

次世代イメージングを担う 科学計測用CMOSカメラの特徴と今後

浜松ホトニクス株式会社

システム事業部 杉下 財

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

目次

- 前置き
- 科学計測イメージング用カメラ
- sCMOSカメラの詳細特性
- 科学計測用カメラのS/N
- sCMOSカメラの今後
- まとめ

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

前置き

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

- CMOSカメラの性能向上が著しい。これは、CMOSプロセスの進化による。
- sCMOSカメラと呼ばれる科学計測分野向けのカメラの普及が始まっている。
- 科学計測用カメラとはどういったものか？必要とされる要素は？

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

科学計測イメージング用カメラ

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

科学計測イメージングに必要な要素

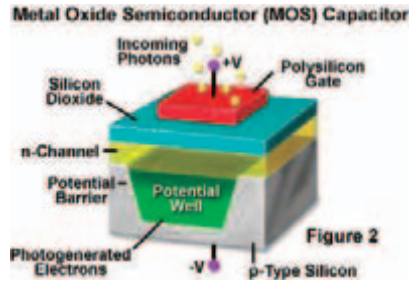
- 高性能
 - 低ノイズ
 - 高感度
 - 高速性
- 定量性
 - 線形性
 - 空間均一性(固定ノイズ、感度不均一性)
- 再現性
 - 温度安定性
 - 経時変化(劣化)がない



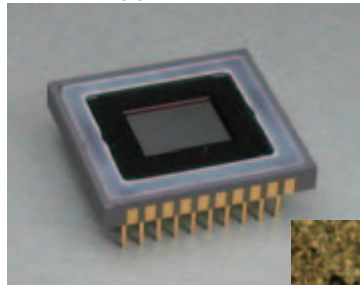
入射してくる光子の挙動をいかに正確に再現できるか

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

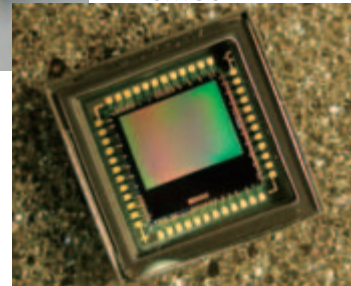
センサの基本



CCD



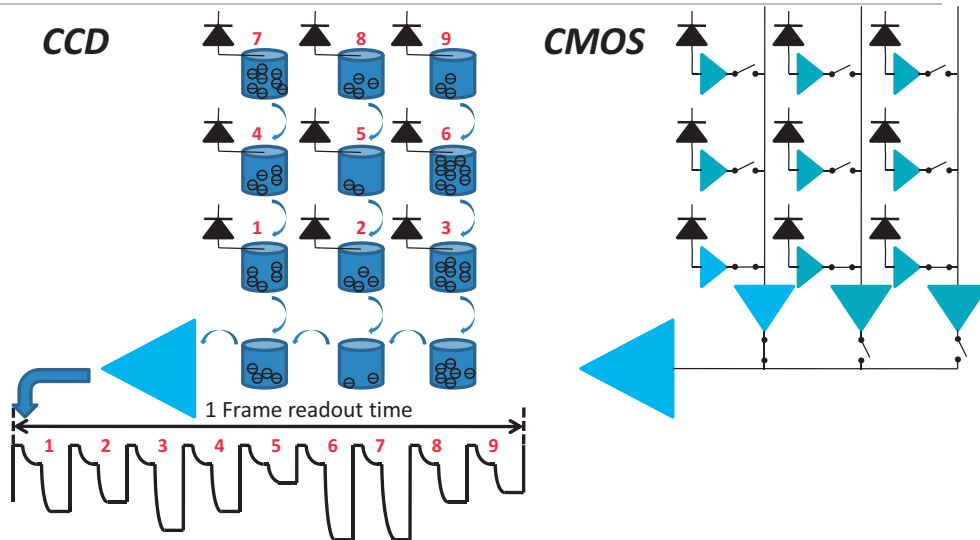
CMOS



- MOSキャパシターを基本構造とする画素が2次的に配列したもの
- 空乏層内で光子(フォトン)から電子(エレクトロン)に変換(光電変換)
- 蓄積した電荷を電圧として出力する為の変換部分を持つ

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

CCDセンサとCMOSセンサの違い

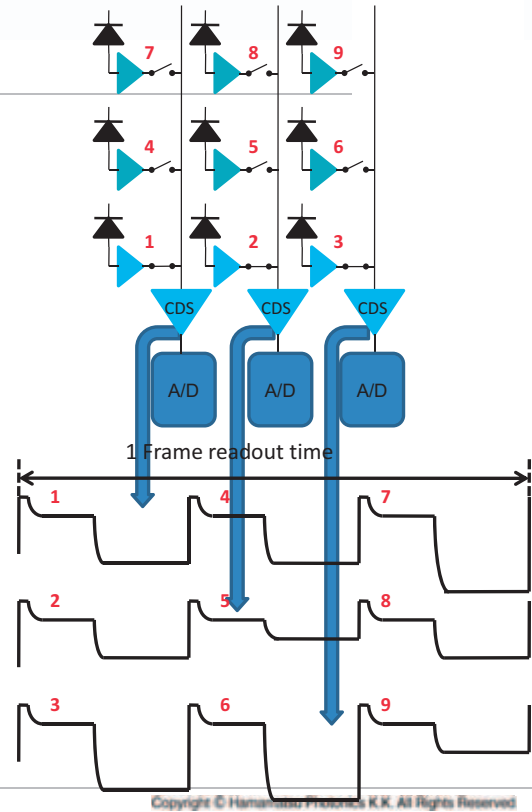


- 画素はフォトダイオードと電荷をためる容器(バケツ)から構成
- 電荷はバケツリレー方式で運ばれ、最後に電圧に変換されて時系列データとして出力される
- 画素はフォトダイオードと電荷を電圧に変換するアンプから構成
- 各画素の電圧はスイッチを順次切り替える事によって出力される

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

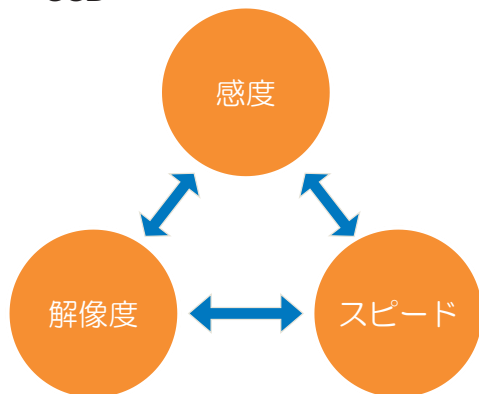
CMOSセンサの技術進歩

- 各列毎にCDSアンプ(ノイズキャンセル回路)、A/Dコンバータをセンサ内に実装
 - カラムアンプ、カラムADC
- 超並列処理によって高速化と低ノイズ化を同時に実現
 - 1K x 1Kのセンサを30フレーム/秒で読み出に必要な画素クロックは
 - ✓ CCDの場合でおよそ35MHz
 - ✓ カラムADC搭載のCMOSの場合で35KHz



sCMOSの登場

CCD



- CCDカメラの性能トライアングル
 - それぞれの性能はトレードオフの関係

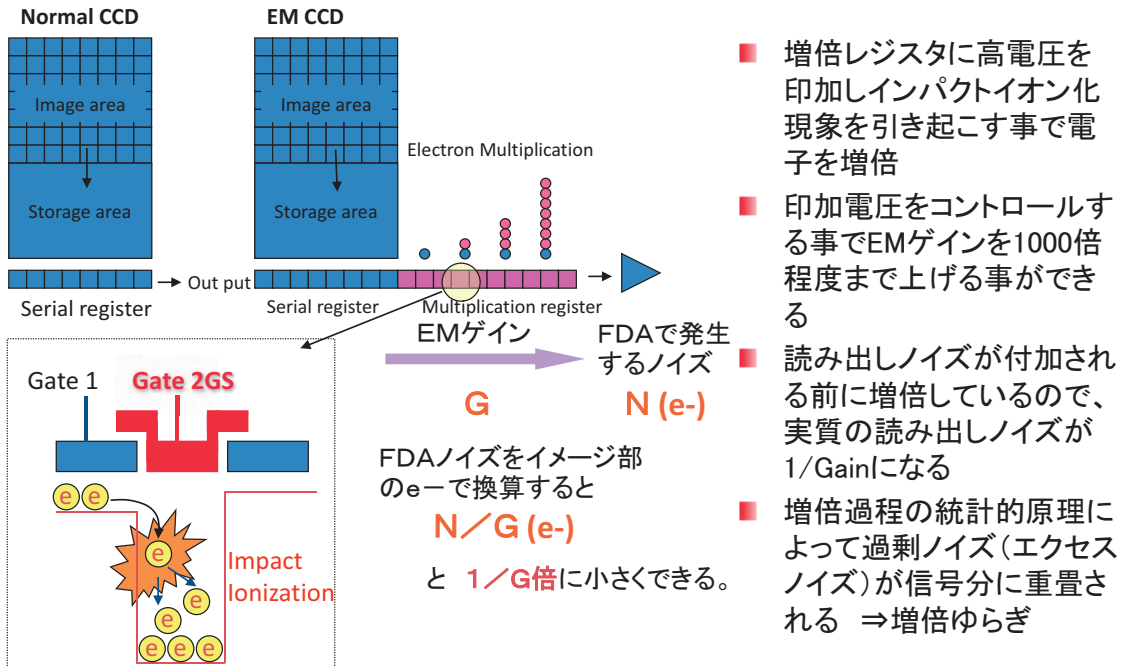
sCMOS



- 高感度、高解像度、高速性を同時に実現
- ノイズレベルは数電子(1~3e-)程度
- 400万画素クラスで100fpsを実現
- 科学計測分野でもCCDからも置き換えが進んでいる

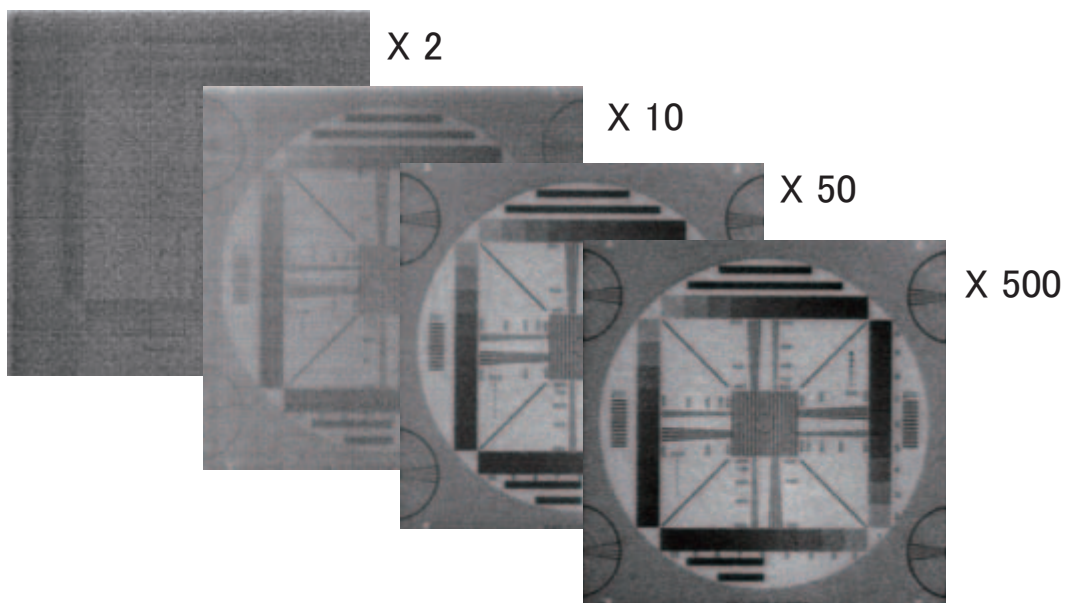
Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

EM-CCDの原理



Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

EM-CCDによる増倍例

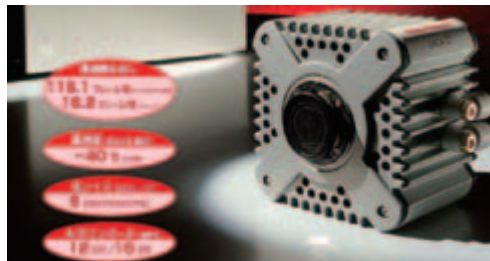
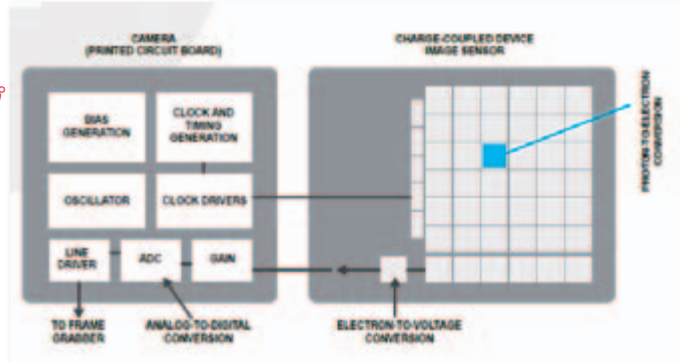


Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

それぞれのカメラの特性

CCD

- 確立された安定した技術
- 電荷電圧変換が単一のアンプで行われる
→高い空間均一性
- シリアル読み出し
→スピードに限界
(30~40Mpix/sec)
- 低い読み出しノイズ
→ $6\sim 10e^-$
- 高冷却が可能
→極めて低い暗電流
- 高い量子効率
→フロント照射で70%程度

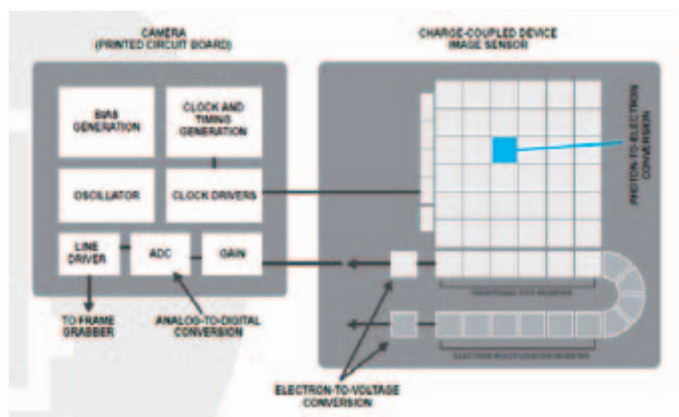


Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

それぞれのカメラの特性

EMCCD

- 背面照射化による高い量子効率→90%以上
- 電子増倍による高いゲイン→読み出しノイズが最も低い ($0.2e^-@500x$ EM gain)
- 特殊技術が必要(高冷却、高電圧駆動)
- 増倍過程の統計的原理による過剰ノイズ(エクセスノイズ)の重畳
- 背面処理化による感度不均一性(固定ノイズ)が存在

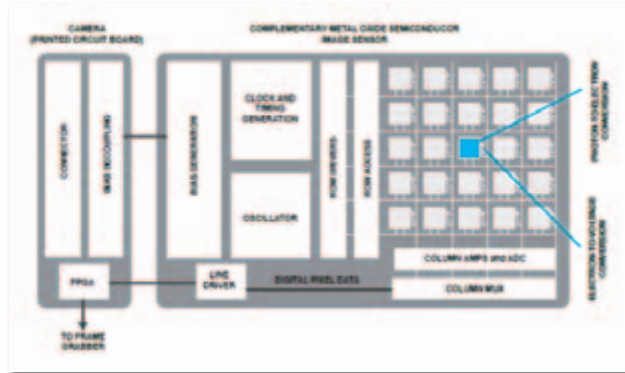


Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

それぞれのカメラの特性

CMOS

- 最新技術
- 列並列読み出し
 - 高速性と低ノイズを同時に実現(400M~500pix/sec)
- より低い読み出しノイズ
 - $1 \sim 2e^-$ rms
- 高い量子効率
 - フロント照射で70%程度
- 各画素、カラム毎にアンプ
 - 画素毎、カラム毎によるばらつき(空間不均一性)



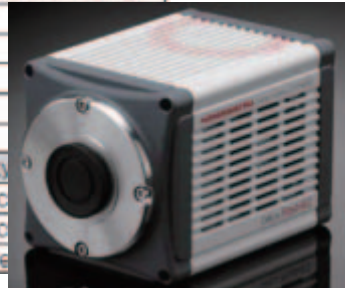
Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

sCMOSカメラの詳細特性

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

sCMOSカメラ仕様例

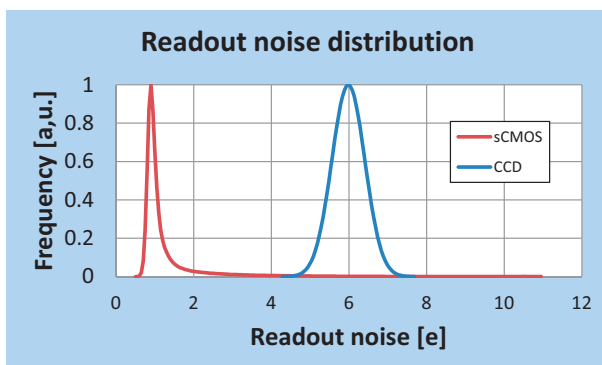
型名	C11440-22CU (ORCA-Flash4.0 V2)		
撮像素子	科学計測用CMOSイメージセンサ FL-400		
有効画素数	2048 (H) × 2048 (V)		
画素サイズ	6.5 μm (H) × 6.5 μm (V)		
有効素子サイズ	13.312 mm (H) × 13.312 mm (V)		
読み出しモード	スタンダードスキャンモード	スロースキャンモード	
読み出し時間	10 ms	33 ms	
読み出しノイズ (typ.)	1.0 electrons (median)	0.8 electrons (median)	
	1.8 electrons (rms)	1.4 electrons (rms)	
読み出し速度	Camera Link	USB 3.0	Camera Link/USB 3.0
全面連続読み出し	100 フレーム/秒	30 フレーム/秒	30 フレーム/秒
2048×1024 ^①	200 フレーム/秒	60 フレーム/秒	60 フレーム/秒
2048×8 ^①	25 655 フレーム/秒	7894 フレーム/秒	7896 フレーム/秒
ビニング ^②	2×2, 4×4		
サブアレイ	可能 ^③		
飽和電荷量 (typ.)	30 000 electrons		
ダイナミックレンジ ^④	37 000 : 1		
S/N	91 dB		
冷却方式 (ペルチェ冷却)	センサ温度	暗電流 (typ.)	
冷却温度/暗電流 (typ.)	空冷	-10 °C (室温: +20 °C)	0.06 elec
	水冷	-20 °C (室温: +20 °C)	0.02 elec
	最大水冷	-30 °C (室温: +15 °C)	0.006 elec



Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

読出ノイズの特性

- CCDは、通常1素子に1アンプのため画素毎のバラツキは小さいが、sCMOSより大きな値。
- sCMOSでは、各画素毎にアンプが有り、バラツキがある。絶対値は小さい。



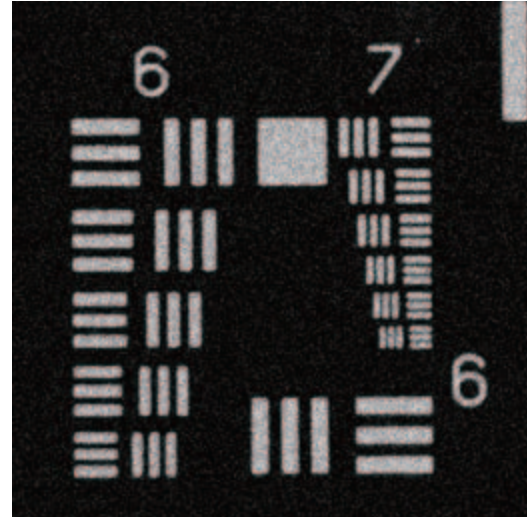
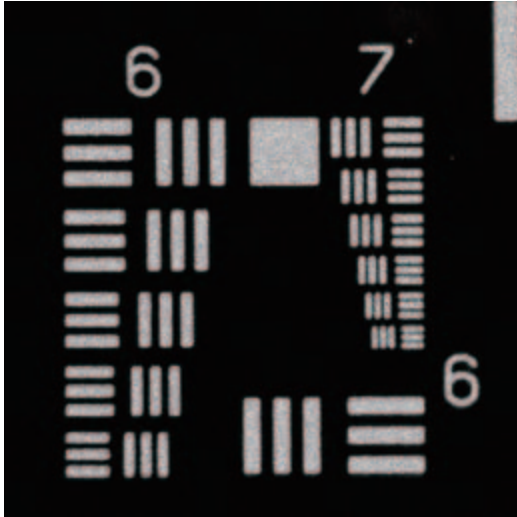
sCMOSとCCDのノイズ分布例

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

読出ノイズの特性

sCMOS

CCD



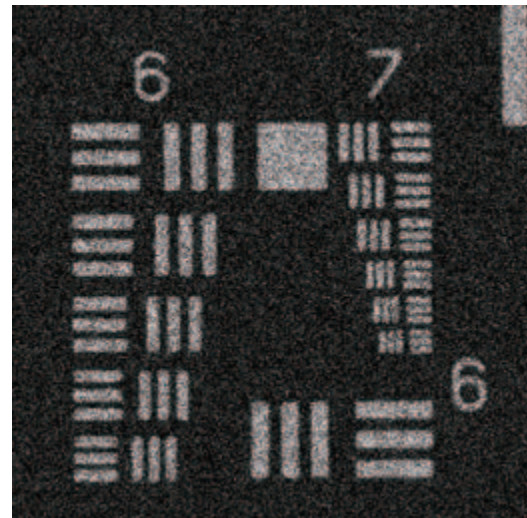
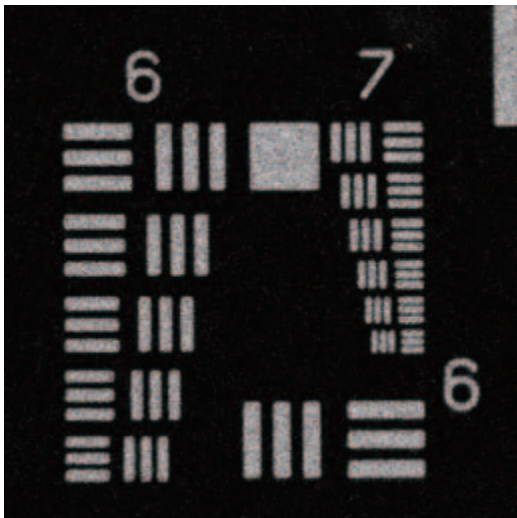
50 photons / pixel

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

読出ノイズの特性

sCMOS

CCD



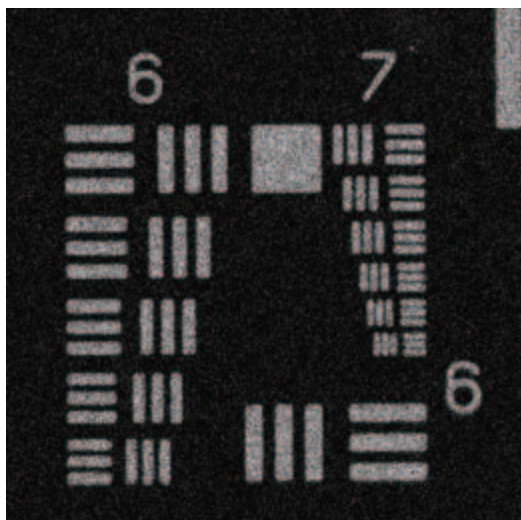
20 photons / pixel

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

読出ノイズの特性

sCMOS

CCD



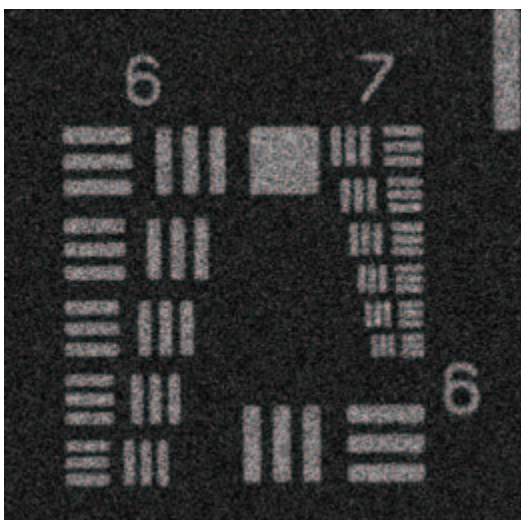
10 photons / pixel

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

読出ノイズの特性

sCMOS

CCD



5 photons / pixel

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

露光・読出方式 ～ローリングシャッタとグローバルシャッタ～

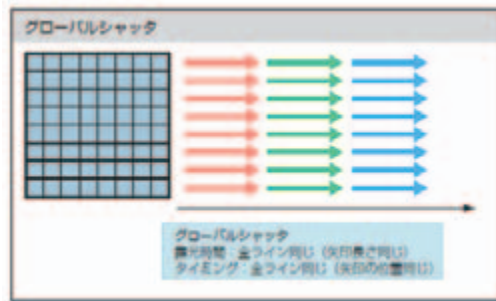
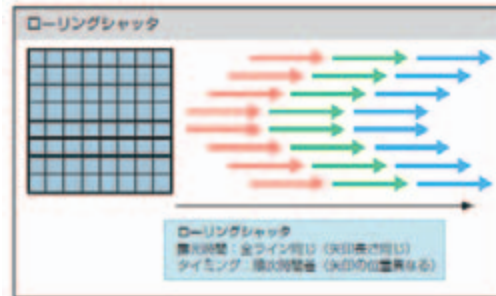
■ 素子の露光及び電荷読出方式

● ローリングシャッタ
順次露光

露光開始時間が1画面中で異なる。
sCMOSでは、水平1ラインは同時露光。

● グローバルシャッタ
同時露光

全画面同時露光を行う



Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

露光・読出方式 ～ローリングシャッタとグローバルシャッタ～

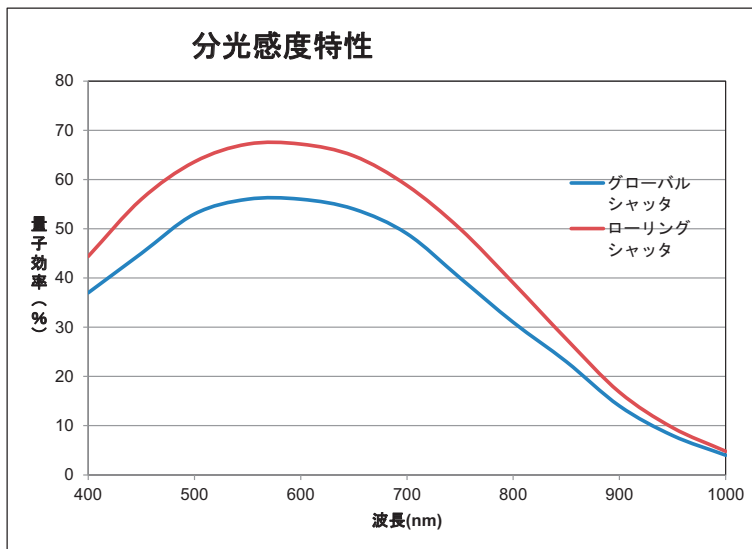
- CMOSは、ローリングシャッタが基本
- CMOSでは、機能追加は画素へTrを増やすことで実現
⇒グローバルシャッタは、Trを追加して実現しているため
開口率が下がり、量子効率も下がる。

	ローリングシャッタのみ	グローバルシャッタ搭載
読出ノイズ electorns (rms)	1. 4	2. 7
量子効率 (%) グラフ参照	7 2	6 0
フレームレート	1	0. 5
残像	なし	小有

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

露光・読出方式 ～ローリングシャッタとグローバルシャッタ～

ローリングシャッタ方式は、高量子効率、低ノイズにより、低照度での撮影に優れている

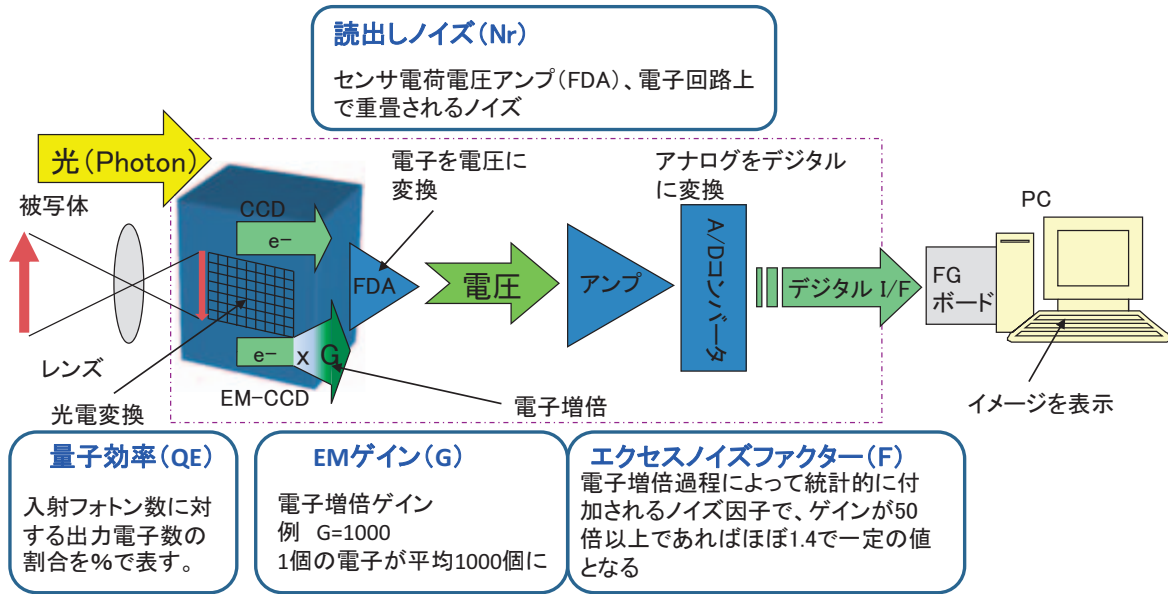


Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

科学計測用カメラのS/N

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

デジタルカメラの信号の流れ



Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

S/N比 (SNR) とは

$$SNR = \frac{QE * S}{\sqrt{F_n^2 * QE * (S + I_b) + (N_r / M)^2}}$$

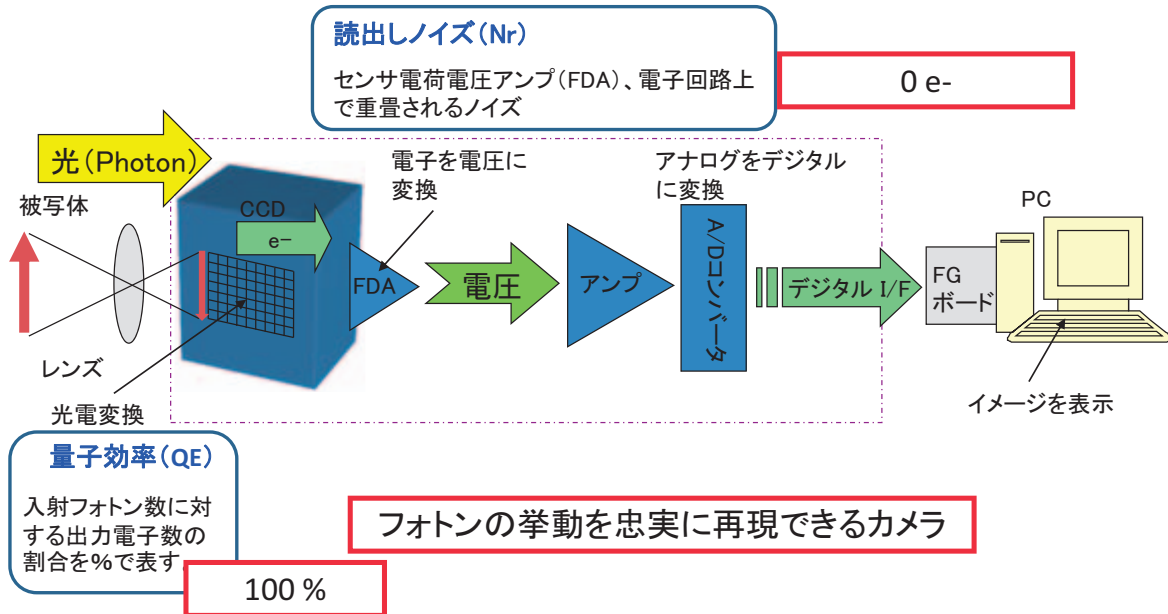
↑ ショットノイズ

↑ 読出しノイズ

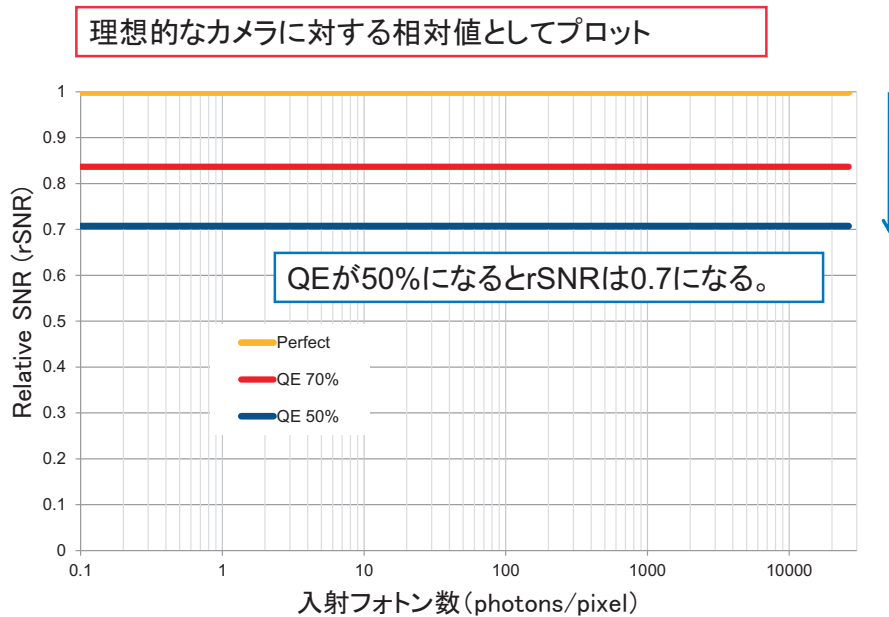
- QE: 量子効率
- S: 入射光子数 (photon/pixel)
- F: ノイズファクター (= 1 for CCD/sCMOS and $\sqrt{2}$ for EM-CCD)
- N_r : 読み出しノイズ (rms)
- M: EM Gain (=1 for CCD / CMOS)
- I_b : 背景光 (バックグラウンド)

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

計測用途に理想的なカメラとは



相対SNR(Relative SNR : rSNR)



実効的な量子効率 (Effective QE)

SNR for CCD/sCMOS

$$\begin{aligned} \text{SNR} &= \frac{QE \times P}{\sqrt{QE \times P}} \\ &= \sqrt{QE \times P} \end{aligned}$$

SNR for EM-CCD

$$\begin{aligned} \text{SNR} &= \frac{M \times QE \times P}{F \times M \times \sqrt{QE \times P}} = \sqrt{\frac{QE \times P}{F^2}} \\ &= \sqrt{QE_{\text{eff}} \times P} \\ QE_{\text{eff}} &= \frac{QE}{F^2} = \frac{QE}{2} \end{aligned}$$

- 読み出しノイズは十分小さいと仮定

EM-CCDの実効的な量子効率はエクセスノイズによるノイズ増加によって半分(50%)になる

EM-CCDのrSNRは0.7以上にはならない

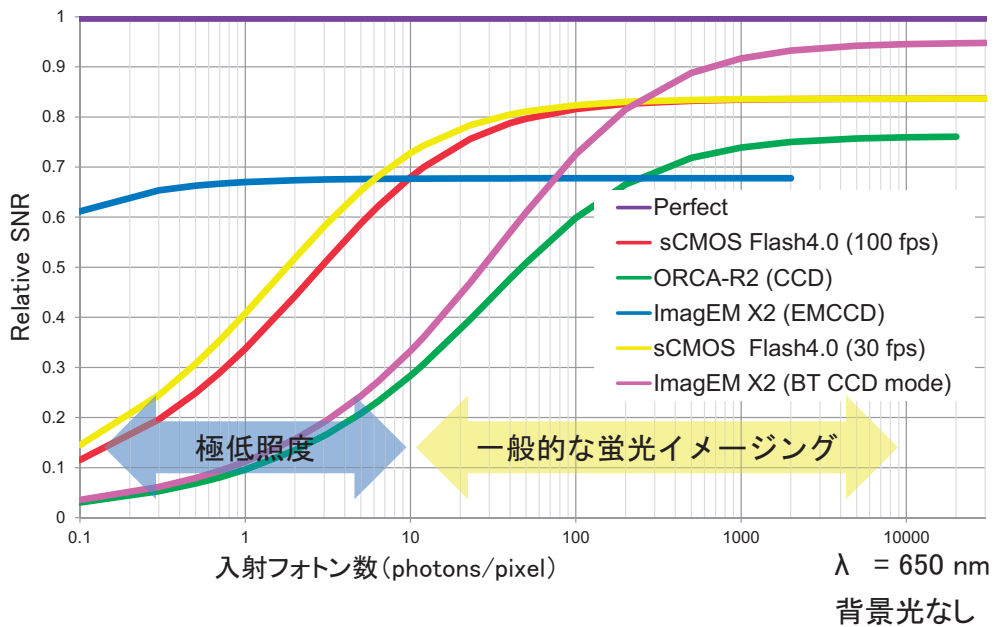
Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

カメラ仕様例

センサ	インターラインCCD	背面照射型EM-CCD	sCMOS
カメラ名	ORCA-R2	ImagEM x2	ORCA Flash4.0 V2
画素数	1024 x 1344	512 x 512	2048 x 2048
画素サイズ	6.45 μm x 6.45 μm	16 μm x 16 μm	6.5 μm x 6.5 μm
QE (@650 nm)	58 %	90 %	72 %
フレームレート	18 fps / 8 fps	70 fps	100 fps / 30 fps
読み出しノイズ (Nr : rms)	10 e ⁻ / 6 e ⁻	< 0.2 e ⁻ (M = 500)	1.9 e ⁻ / 1.3 e ⁻
エクセスノイズファクター (F _n)	1	√2	1

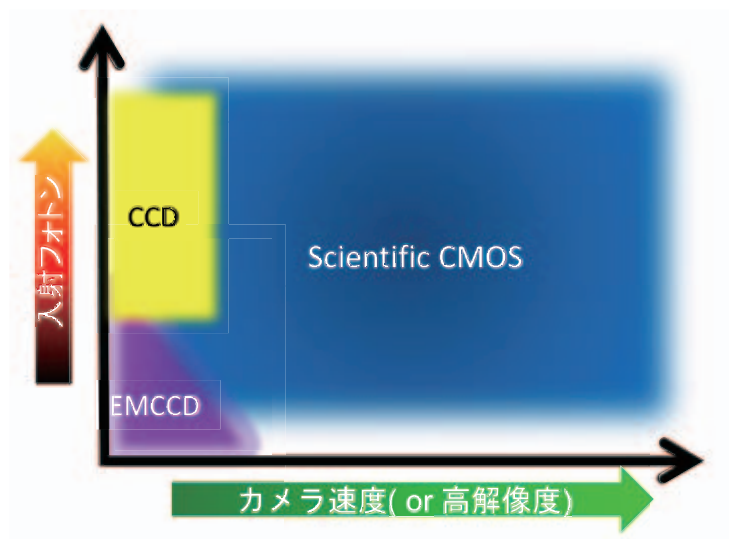
Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

相対SNR(Relative SNR : rSNR)



Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

カメラのポジショニング



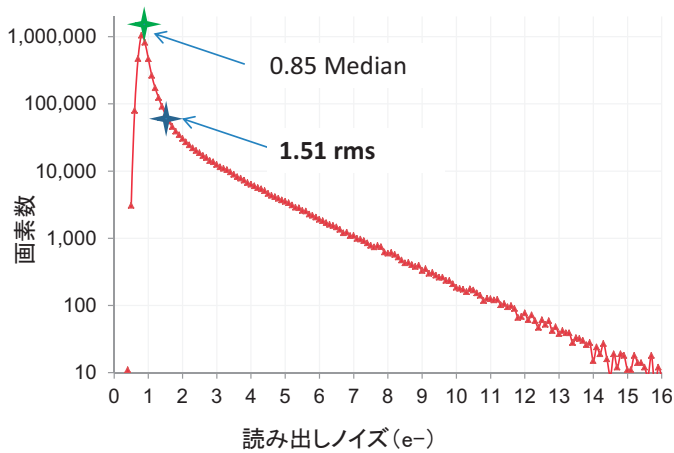
Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

sCMOSカメラの今後

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

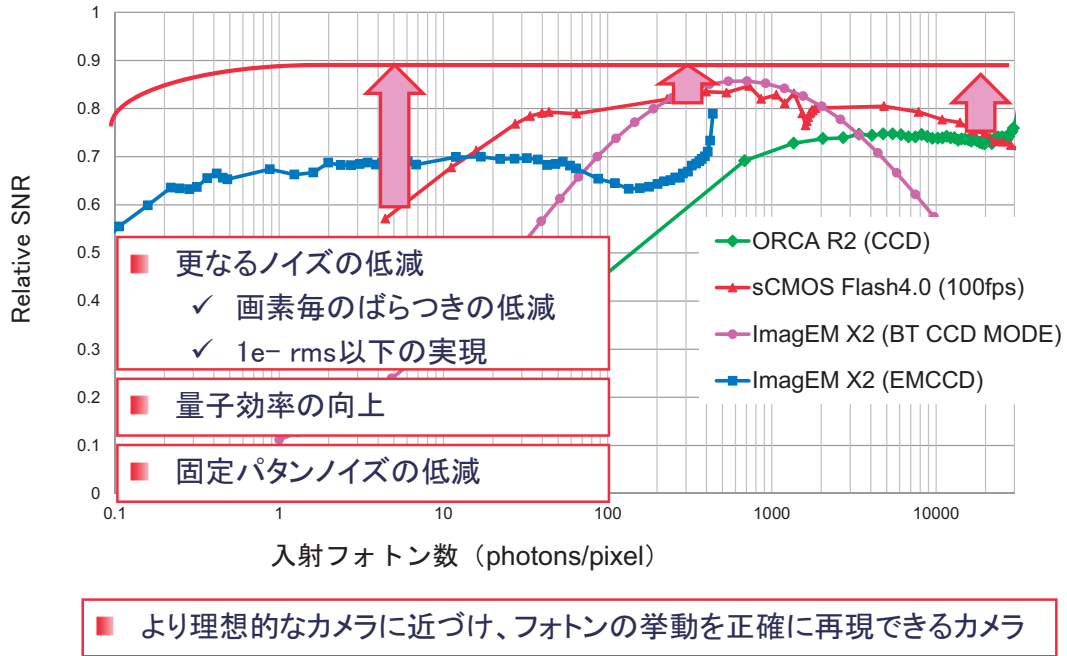
CMOSの課題

- 画素毎のばらつき
 - ✓ ノイズ
 - ✓ ゲイン(感度)



Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

今後のCMOSの方向性



Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

まとめ

- CCDカメラに代わり、科学計測用にsCMOSカメラが普及し始めている。
- sCMOSカメラの特徴は、低ノイズ、高速読出。
- EM-CCDカメラは、非常に暗い領域(数光子/画素以下)では、メリットがあるが、その他の領域では、sCMOSカメラのS/Nが良い。
- 今後、より理想的なカメラを目指し開発を続けている。

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

最後に

・浜松ホトニクス株式会社では、これまで述べた sCMOSカメラ、EM-CCDカメラ、CCDカメラをラインナップしています。

・デモ機を準備しておりますので、ご要望があればご連絡願います。

・URL

www.hamamatsu.com

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved

HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS

ご清聴ありがとうございました。

Copyright © Hamamatsu Photonics K.K. All Rights Reserved