエネルギーに変換する光電効果が支配的になり、生成した電子をSiフォトダイオードでとらえることで、X線粒子の全エネルギーを検出することが可能です。

50 keV~5 MeVのX線やγ線の検出ではコンプトン散乱が支配的で、X線やγ線のエネルギーの一部が電子のエネルギーに変換されます。この場合、減衰したX線・γ線がさらにSiと相互作用する（光電効果やコンプトン散乱による）確率が検出確率に影響を与え、現象を複雑にしています。

図1-3は、厚さ 200 μmのSi基板で光電効果とコンプトン散乱が起こる確率（点線）と、厚さ 200 μm・300 μm・500 μmのSi基板におけるトータルの相互作用確率（実線）を示しています。

図から分かるように、厚いSi基板で作製したフォトダイオードほど高い検出確率を得ることができます。Si基板の厚さが500 μmの場合10 keVではほぼ100%の検出確率ですが、100 keVでは数%に落ちてしまいます。なお、ダイレクト式Siフォトダイオード内部の電子の飛程は、10 keVで1 μm、100 keVで60 μm程度です。

[図1-3] ダイレクト式Siフォトダイオードの検出確率

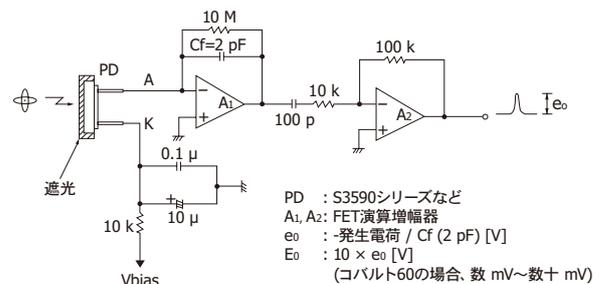


KSPD800183A

1-2 応用回路例

放射線による吸収や散乱をフォトダイオードが受けると、その部分に電荷が発生します。この電荷は、光を検知した時と同様に外部に取り出すことができます。図1-4はチャージアンプの回路例です。フォトダイオード内部で発生した電荷を電圧パルスに変換します。A1にはスルーレートが大きく、バイアス電流の小さいFET演算増幅器を使用します。フォトダイオードの面積を大きくすると検出確率は面積比率分増加しますが、接合容量が大きくなるので雑音が増加し、S/Nが悪化する可能性があります。フォトダイオードは可視光にも感度があります。その背景光を避けるために、反射材・遮光材などを用いて隙間なく遮光する必要があります。

[図1-4] チャージアンプの回路例



KSPDC01113A

2. Siフォトダイオードアレイ

手荷物の内部の形状や材質を調べるための手荷物検査装置が空港などで利用され、近年は高精度なCT方式の手荷物検査装置も開発されています。当社のシンチレータ付Siフォトダイオードアレイはこれらの手荷物検査装置に広く利用されています。手荷物に照射されたX線は物体を透過した後、シンチレータで光に変換され、変換された光をSiフォトダイオードアレイが検出します。当社の手荷物検査用Siフォトダイオードアレイは低ノイズで、感度などの特性のバラツキが素子ごとで少ないという特長をもち、フォトダイオードチップが精度よく実装されているため高精度な検出が可能です。その上、シンチレータの発光波長に合った感度をもつため、手荷物検査用に適しています。

[図2-1] 手荷物検査装置の撮像例



2-1 特長

▶ 低コスト

裏面入射型構造の採用によって、シンチレータ実装の工程などを簡素化することができ、その結果、製造工程を短縮することができます。

また、裏面入射型Siフォトダイオードアレイは、電極部にバンプを採用しています。バンプは液晶ディスプレイの製造工程などに用いられており、量産に適しています。バンプの採用によって、当社従来品よりもコスト低減が図られています。

[表2-1] シンチレータの比較表

項目	条件	CsI(Tl)	GOSセラミック	単位
ピーク発光波長		560	512	nm
X線吸収係数	100 keV	10	7	-
屈折率	ピーク発光波長時	1.74	2.2	-
減衰定数		1	3	μs
残光	100 ms後	0.3	0.01	%
密度		4.51	7.34	g/cm ³
色調		透明	薄黄緑	-
感度のバラツキ		±10	±5	%

▶ 堅牢性

裏面入射型構造の採用によって、ワイヤを用いないで、フォトダイオードアレイの出力端子と基板電極をバンプにより接続しています。基板の配線を基板内部に収めているため、堅牢性を実現しています。

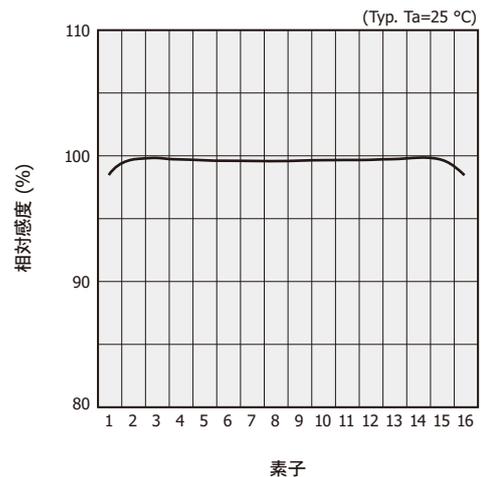
▶ 高信頼性

裏面入射型Siフォトダイオードアレイは、シンチレータ実装面にパターンやワイヤがないため、それらを損傷することなく、シンチレータをフォトダイオードアレイに実装することが可能です。また、ワイヤがないため、温度変化による断線が発生しにくいなど、高い信頼性を確保しています。

▶ 優れた感度均一性

裏面入射型Siフォトダイオードアレイ (S11212/S11299シリーズ)は、素子間の感度バラツキを最小に抑え、センサ端の素子の感度変動を低減しています。

[図2-2] 感度均一性 (S11212/S11299シリーズ)

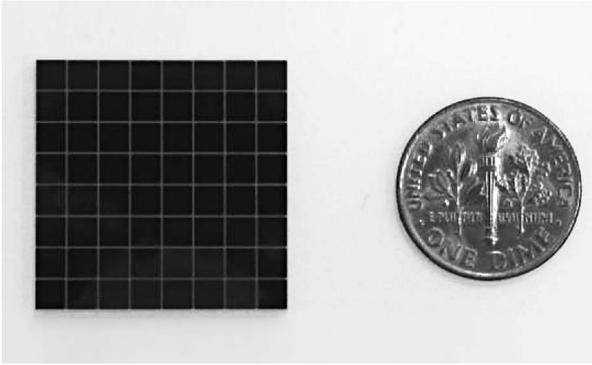


KPD800231C

▶ タイリングが可能

裏面入射型Siフォトダイオードは、図1-2 (b)に示したようにワイヤのスペースがないため、複数のフォトダイオードの間隔を詰めて、タイル状に配置 (タイリング)することができます。

[図2-3] タイリングの例 (S13620-02)

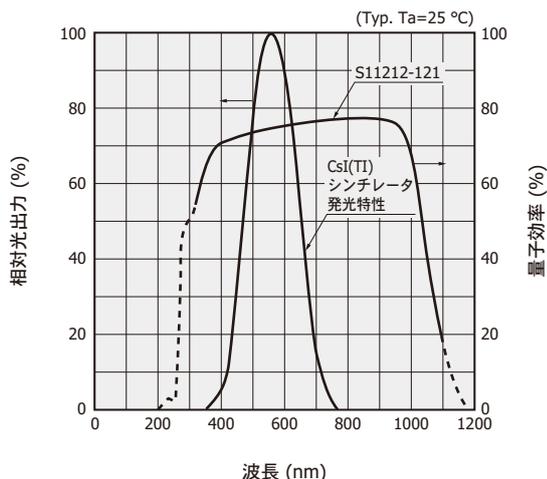


2-2 構造

当社の手荷物検査装置用Siフォトダイオードアレイの多くは、裏面入射型構造を採用しています。裏面入射型Siフォトダイオードアレイは、シンチレータとの接合面に、パターンやワイヤをもたないため、シンチレータ実装時にパターンやワイヤの損傷を防ぐことができます。表面入射型／裏面入射型フォトダイオードとシンチレータを組み合わせた場合の断面図を図1-2に示します。シンチレータの例としては、CsI(Tl)とGOSセラミックがあります。GOSセラミックは発光のバラツキが少なく、信頼性が高いという特長があります。なお、当社は環境管理物質であるカドミウムを含むCWOシンチレータは推奨していません (CWOシンチレータに対応は可能)。

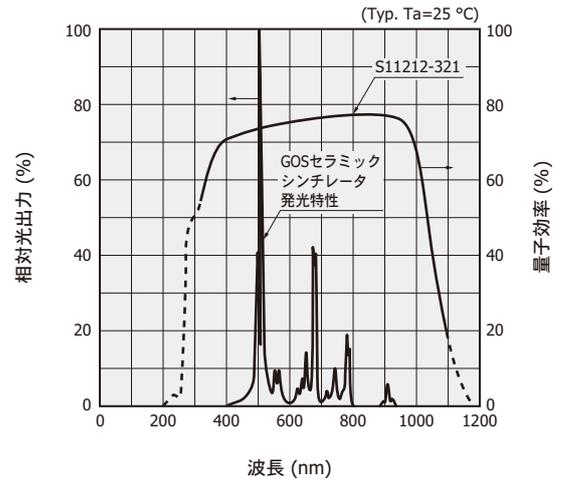
[図2-4] Siフォトダイオードアレイの分光感度特性とシンチレータの発光スペクトル

(a) S11212-121



KSPD80330JB

(b) S11212-321



KSPD80331JB

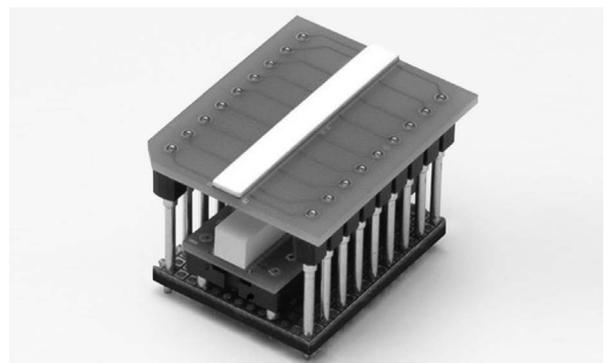
2-3 応用例

デュアルエネルギーイメージング

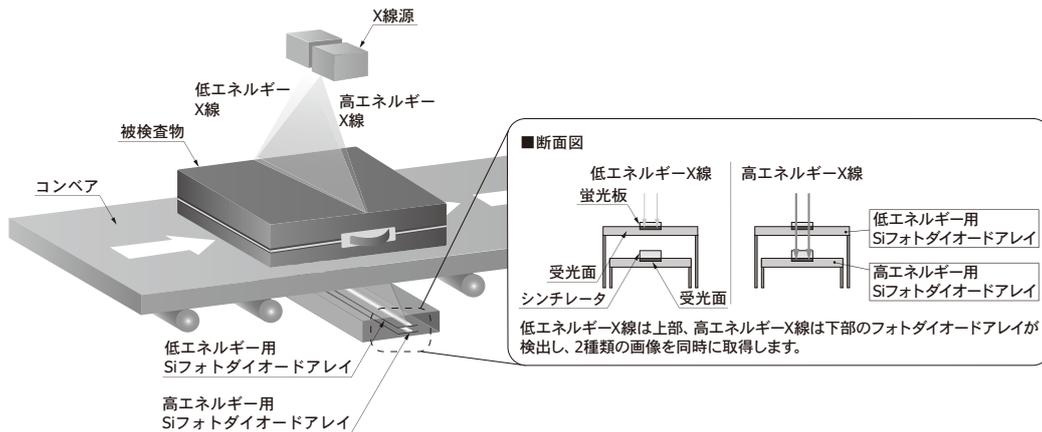
通常のX線非破壊検査では、物体を透過したX線情報を1種類のセンサで検出し、物体の形状・密度などを濃淡で画像化します。これに対し、デュアルエネルギーイメージングでは、高エネルギー画像と低エネルギー画像を2種類のセンサが同時に取得し、それらの画像を演算処理して画像化するため、硬物質や軟物質の情報を詳細に示した画像を取得することができます。デュアルエネルギーイメージングは、特定薬物・爆弾などの危険物の抽出などのセキュリティ分野の他に、穀物・果実・食肉などの検査など幅広い分野で利用されています。

当社の裏面入射型Siフォトダイオードアレイ S11212/S11299シリーズは、デュアルエネルギーイメージングに対応しており、高エネルギーX線と低エネルギーX線を同時に検出できるように、2種類のシンチレータ付Siフォトダイオードアレイを上下2層に組み合わせ使用できる構造です。また、複数配列してラインセンサとして使用できるように近接配置が可能な構造もっています。これにより長尺の対象物の計測も可能になります。

[図2-5] 裏面入射型Siフォトダイオードアレイの組み合わせの例 [S11212-421(上)とS11299-121(下)]

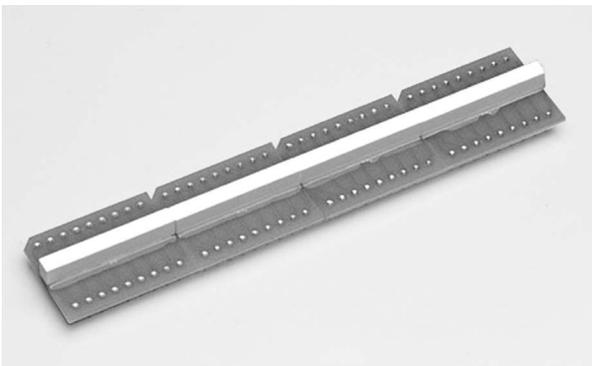


[図2-6] デュアルエネルギーイメージング



KPDC00383A

[図2-7] 複数配列の例 (S11212-121)



3. アンプ付フォトダイオードアレイ

アンプ付フォトダイオードアレイは、等倍光学系を用いた長尺検出システムに適したセンサです。SiフォトダイオードアレイとCMOS信号処理ICから構成されていて、外付け回路の構成を簡略化できます。蛍光紙を接着したアンプ付フォトダイオードアレイを複数配列することにより、X線検出用の長尺センサを構成することができます。

3-1 特長

- ▶ 複数配列により長尺センサを構成することが可能
- ▶ 5 V電圧駆動
- ▶ チャージアンプアレイによる同時蓄積方式
- ▶ シフトレジスタによる時系列信号読み出し (データレート: 1 MHz max.)
- ▶ フォトダイオードをゼロバイアス駆動するため低暗電流
- ▶ クランプ回路内蔵により低ノイズ、広ダイナミックレンジ
- ▶ タイミング発生回路を内蔵し、2種類の入力パルス (リセット、クロック)で動作
- ▶ フォトダイオード、基板、コネクタ、蛍光紙の特注対応が可能

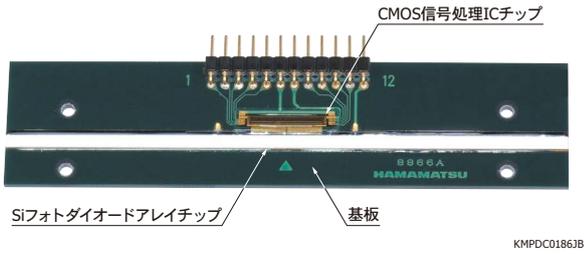
3-2 構造

アンプ付フォトダイオードアレイは、受光部のSiフォトダイオードアレイチップ、CMOS信号処理ICチップ、基板から構成されています [図3-1]。

[表3-1] 浜松ホトニクスのアンプ付フォトダイオードアレイ

型名	素子高さ (mm)	素子ピッチ (mm)	素子数	ラインレート (lines/s)
S11865-64G	0.8	0.8	64	14678
S11865-128G	0.6	0.4	128	7568
S11866-64G-02	1.6	1.6	64	14678
S11866-128G-02	0.8	0.8	128	7568

[図3-1] 構成図 (S11865シリーズ)

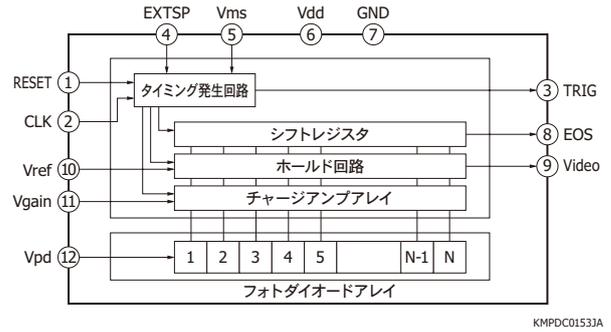


64素子または128素子ごとにCMOS信号処理ICにて信号処理を行うため、フォトダイオードアレイの素子ごとに外部信号処理回路を接続する場合に比べると、システム構成を非常に簡単にすることができます。蛍光紙付センサ上にX線を照射すると、X線は蛍光紙によって可視光に変換され、この可視光をセンサが検出します。

3-3 動作原理

CMOS信号処理ICチップは、タイミング発生回路、シフトレジスタ、ホールド回路、チャージアンプアレイで構成されています [図3-2]。フォトダイオードの各素子とCMOS信号処理ICチップ内のチャージアンプは、ワイヤボンディングで接続されています。フォトダイオードで生じた光電流 (I_L)と蓄積時間 (T_s)の積で表される光生成電荷 (Q_{out})は、チャージアンプのフィードバック容量 (C_f)によって出力電圧 ($V_{out} = Q_{out}/C_f$)に変換されます。チャージアンプがリセットされる前にホールド回路に移された出力信号は、シフトレジスタによって時系列電圧信号として読み出されます。S11865/S11866シリーズでは、全素子において同時蓄積方式で信号を読み出します。また、蓄積時間を可変するシャッタ機能も備えています。ビデオデータレートは1 MHz max.です。

[図3-2] ブロック図 (S11865/S11866シリーズ)

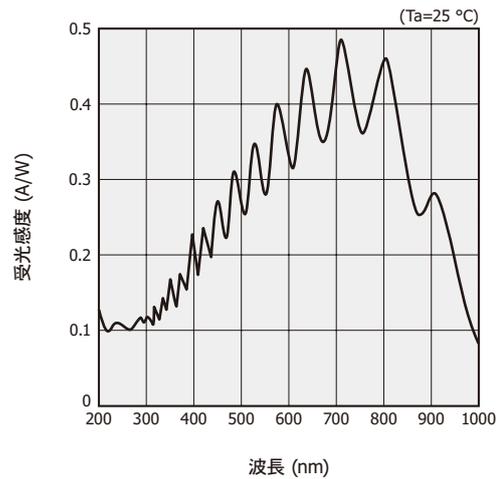


3-4 特性

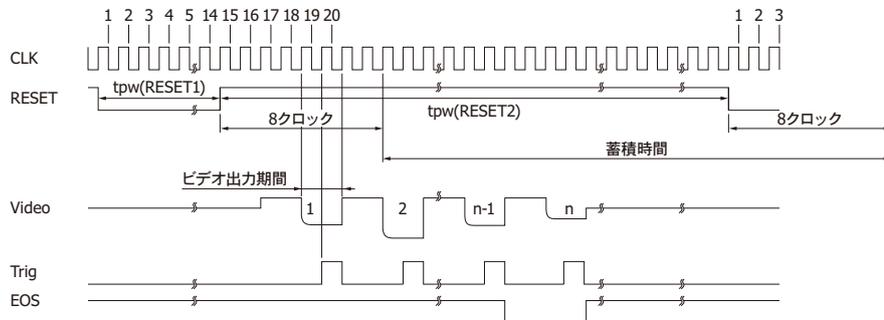
図3-3にS11865/S11866シリーズの分光感度特性を示します。蛍光紙を樹脂接着する場合は、分光感度特性はなめらかになります。

[図3-3] 分光感度特性 (S11865/S11866シリーズ, 代表例)

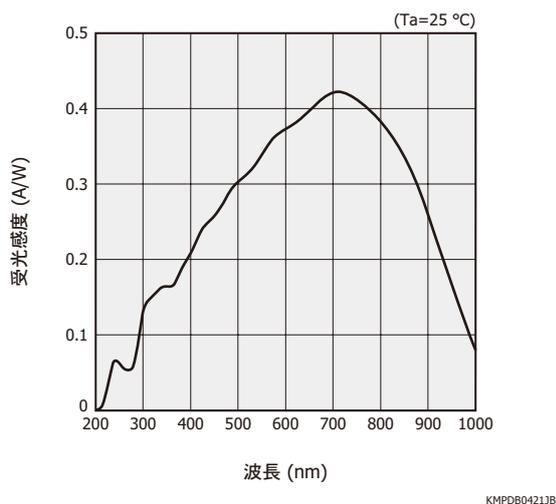
(a) 蛍光紙なし



[図3-4] タイミングチャート (S11865/S11866シリーズ)



(b) 蛍光紙付き



KMPD80421JB

3-5 使い方

S11865/S11866シリーズは、有効エリア長と基板長が同じ長さで設計されているため、複数を並べることにより、一般のイメージセンサでは作成が難しい長尺の1次元検出システムを構成することができます。複数のセンサを並べて配置した場合、各センサの出力信号を複数の外部回路で並列に読み出すことができ、1つの回路で直列に読み出すこともできます。直列に読み出す場合には、前段のエンドオブスキャン(走査終了)信号を次段のスタート信号として使用するよう外部電圧を設定します。

[図3-5] アンプ付フォトダイオードアレイを複数並べた長尺イメージセンサ



4. CCDエリアイメージセンサ

4-1 ダイレクト式 CCDエリアイメージセンサ

ダイレクト式CCDエリアイメージセンサは、30 keV以下のレベルのX線を効率よく検出することができます。

0.5 keV~10 keVのエネルギーのX線検出には、窓材のないダイレクト式CCD(表面入射型)が使用されます。0.5 keVより低いエネルギーのX線については、CCD表面に吸収層が存在するため検出できません。0.5 keVより低いエネルギーのX線を検出するためにはダイレクト式CCD(裏面入射型)が必要です。

10 keV以上のエネルギー領域で高い量子効率を実現するためには、厚い空乏層のダイレクト式CCDを用いる必要があります。

ダイレクト式CCDでは、X線イメージングと分光の両方が可能です。X線をフトンカウンティングモード(フトン1つずつ計数する方式)でも検出できます。ダイレクト式CCDは、X線天文学・プラズマ解析・結晶解析などの分野で用いられます。

》 X線ダイレクト検出の原理

あるエネルギー以上のフトンがCCDに入射した場合、電子-正孔対が生成されます。可視光のようにフトンのエネルギーが低い場合には、1つのフトンにより生成される電子-正孔対は1つだけになります。しかし、真空紫外線や軟X線のようにエネルギーが5 eV以上の領域では、1つのフトンにより複数の電子-正孔対が生成されます。Siでは1つの電子-正孔対を生成するのに必要な平均エネルギーは約3.6 eVのため、たとえば5.9 keV(MnのK α)の1つのフトンに対しては1620個の電子-正孔対がCCD内で生成されます。

X線ダイレクト検出によって生成される電子の個数は、入射するフトンのエネルギーに比例します。

》 特性

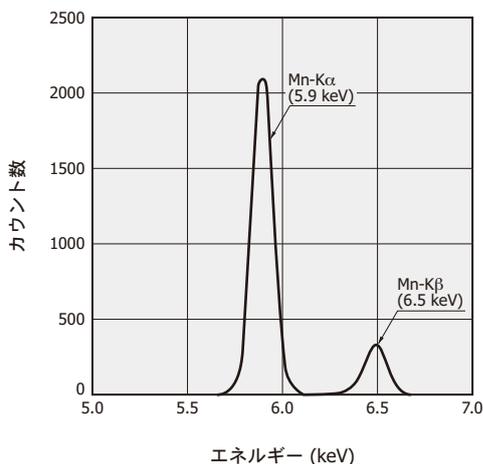
図4-1にFe-55の線源から入射したX線(Mn-K α /K β)をCCDが検出した結果を示します。一般にスペクトルの分解能はFWHM(Full Width at Half Maximum)を使って評価され、Fe-55に対するSi検出器のFano限界(エネルギー分解能の理論上の限界)は109 eVです。

エネルギー分解能を劣化させる主な要因には、CCDの電荷転送効率と暗電流を含むCCDのノイズがあります。十分に冷却された非転送効率 1×10^{-5} 以下のCCDでは、読み出しノイズによりエネルギー分解能が決まります。

エネルギー分解能をよくするためにCCDの読み出しノイズは5 e⁻ rms以下の低い値が必要とされ、最適に調整された当社のCCDではFe-55で140 eV以下のエネルギー分解能が達成されています。

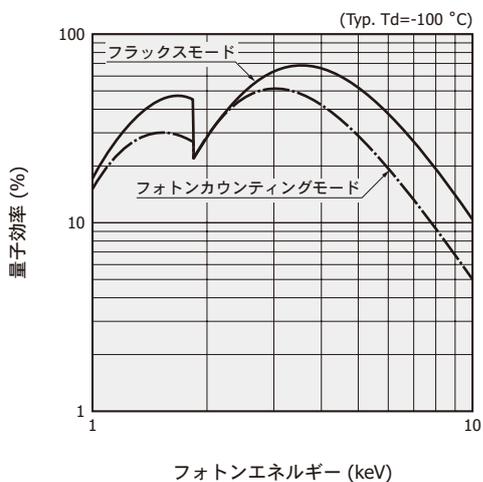
X線領域におけるCCDの量子効率には、光子カウンティングモードと、全光子を積分したフラックスモードの2つがあります。通常の可視光領域における量子効率はフラックスモードです [図4-2]。

[図4-1] X線 (Mn-K α /K β)を検出したCCDのエネルギー分解能 (代表例)



KMPDB02363A

[図4-2] 量子効率-光子エネルギー



KMPDB01543A

4-2 シンチレータ式 CCDエリアイメージセンサ

CCDは、可視光・赤外線・紫外線の他に30 keV以下のX線をダイレクトに検出して画像を取得することが可能です。しかし、医療機器や工業用非破壊検査で使用される数十keVから100 keVを超えるX線領域では、シンチレータを用いて可視光に変換する必要があります。この場合、シンチレータとしては一般にCsI(Tl)やGOSが使われます。これらのシンチレータによって、X線は550 nm付近を中心とした光に変換されます。この光をCCDで検出

することでX線の検出が可能になります。

当社では、X線イメージングのような大面積が必要な用途のためにFOS (Fiber Optic plate with Scintillator: シンチレータ付FOP)をカップリングした表面入射型CCDを用意しています。FOP (Fiber Optic Plate)のみをカップリングしたタイプ (ユーザー側でシンチレータを実装)にも対応が可能です。

》 特長

▶ 高精細な画像が得られる

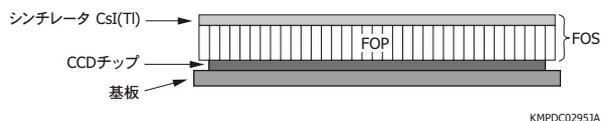
分析/計測用として幅広く採用されているFFT (Full Frame Transfer)型CCDのため高感度・低ノイズを実現しています。

》 構造と特性

❖ FOS付CCDエリアイメージセンサ

シンチレータ付FOPであるFOSをCCD上にカップリングしたタイプです。FOS付CCDでは、シンチレータとして高解像度を実現するCsI(Tl)を用いています。

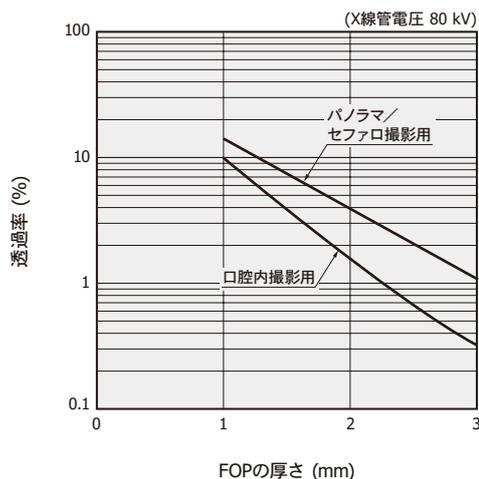
[図4-3] FOS付CCDの構造



KMPDC02953A

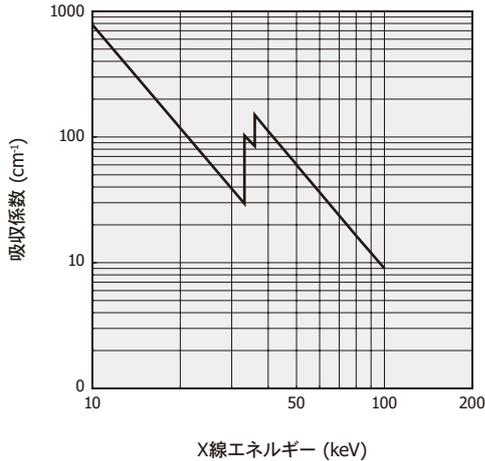
一般的に、CCDチップはX線入射によって一定の損傷を受けますが、FOS付CCDはFOPがCCDチップの受光部にあり、X線シールドの役目も果たすためX線による損傷を抑制します。また、CCD表面近くにX線が入射すると発生する電荷によって、白い斑点のようなノイズがランダムな位置に生じることがあり、画質の低下の原因となります。FOS付CCDは、FOPのX線シールドの効果によりCCDに入射するX線が少ないため、高画質を実現することができます。

[図4-4] FOPのX線透過率



KMPDB02973A

[図4-5] CsI(Tl)の吸収係数



KMPD802933A

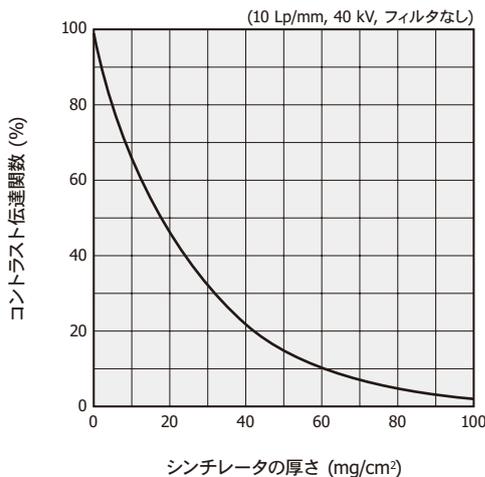
FOS付CCDの解像度は、主に以下の要因によって決まります。

- ・画素サイズ
- ・シンチレータの仕様（材質、厚さ）
- ・チップとFOPの隙間の広さ（チップの平坦度など）

CCDの構造上、画素サイズで決まる解像度を超える性能を実現することはできません。

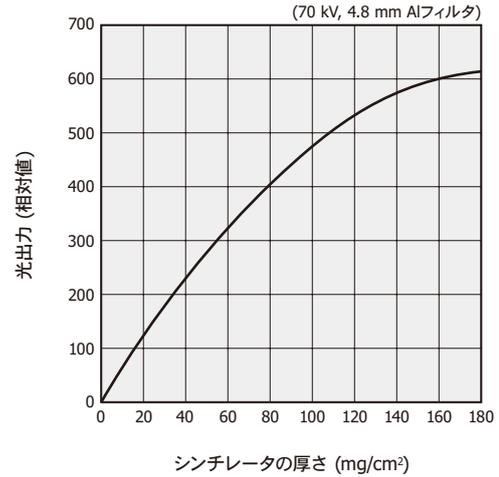
シンチレータは、厚いほど発光強度は大きくなりますが、解像度は低下します（発光強度と解像度はトレードオフの関係にあります）[図4-6, 4-7]。チップとFOPの隙間が広いほど解像度が低下してしまうため、隙間を狭くコントロールする技術が重要になってきます。なおFOPの平坦度はチップよりも高いレベルを確保しており、問題にはなりません。

[図4-6] CsI(Tl)の解像度



KMPD802993B

[図4-7] CsI(Tl)の発光強度



KMPD802983B

❄ バタブル構造

長尺タイプのパノラマ撮影用CCD／セファロ撮影用CCDでは、長い受光面を確保するために、それぞれ2チップ／3チップを近接して配置したバタブル構造を採用しています。チップ間にはデッドスペースが存在します。デッドスペースによる不感領域の例については、図4-8を参照してください。

4-3 使い方

X線画像を取得する方法としては、ワンショットまたはTDI動作による撮影があります。

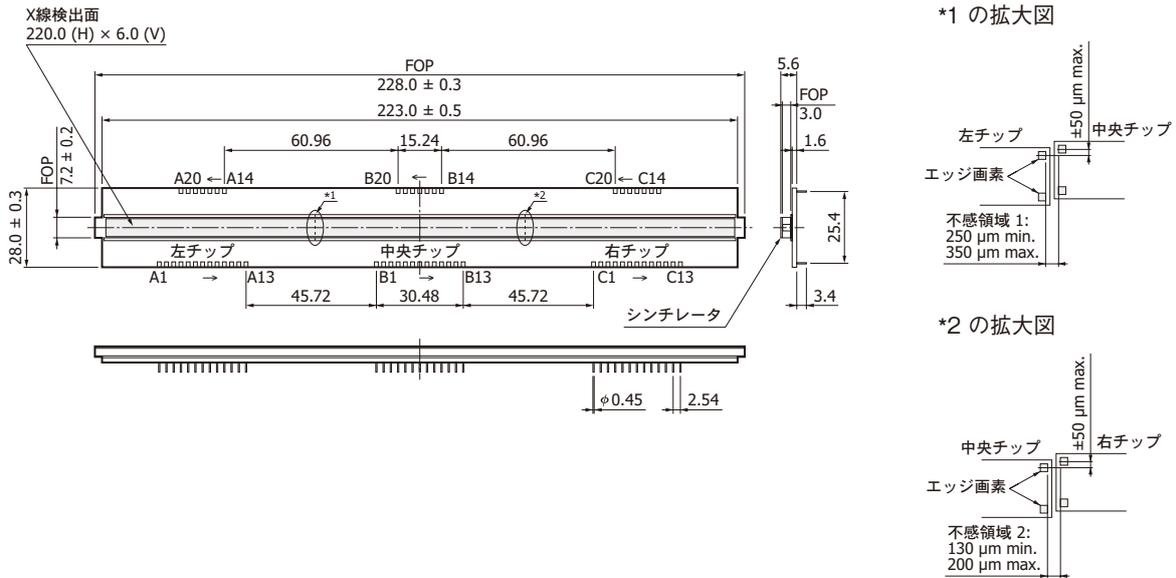
ワンショットによる撮影の場合、CCDの画素では常に暗電流による電荷が発生しているため、X線が入射しない状態（待機状態）においては、常に電荷を排出する必要があります。TDI動作を行う場合、画素の転送速度を被写体の移動速度と一致させる必要があります（「CCDイメージセンサ 技術資料／1. 構造、動作原理／1-11 TDI-CCD」参照）。

» 画質補正

CCDには、暗電流が大きな白キズや出力が小さい（感度が低い）黒キズといった画素欠陥が存在する場合があります。またFOS付CCDにおいては、シンチレータやFOPの性能が画質に影響を与えます。高画質を実現するためにソフトウェアにより暗電流と感度を補正することを推奨します。画素欠陥、暗電流や感度の補正については「CCDイメージセンサ 技術資料／3. 使い方／3-7 補正」を参照してください。

なおパノラマ・セファロ撮影／非破壊検査用CCDは、複数のCCDチップを使用しているため、チップ間にデッドスペースがあります。この影響は、ソフトウェアによる補正で抑えることができます。

[図4-8] 非破壊検査用CCDの例 (S8658-01)



KMPDA02513A

» 使用上の注意

以下の事項に注意して、X線用CCDを使用してください。

(1) 静電気、サージ対策

X線用CCDの静電気、サージ対策については、「CCDイメージセンサ 技術資料/3. 使い方/3-11 静電気/サージ対策」を参照してください。

(2) 動作/保管環境

X線用CCDは気密封止製品ではないため、湿度が高い場所での動作・保管は避けてください。また、輸送の際に激しい振動や衝撃を与えないでください。

(3) X線照射による劣化

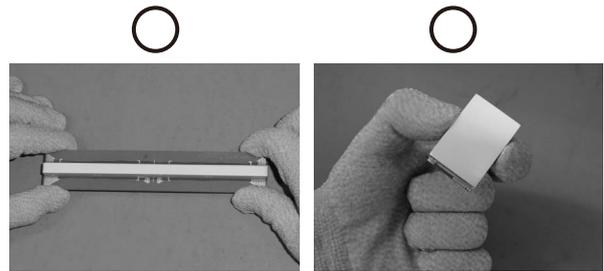
X線用CCDは、他のX線検出器と同様に過度のX線を照射することで製品の特性を低下させてしまいます。用途によっては、消耗品として交換していただく必要があります。

(4) FOS付CCDの取り扱い

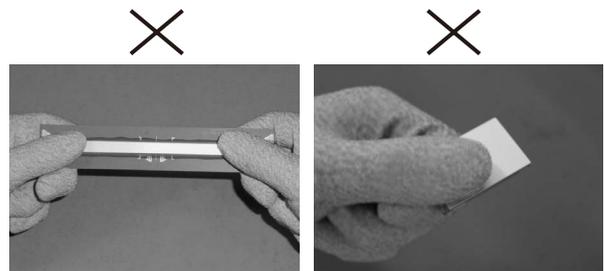
- ・ FOSはガラス製のため、強い力を加えたり衝撃を与えないでください。
- ・ シンチレータ部と受光面には触れないでください。シンチレータの損傷は感度変化の原因となります。ワイヤには保護用樹脂を塗布してありますが、ワイヤを損傷・断線する原因となりますので、保護用樹脂には触れないでください。
- ・ センサを持つ場合、リードおよび配線の露出部に触れないように基板を指で挟んで持ってください [図4-9 (a)]。リードおよび配線の露出部に触れると、静電気による故障の恐れがあります。
- ・ FOSに力が加わるような行為は絶対にしないでください。シンチレータの損傷の恐れがあります [図4-9 (b)]。

[図4-9] センサを持つ場合の注意事項

(a) 基板を指で挟んで持つ



(b) FOSには力を加えない



(c) ケーブルを過度に屈曲しない



(5) ケーブルをアッセンブリしたモジュールの取り扱い

- ・ センサ部に過度の力を加えないでください。強くかむ、圧力を加える、落下させるなどの行為は破損や故障の原因になります。

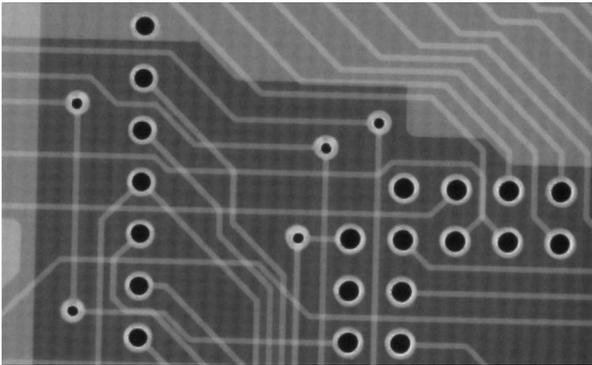
- ・ケーブルに過度な屈曲・引張の力が加わると、断線など故障の原因となるため注意してください [図4-9 (c)]。

4-4 応用例

▶ 非破壊検査 (工業用)

X線用CCDを使って、ワンショットもしくはTDI動作でのX線撮影によって、ベルトコンベア上を移動する物体の検査などを行います。

[図4-10] プリント基板の撮像例

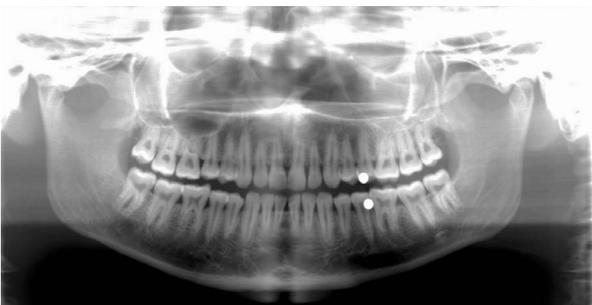


▶ ラジオグラフィ

(1) パノラマ撮影

パノラマX線撮影装置は、頭部を中心に配置されたX線源と検出部が回転して撮影する装置です。TDI動作により、受光面サイズよりも大きなパノラマ診断画像の取得への応用が期待されます。

[図4-11] パノラマ撮影例



(2) セファロ撮影

セファロX線撮影装置は頭部を撮影するもので、パノラマと同様にTDI動作により診断画像の取得への応用が期待されます。

[図4-12] セファロ撮影例

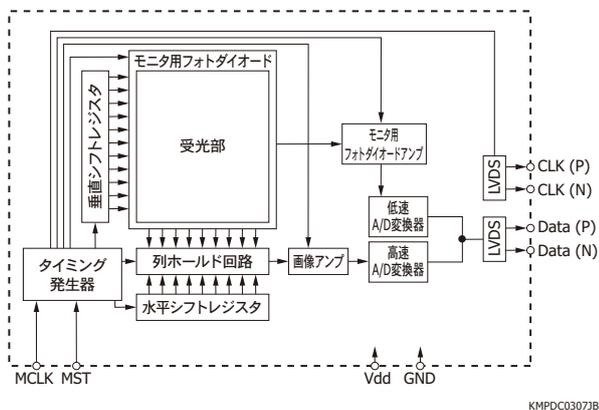


5. CMOSエリアイメージセンサ

X線用CMOSエリアイメージセンサは、高集積・高性能・高S/Nというアクティブピクセル型CMOSデバイスの特性を生かした非破壊検査用のイメージセンサです。タイミング発生器、垂直／水平シフトレジスタ、読み出しアンプ、A/D変換器、LVDSを内蔵しています [図5-1]。デジタル入出力のため、非常に使いやすくなっています。グローバルシャッタ（全画素同時蓄積）機能をもつため、X線照射タイミングに合わせて1ショットのX線画像を取得することができます。

A/D変換器を内蔵しているため、アナログビデオ配線を短くできノイズを低減しています。外部回路を簡略化できるため、トータルコストの低減にも寄与します。

[図5-1] ブロック図 (代表例)



5-1 特長、構造

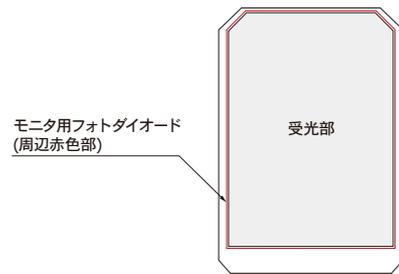
▶ CMOSとCCDの比較

画質については、信号量が小さな領域ではCCDエリアイメージセンサの方が優れています。CMOSエリアイメージセンサは、CMOS技術を使用するため多機能化しやすく、使いやすさの点で勝っています。CMOSエリアイメージセンサには、周辺回路の機能を内蔵しているため、トータルコストを低減できるという利点があります。

▶ モニタ用フォトダイオードを内蔵

X線用CMOSエリアイメージセンサには、X線照射の開始タイミング（トリガ）を検出するためのモニタ用フォトダイオードが、受光部外側の全周にわたり細長く配置されています [図5-2]。モニタ用フォトダイオードの信号は、ある一定の間隔で常に出力されています。その出力は外部制御回路へ送られ、外部制御回路に設定した閾値を出力が超えるとX線照射が開始されたと判定して、CMOSエリアイメージセンサに蓄積と読み出しを行う指示を与えることができます。

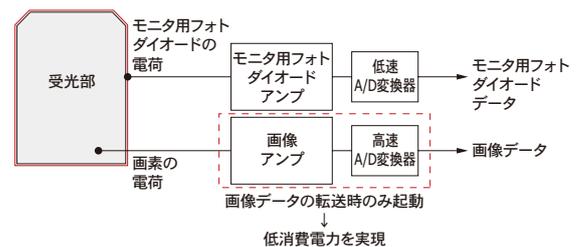
[図5-2] モニタ用フォトダイオード



▶ 低消費電力

X線用CMOSエリアイメージセンサには、画像データ用の高速A/D変換器（14ビット）とモニタ用フォトダイオードのデータ用の低速A/D変換器（10ビット）が内蔵されています。多くの電流を消費する高速A/D変換器は、画像データの転送時にだけ起動します。長時間を占めるX線照射待機時には、低消費電力の低速A/D変換器のみが起動しています。これにより、平均の消費電力が低くなります [図5-3]。

[図5-3] ブロック図



▶ グローバルシャッタ機能

当社のX線用CMOSエリアイメージセンサには、グローバルシャッタ機能を搭載しています。グローバルシャッタによって、全画素同時蓄積が可能となるため、画像データの読み出し中にX線が照射される場合や、動く被写体を撮影するマシンビジョンなどの用途でも、その影響をほとんど受けずに高精細な画像を得ることができます。

▶ APS (Active Pixel Sensor)タイプ

CCDを代表とする電荷転送型のイメージセンサとは異なり、X-Yアドレス型のCMOSエリアイメージセンサでは、蓄積した画素の電荷を読み出すために長いデータライン配線をもっています。この配線容量は、画素内のトランジスタのスイッチング時に大きなノイズ発生源となります。そこで、当社のX線用CMOSエリアイメージセンサには、画素内にアンプを内蔵したAPSタイプを採用しています。蓄積された電荷は画素ごとに電圧に変換されるため、低ノイズの画像を実現することが可能です。

》高い検出量子効率

検出量子効率 (DQE: Detective Quantum Efficiency) はX線検出器の性能を定義するパラメータの1つで、X線検出器に照射するX線のS/N (SNR_{IN})に対して、出力画像信号のS/N (SNR_{OUT})がどの程度得られているかを示します。X線のノイズはその線量に密接に関係するため、検出量子効率はX線検出器の検出効率としても用いることができます。

検出量子効率は、入射したX線フォトンの検出効率ならびに画質の評価尺度として用いられます。検出量子効率が高いほど、入射したX線から効率よく高画質の画像を取得できることを示します。検出量子効率は、式 (5-1) または式 (5-2) で表されます。

$$DQE = \frac{(SNR_{OUT})^2}{(SNR_{IN})^2} \dots\dots (5-1)$$

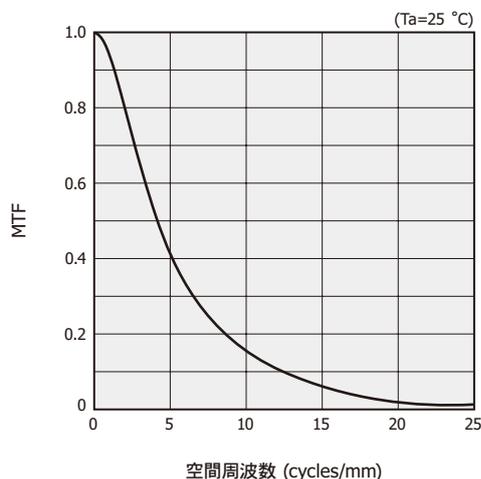
$$DQE = \frac{MTF^2}{\Phi \cdot WS} \dots\dots (5-2)$$

MTF: Modulation Transfer Function
 Φ: 入射X線フォトン数
 WS: ウィナースペクトル (Wiener spectrum)

ノイズのない理想的なイメージングシステムでは検出量子効率=1となります。実際のイメージングシステムにおいては、画素や電子回路で発生するノイズなど、さまざまな過程で付加されるノイズによってウィナースペクトルが大きくなり、特にその影響が大きい高周波領域において検出量子効率が低下します。当社のX線用CMOSエリアイメージセンサでは、シンチレータに高発光効率で高解像度のCsI(Tl)を採用することで、より高い検出量子効率を達成し、高画質化と低X線量化を実現しています [図5-4, 5-5, 5-6]。

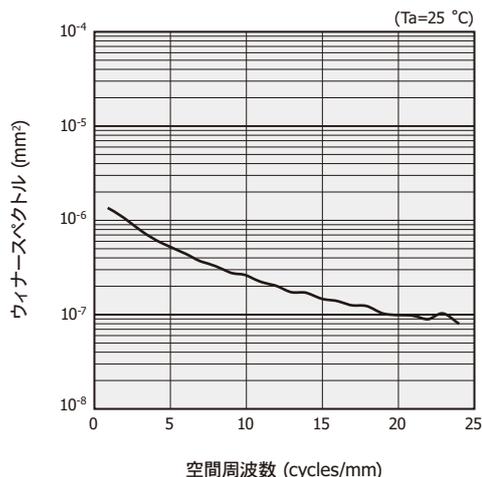
MTFについては「CCDイメージセンサ 技術資料/2. 特性/2-11 解像度」を参照してください。

【図5-4】 MTF-空間周波数 (代表例)



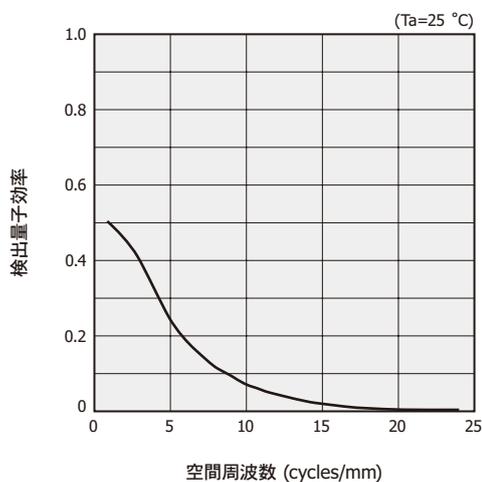
KMPDB03863A

【図5-5】 ウィナースペクトル-空間周波数 (代表例)



KMPDB03873A

【図5-6】 検出量子効率-空間周波数 (代表例)



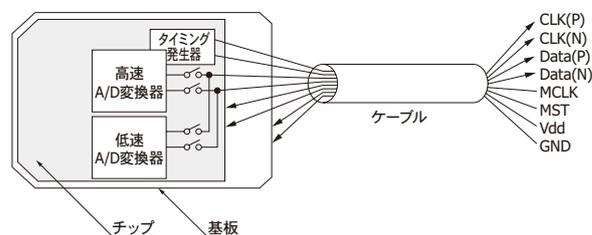
KMPDB03883A

5-2 使い方

X線用CMOSエリアイメージセンサはタイミング発生器を内蔵しているため、マスタースタートパルス (MST)とマスタークロックパルス (MCLK)を入力するだけでX線照射タイミングのモニタと、画像データの蓄積および読み出しを行うことができます。モニタ用フォトダイオードのデータと画像データは内蔵スイッチで切り替えられ、同一の出力配線 [Data(P), Data(N)]から出力されます [図5-7]。

なお、画質補正については、「4. CCDエリアイメージセンサ/4-3 使い方/画質補正」を参照してください。

【図5-7】 入出力配線図



KMPDC03103B

» 使用上の注意

X線用CMOSエリアイメージセンサの使用上の注意は、X線用CCDと同様です（「4. CCDエリアイメージセンサ／4-3 使い方／使用上の注意」参照）。

5-3 応用例

» 口腔内撮影

一般的に、口腔内撮影ではイメージセンサを口腔内に挿入して、2～3本の歯の詳細な診断画像を取得します。

当社の非破壊検査用CMOSエリアイメージセンサは、センサ部が薄く小型で、画素サイズ $20 \times 20 \mu\text{m}$ で、1000 (H) \times 1500 (V)画素と1300 (H) \times 1700 (V)画素もっています。シンチレータにはCsI(Tl)を採用しており、15～20 line pairs/mmの高い解像度を実現しています。また、FOSをカップリングしているため、管電圧 60 kVで約250 μGy のX線照射に対しても10万回以上の高い耐久性もっています。

非破壊検査用で培ったこれらの技術は、口腔内撮影などの狭い部位のX線のイメージングへの応用が期待されます。

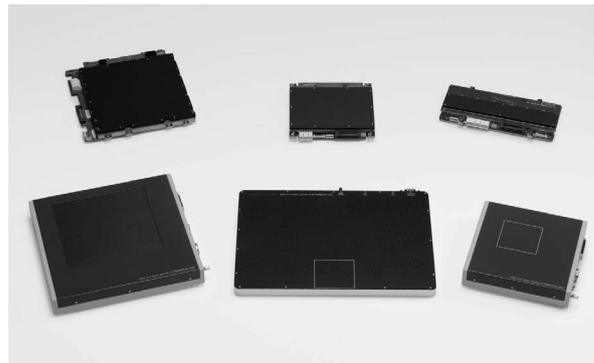
また、センサにケーブルをアセンブリしたCMOSモジュールのOEM提供も可能です。

6. フラットパネルセンサ

フラットパネルセンサは、大面積イメージセンサとシンチレータを組み合わせた検出部と制御部から成るX線画像撮影用のモジュールです。検出部としては、受光部（2次元フォトダイオードアレイ）・高性能チャージアンプ・走査回路を大面積単結晶Siチップに集積したタイプと、大受光面で高速応答を実現したアドバンストa-Siを採用したタイプを用意しています。制御部は、A/D変換器、メモリ、インターフェース回路、これらを制御するPLDを含んでいます。このため、デバイスを動作させるための外部回路は必要ありません。フラットパネルセンサは、静止画・動画のいずれにおいても画像歪みのないメガピクセル級の高精細デジタル画像の取得が可能です。薄型・軽量であることから装置への組み込みが容易であり、CTなどの各種X線撮影装置に広く利用されています。

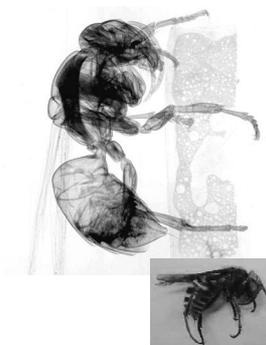
なお、検出部に大受光面かつ高速応答を実現しているアドバンストa-Siを採用したタイプも用意しています。

【図6-1】フラットパネルセンサ

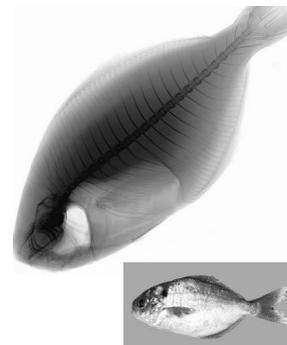


【図6-2】撮像例

(a) スズメバチ



(b) 魚



6-1 特長

- ▶ 高感度
- ▶ 高解像度
- ▶ 高フレームレート
- ▶ 広いダイナミックレンジ
- ▶ 歪みのない画像
- ▶ CsI(Tl)シンチレータ直接蒸着タイプを用意

6-2 構造

フラットパネルセンサのCMOSチップの内部回路を図6-3に示します。シンチレータによって蛍光に変換された2次元のX線画像信号は、優れた直線性をもつフォトダイオードの接合容量内に電荷として蓄積されます。その蓄積電荷は、アドレススイッチがオンになると垂直シフトレジスタによって1行ずつデータラインを通して出力されます。

フラットパネルセンサは電荷蓄積方式で動作するため、出力ビデオ信号の電圧 $V(t)$ は式 (6-1) で表されます。

$$V(t) = G \times Q(t) = G \times I(t) \times t_1 = G \times I(t) \times 1/Sf \dots (6-1)$$

G : アンプのゲイン
Q(t): 蓄積電荷量
I(t): フォトダイオードの光電流
t₁ : 蓄積時間
Sf : フレームレート

X線が被写体に一定の線量で照射されている場合は、フォトダイオードの光電流は一定であり、フレームレートを遅く（蓄積時間を長く）することによって出力電圧を大きくすることができます。フレームレートは、後述する外部トリガモードで制御することが可能です。なお、飽和電荷量は、フォトダイオードの接合容量によって決まっています。A/D変換されたビデオ出力の最大値は、飽和電荷量の値に設定されています。

▶ アンプ回路

フラットパネルセンサのアンプ回路には、パッシブピクセルタイプとアクティブピクセルタイプの2種類があります。

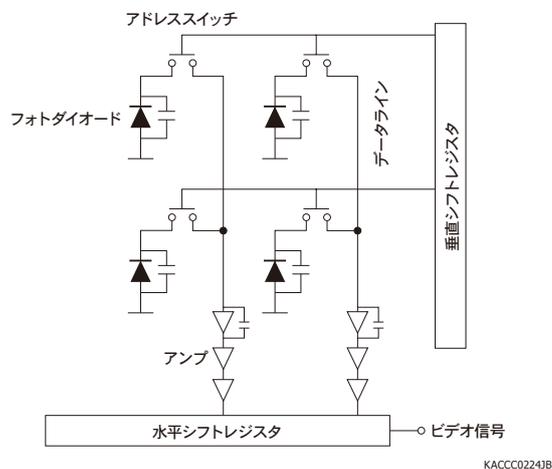
パッシブピクセルタイプは、フォトダイオードアレイの1列ごとにアンプがあり、アンプは各フォトダイオードとアドレススイッチを介してつながっています。アンプはアンプアレイとして2次元受光領域の1辺に設けられています。パッシブピクセルタイプは高い開口率と放射線耐性を実現しています。しかし、データラインによって生じる入力容量により、アンプの熱雑音の低減は制限されます。

アクティブピクセルタイプは、パッシブピクセルタイプの前述の問題点を解決した構造となっています。アクティブピクセルタイプではピクセルごとにアンプが設けられており、蓄積された電荷はここで電圧に変換されます。

この構造によりノイズレベルは低下し、パッシブピクセルタイプより約1桁小さくなっています。アクティブピクセルタイプは、低ノイズ・高S/Nのため、低エネルギーのX線で高精細画像を得られます。

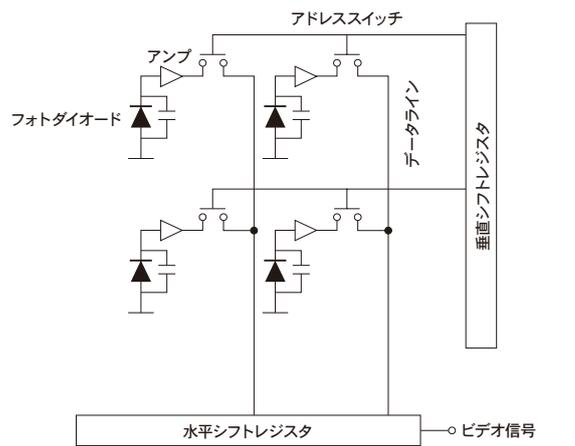
【図6-3】 CMOSチップの内部回路

(a) パッシブピクセルタイプ



KACCC02243B

(b) アクティブピクセルタイプ



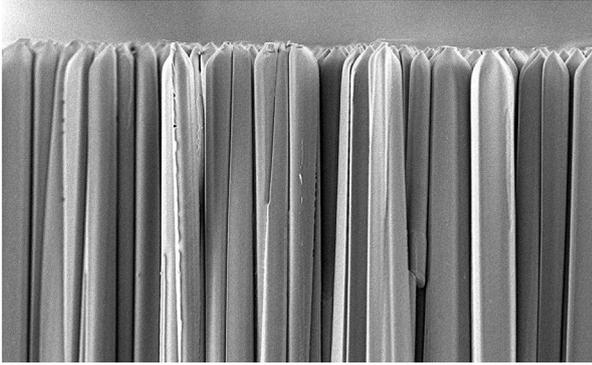
KACCC03083B

▶ シンチレータ

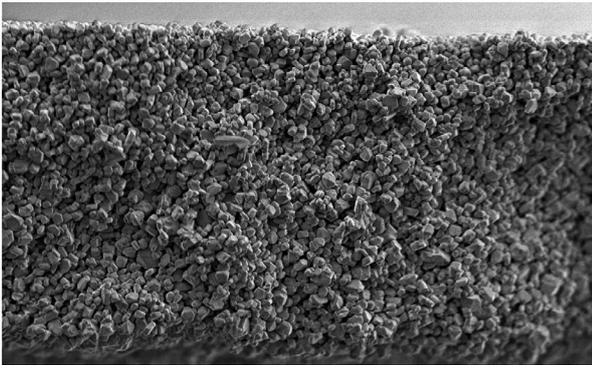
フラットパネルセンサは、X線をシンチレータによって光に変換し、その光を検出する間接検出方式を採用しています。当社は、プロセス技術の最適化により、シンチレータの波長特性に適合した高感度フォトダイオードを実現しました。

多くのフラットパネルセンサに搭載されているCsI(Tl)シンチレータ [図6-4]は、針状の結晶中をシンチレーション光が伝搬するため、グレーン（粒子）状の結晶（GOSなど）を組成とするシンチレータより解像度と発光強度の点で有利です。

[図6-4] CsI(Tl)シンチレータの針状結晶の断面写真



[図6-5] GOSシンチレータのグリーン状結晶の断面写真

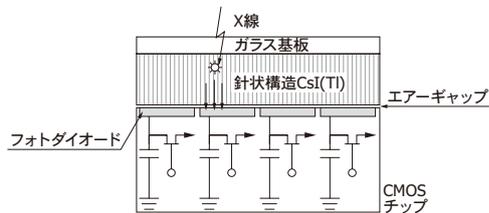


シンチレータとフォトダイオードの結合方法には、ガラス上にシンチレータを蒸着したFSP (Flipped Scintillator Plate)のシンチレータ面をフォトダイオード上に密着させる方法と、フォトダイオード上にシンチレータを直接蒸着する方法があります。CsI(Tl)のFSPを用いた方法は、蛍光強度と解像度の面でGOSを利用したスクリーンより優れています。また、直接蒸着する方法は、FSPを用いる方法に比べて蛍光の散乱が抑えられるため、さらに解像度が向上します。

当社は、FSPタイプと直接蒸着タイプのフラットパネルセンサを用意しており、用途に合わせて選択することができます。

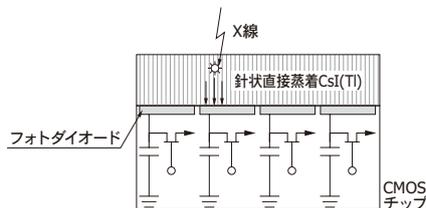
[図6-6] チップの断面構造

(a) FSPタイプ



KACCC0270JB

(b) 直接蒸着タイプ

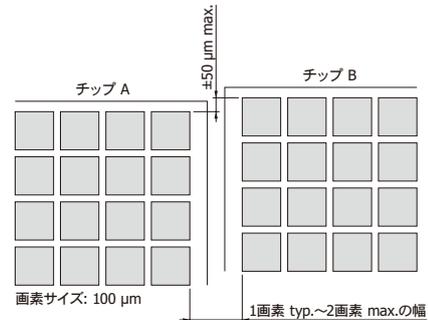


KACCC0271JB

》 タイリング

一部のフラットパネルセンサは、タイリング技術により大面積の受光面を実現しています。高精度タイリング技術によりタイリング部におけるギャップを低減しています。タイリング部は隣接する画素を基にソフトウェアにより補正可能で、継ぎ目のない画像を得ることができます。

[図6-7] 受光部のタイリング部のギャップ (C10502D-70)



KACCC10653A

6-3 動作原理

》 信号読み出し方式

一般的にデジタル信号の読み出し方式には以下の方式があります。

(1) 直列ドライブ方式

すべての画素を直列に駆動して読み出す方式のため、画素が多い場合、フレームレートは遅くなります。

(2) 並列ドライブ方式

■ シングルポート読み出し方式

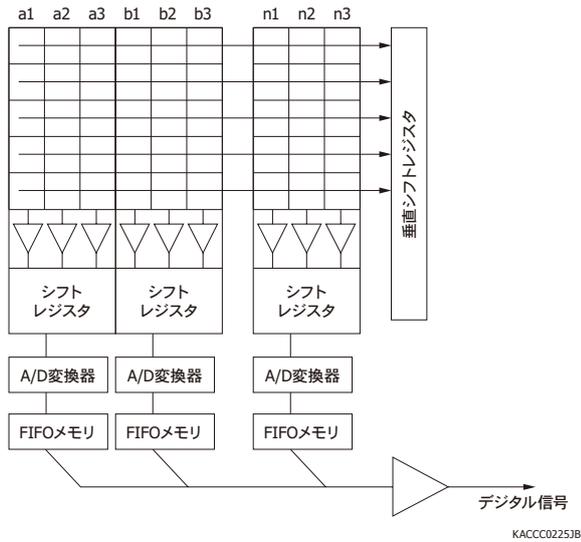
モノリシックの受光面を複数のブロックに分割し、各ブロックを並列に駆動してシングルポートで読み出す方式です。

図6-8は受光面をn個のブロックに分割した場合の概念図です。フラットパネルセンサは100万以上の画素をもつため、直列ドライブ方式ではフレームレートが低下します。そこで高速性とビデオデータの処理のしやすさを実現したシングルポート読み出し方式が、ほとんどのフラットパネルセンサで採用されています。

■ マルチポート読み出し方式

シングルポート読み出し方式よりもさらに高速の駆動を実現するために、ビデオデータをマルチポートで読み出す方式です。ビデオデータの読み出し口を複数設けることで、シングルポート読み出し方式よりも単位時間当たりの画像データ転送量を増やすことができます。一部のフラットパネルセンサには、この方式が用いられています。

[図6-8] 並列ドライブ方式の構造



▶ ビデオ出力インターフェース

フラットパネルセンサのビデオ出力インターフェースには、RS-422、LVDS、USB 2.0、Gig-Eがあります。USB 2.0、Gig-Eは当社のデジタルカメラインターフェースのDCAMに対応しています。

▶ ビニングモード

フラットパネルセンサには、複数画素をまとめて読み出す機能であるビニングモードを備えた機種もあります。機種によっては最大4 × 4画素まで選択できます。ビニング画素数を増やすことで、センサのフレームレートを速くすることができます。なお、ビニングモードを使わずに画素を読み出すシングル動作（1 × 1モード）の場合に、最も高い解像度が得られます。

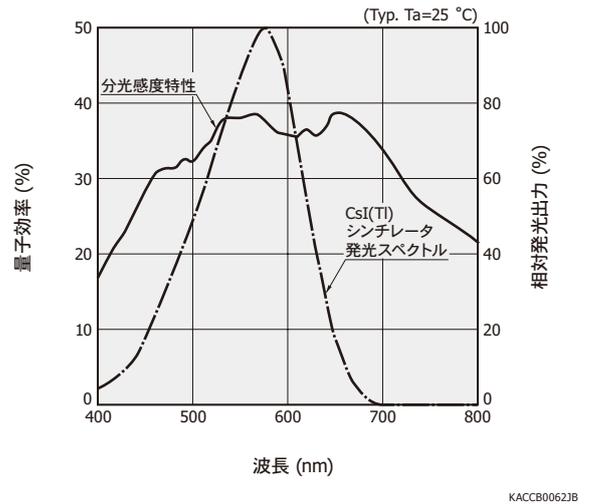
6-4 特性

▶ 分光感度特性

フラットパネルセンサの受光部は、2次元フォトダイオードアレイで構成されています。図6-9に、代表的なフラットパネルセンサの分光感度特性とCsI(Tl)シンチレータの発光スペクトルを示します。フォトダイオードアレイは、高感度を実現するためにCsI(Tl)のピーク発光波長付近の感度が高くなるように設計されています。

なお、フラットパネルセンサのX線感度エネルギー範囲は機種によって異なります。データシートを参照してください。

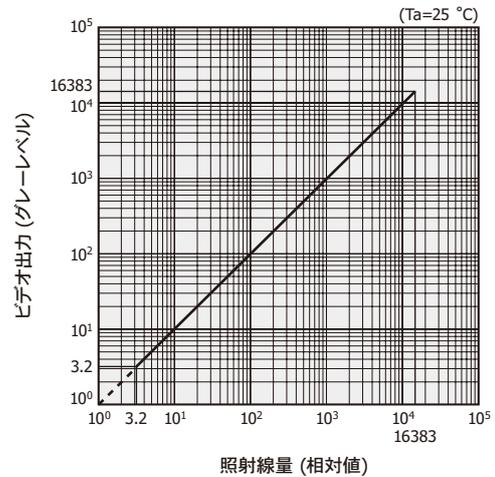
[図6-9] 分光感度特性、CsI(Tl)シンチレータ発光スペクトルの例



▶ 直線性

フラットパネルセンサは、X線入射量に対して優れた直線性を示します。図6-10に、フラットパネルセンサ（14ビット出力）の出力直線性を示します。14ビット出力の場合、出力上限は16383グレーレベルです。

[図6-10] 出力直線性（14ビット出力、代表例）



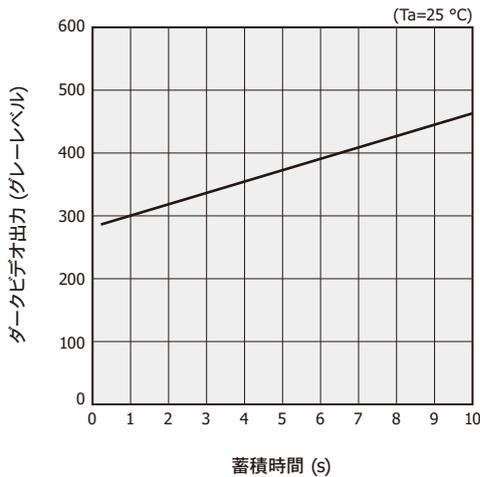
▶ ダークビデオ出力

蓄積時間を長くすると、フォトダイオードの暗電流によって、わずかにダークビデオ出力が上がります。図6-11にフラットパネルセンサ（14ビット出力）のダークビデオ出力と蓄積時間の関係を示します。フォトダイオードの暗電流 (I_D)は式(6-2)で表されます。

$$I_D = K/G [C/s] \dots\dots(6-2)$$

K: 蓄積時間に対するダークビデオ出力の増加率 [階調/s]
G: 変換ゲイン

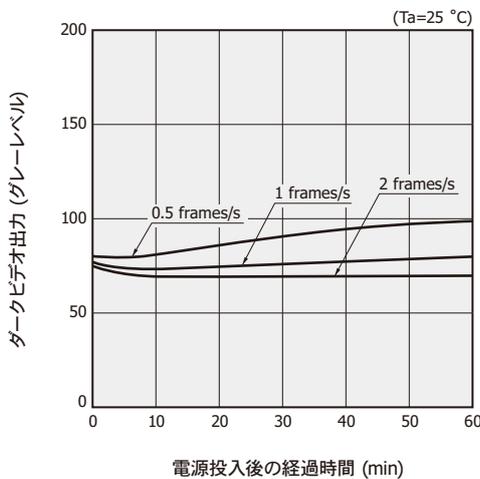
[図6-11] ダークビデオ出力ー蓄積時間 (14ビット出力, 代表例)



KACCB0064JA

ダークビデオ出力には、電源投入後、わずかにドリフトが発生します。図6-12は、ダークビデオ出力のドリフト測定例です。内部トリガモード (2 frames/s) では、電源投入後ほとんど変化は見られませんが、フレームレートが遅い場合はダークビデオ出力が変動します。ダークビデオ出力の変動が問題となる用途では、ドリフトレベルの許容範囲で補正用ダーク画像の取得頻度を決定してください。

[図6-12] ダークビデオ出力のドリフト特性 (14ビット出力, 代表例)



KACCB0065JA

》 ノイズ、ダイナミックレンジ

フラットパネルセンサは、CMOSイメージセンサをベースに開発されました。CMOSイメージセンサは、ビデオラインを通じてフォトダイオードで蓄積した電荷を読み出し回路に転送します。

パッシブピクセルタイプのCMOSイメージセンサの場合、ノイズは次の計算式で表されます。フォトダイオード接合容量 (Cp)、チャージアンプ帰還容量 (Cf) に比べビデオライン寄生容量 (Cd) が非常に大きいため、ノイズの要因として、ビデオライン寄生容量が支配的となります。

$$V_{\text{tot}}^2(\text{rms}) = \frac{8}{3} k T \frac{1}{\text{gm}} \left(\frac{C_t}{C_f} \right)^2 \beta_1 + \frac{K_f}{\text{Cox}^2 W L} \left(\frac{C_t}{C_f} \right)^2 \beta_2 \dots (6-3)$$

$$V_{\text{tot}}(\text{rms}) = \frac{C_t}{C_f} \sqrt{\frac{8}{3} k T \frac{1}{\text{gm}} \beta_1 + \frac{K_f}{\text{Cox}^2 W L} \beta_2} \dots (6-4)$$

$$C_t = C_p + C_f + C_d \dots (6-5)$$

V_{tot}: トータルノイズ電圧
 T: 絶対温度 [K]
 gm: チャージアンプ初段トランジスタのトランスコンダクタンス
 β₁, β₂: チャージアンプにより決まる定数
 K_f: チャージアンプ初段トランジスタの1/fノイズ定数
 Cox: チャージアンプ初段トランジスタのゲート酸化膜容量
 W: チャージアンプ初段トランジスタのW長
 L: チャージアンプ初段トランジスタのL長

パッシブピクセルタイプのCMOSイメージセンサのノイズ量は、画素サイズ、画素数によって異なります。

フラットパネルセンサのダイナミックレンジの下限はノイズで決まり、上限は飽和電荷量で決まります。ダイナミックレンジは、ノイズと飽和電荷量の比から得られます。

アクティブピクセルタイプの場合はビデオライン寄生容量が極めて小さく、ノイズは小さくなります。

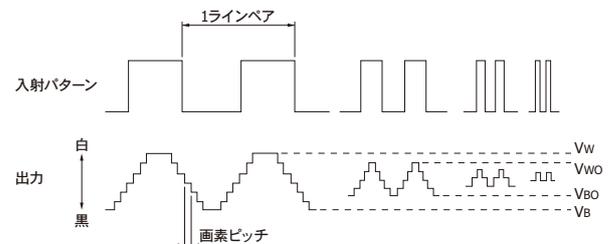
》 解像度

解像度は、入射パターンを出力においてどれだけ細かく再現できるかを示す度合いです。フラットパネルセンサの受光部は複数のフォトダイオードが規則的に並んでいるため、入射パターンを画素ごとに分離して出力します。したがって図6-13に示すように間隔の異なる白黒の繰り返し矩形波パターンを入射すると、入射パターンのパルス幅が狭くなるほど白黒の出力差が小さくなります。この場合、コントラスト伝達関数 (CTF: Contrast Transfer Function) は式 (6-6) で定義されます。

$$\text{CTF} = \frac{V_{\text{WO}} - V_{\text{BO}}}{V_{\text{W}} - V_{\text{B}}} \times 100 [\%] \dots (6-6)$$

V_{WO}: 出力の白レベル
 V_{BO}: 出力の黒レベル
 V_W: 出力の白レベル (入射パターンのパルス幅が広い場合)
 V_B: 出力の黒レベル (入射パターンのパルス幅が広い場合)

[図6-13] コントラスト伝達関数特性

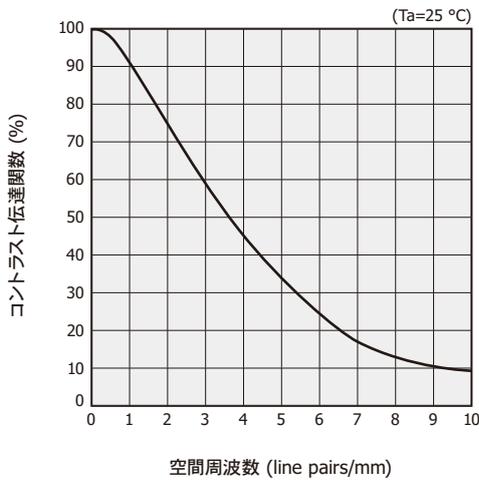


KMPDC0070JA

入射パターンの白黒の間隔の細かさは、入射パターンの空間周波数で与えられます。空間周波数は単位長さ当たりの繰り返しパターンの数で、図6-13においてはパターンの白から白までの距離の逆数に当たります。単位は、通常line pairs/mmが用いられます。入射パターンが

細かいほど、すなわち空間周波数が高いほどCTFは低下します。

【図6-14】コントラスト伝達関数-空間周波数
[画素サイズ 50 × 50 μm, Csl(TI)直接蒸着, 代表例]



KACCB01933A

フラットパネルセンサのX線に対する解像度と感度は、シンチレータの厚さに依存し、解像度と感度はトレードオフの関係にあります。フラットパネルセンサは、用途や画素サイズを考慮した最適なシンチレータ厚で設計されており、高解像度・高感度を実現しています。

信頼性

通常のX線検出器は、X線の照射により感度の低下やダークビデオ出力の上昇などの劣化が生じます。フラットパネルセンサもX線の照射によって特性が劣化します。非破壊検査に用いられるアルミニウムトップカバー付FSPタイプのフラットパネルセンサは管電圧 20 kV~100 kVにおける使用を目的に設計され、管電圧 100 kVにおいて積算線量 8.7 kGy (100万レントゲン)まで使用が可能です。X線が受光面へ均一に照射されるとき、暗電流も受光面でおおむね均一に上昇します。暗電流は部分的に上昇する場合がありますが、ダーク補正により消去が可能です。暗電流の上昇によるダークビデオ出力の部分的な増加がダーク補正の限度を超えた際には、フラットパネルセンサを消耗品として交換する必要があります。検出可能な範囲内でX線量を低めに設定したり、撮像時以外にはフラットパネルセンサに放射線を照射しないなどの方法で寿命を延ばすことが可能です。なお、パルスX線を用いることも寿命を延ばすのに有効です。

X線照射ダメージ

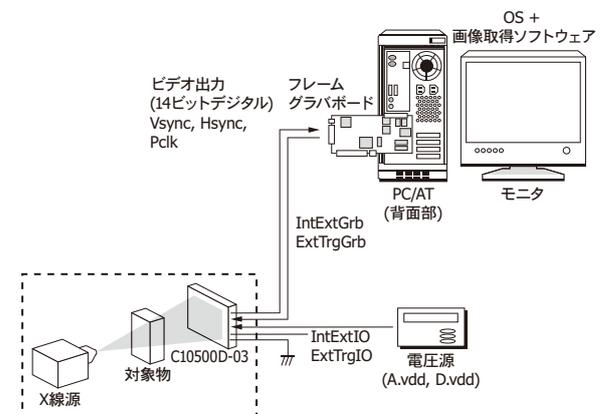
たとえばC7942CA-22において、1日4時間 (1 × 1モード、フレームレート 2 frames/s)、管電圧 80 kVのX線を照射した場合の寿命は152日間です。

6-5 使い方

接続方法

フラットパネルセンサとPCをデータケーブルで接続して、電源と電源ケーブルで接続すればセットアップは完了です (機種によっては、外部トリガ入力用のケーブルが必要です)。そして、電源電圧を印加すれば、PCからの操作によってリアルタイムにX線画像を取得できます。フラットパネルセンサを使ったX線イメージングシステムの接続例を図6-15に示します。電圧源には、トランスを備えた単調増加型のシリーズ電源を使用してください。

【図6-15】接続例 (C10500D-03)



KACCC12093A

トリガモード

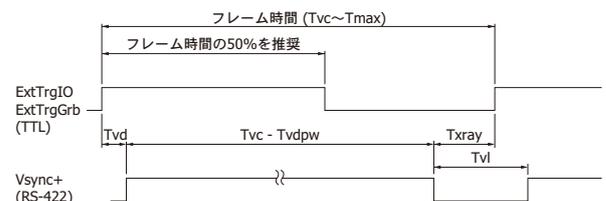
フラットパネルセンサでは、2種類のトリガモード (内部トリガモード、外部トリガモード)が選択できます。

内部トリガモードでは、センサは常時、最速のフレームレートで動作し、同期信号とビデオ信号は常時出力されます。

外部トリガモードで画像を取得するためには、ExtTrgIOまたはExtTrgGrb端子に図6-16のように外部トリガパルスを入力してください。外部トリガパルスの立ち上がりエッジからTvd時間後にVsync+、Hsync+、ビデオ信号が出力されます。

パルスX線源と同期させて使用する場合は、Txrayの期間にX線を照射してください。

【図6-16】外部トリガモード



Hsync+, Pclkおよび有効ビデオ出力は内部トリガモードと同じです。
 ・ TmaxはSf(ext)の最小値の逆数で定義
 ・ Txray = フレーム時間 - Tvd - (Tvc - Tvdpw)
 ・ Tvl = フレーム時間 - (Tvc - Tvdpw)

KACCC03413E

》 欠陥ライン

フォトダイオードで蓄積された電荷は、シフトレジスタからのゲートラインにより各画素のCMOSスイッチをオンにし、データラインを通じて読み出し回路に転送されます。ゲートライン・データラインが断線している場合は、読み出し不可能な画素が発生します。これらの画素の集まりを欠陥ラインといいます。欠陥ラインは受光面積の大きなイメージセンサでは避けられませんが、ソフトウェアによって周辺画素の値から補正することにより、最終的には欠陥のない画像を取得することが可能です。

欠陥ラインからの電荷の漏れ出しにより、欠陥ラインに隣接する画素の出力が大きくなる場合があります。この現象もソフトウェアによって補正が可能です。

》 画質補正

最新のCMOSプロセス技術とCDS回路を採用したフラットパネルセンサは、非常に均一性の高い画像を取得することができますが、ソフトウェアによる補正を行うことによってさらに高いレベルの画像を実現することが可能です。

》 注意事項

フラットパネルセンサは、X線照射によりダメージを受けます。長期間または照射線量の大きい環境下での使用により、感度の低下やダークビデオ出力の上昇が生じます。そのため検出精度に応じてソフトウェアによる画像補正を行うとともに、定期的にフラットパネルセンサを消耗品として交換する必要があります。

6-6 応用例

》 パルスX線源を用いたX線イメージング

連続X線源を用いたほとんどのX線イメージングでは、検出器とX線源を同期させて使用する必要があります。しかし、一般的に連続X線源に比べ短い時間に高い線量を発生できるパルスX線源を用いた場合には、検出器とX線源の照射タイミングを同期させて画像を取得する必要があります。

パルスX線源とともにフラットパネルセンサを使用する場合は、フラットパネルセンサを外部トリガモードに設定すると便利です。外部トリガモードに設定し、外部トリガ信号をフラットパネルセンサに入力すると、それまでにフォトダイオードに蓄積され続けていた電荷が読み出されます。この場合、外部トリガ信号が入力されるまで、電荷が蓄積され続けていることとなります。パルスX線源と同期させて画像を取得するためには、適切なトリガ間隔

でX線を照射する必要があります。

外部トリガ信号を用いてパルスX線で画像を取得する際のタイミングチャートを図6-17に示します。

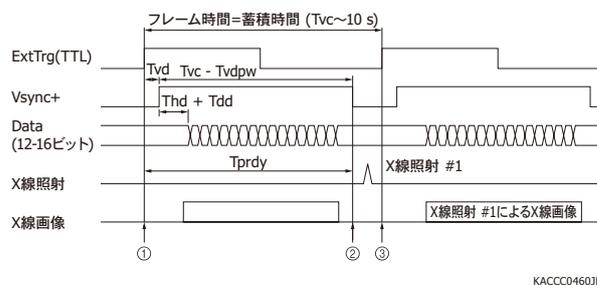
パルスX線を照射する前に外部トリガ信号を入力し、それまでフォトダイオードに蓄積されていた電荷の読み出しをスタートさせます(①)。外部トリガ信号の立ち上がりからTprdy後(②)に電荷の読み出しが終了し、フォトダイオードがリセットされます。他のパラメータについてはデータシートを参照してください。

$$Tprdy = Tvd + Tvc - Tvdpw \dots\dots (6-7)$$

Tvdpw: 内部トリガモード時のVsync+がLowの期間

タイミングチャートの②から③(次の外部トリガ信号の立ち上がり)の間にパルスX線の照射を行います。X線の照射後、次の外部トリガ信号を入力します。①~③の動作が繰り返されることになります。

【図6-17】 タイミングチャート



KACCC04603B

》 小さな被写体の拡大画像の取得

フラットパネルセンサは、画像に歪みがなく高解像度のため、拡大画像を取得することができます。

画像の拡大率は、式(6-8)により表されます。

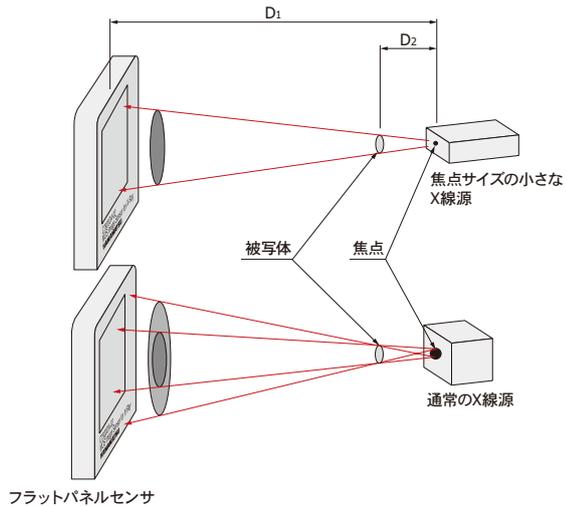
$$\text{拡大率} = \frac{D_1}{D_2} \dots\dots (6-8)$$

D₁: X線源の焦点とフラットパネルセンサの距離
D₂: X線源の焦点と被写体の距離

フラットパネルセンサとX線源との距離を固定した場合、被写体をX線源に近づけるほど、拡大率は大きくなります。

X線源の焦点サイズが大きくなると、拡大時の画像のボケが大きくなります。焦点サイズの小さなX線源を用いることで、より鮮明な拡大画像を得ることができます。

[図6-18] X線源の焦点サイズの違いによる画像の歪み



KACCC0245JB

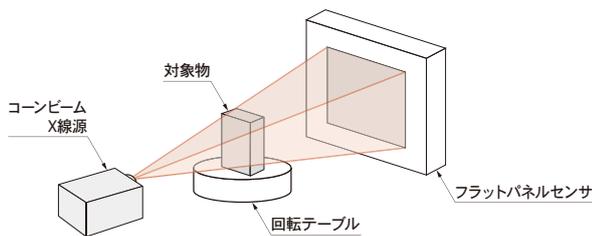
» コーンビームCT

大面積の受光面をもつフラットパネルセンサの特長を最大限に生かした使用方法として、大面積にX線を照射できるコーンビームX線源を用いたコーンビームCTがあります。

対象物を中心にコーンビームX線源とフラットパネルセンサを向かい合わせに設置し、対象物を回転させながら画像を取得します。

これによって得られた2次元画像データをコンピュータで再構築することで3次元X線透過画像を取得できます。大面積の受光面で高フレームレートのフラットパネルセンサを用いることで、大きな対象物の3次元X線画像を短時間で取得することが可能になります。

[図6-19] コーンビームCTのイメージ図

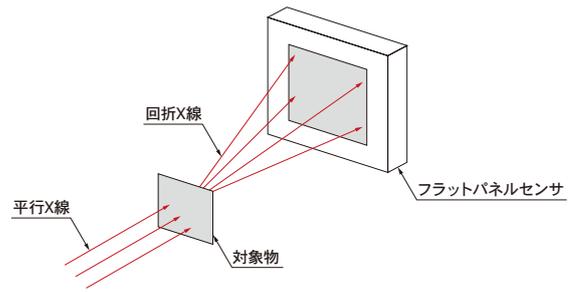


KACCC11973A

» X線回折

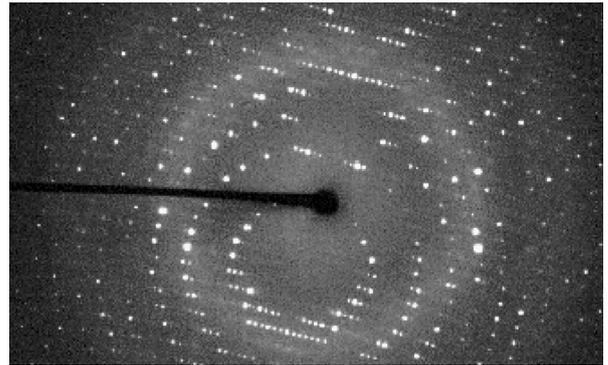
フラットパネルセンサは大面積の受光面で高分解能という特長をもつため、ラウエのX線回折を用いた分析に利用できます。図6-20に示すように平行X線を入射し、対象物により回折されたX線による干渉縞をフラットパネルセンサで検出します。このようにして、イメージングプレートと同等の高精細画像をリアルタイムで取得することができます。フラットパネルセンサは、結晶やタンパク質の構造解析といった分野で利用されています。

[図6-20] X線回折のイメージ図



KACCC04623A

[図6-21] X線回折パターンの例



本資料の記載内容は、令和5年10月現在のものです。

製品の仕様は、改良などのため予告なく変更することがあります。本資料は正確を期するため慎重に作成されたものですが、まれに誤記などによる誤りがある場合があります。本製品を使用する際には、必ず納入仕様書をご用命の上、最新の仕様をご確認ください。

本製品の保証は、納入後1年以内に瑕疵が発見され、かつ弊社に通知された場合、本製品の修理または代品の納入を限度とします。ただし、保証期間内であっても、天災および不適切な使用に起因する損害については、弊社はその責を負いません。

本資料の記載内容について、弊社の許諾なしに転載または複製することを禁じます。

浜松ホトニクス株式会社

www.hamamatsu.com

仙台営業所	〒980-0021	仙台市青葉区中央3-2-1 (青葉通プラザ11階)	TEL (022) 267-0121	FAX (022) 267-0135
東京営業所	〒100-0004	東京都千代田区大手町2-6-4 (常盤橋タワー11階)	TEL (03) 6757-4994	FAX (03) 6757-4997
中部営業所	〒430-8587	浜松市中区砂山町325-6 (日本生命浜松駅前ビル)	TEL (053) 459-1112	FAX (053) 459-1114
大阪営業所	〒541-0052	大阪市中央区安土町2-3-13 (大阪国際ビル10階)	TEL (06) 6271-0441	FAX (06) 6271-0450
西日本営業所	〒812-0013	福岡市博多区博多駅東1-13-6 (いちご博多イーストビル5階)	TEL (092) 482-0390	FAX (092) 482-0550

固体営業推進部 〒435-8558 浜松市東区市野町1126-1 TEL (053) 434-3311 FAX (053) 434-5184