



新しいデジタルシネマ製作用  
35mm CMOS イメージセンサー



**CINEMA EOS**  
SYSTEM

## 新しいデジタルシネマ制作用35mmCMOSイメージセンサー

### 概要

世界中のクリエイティブな映画制作者が注目するデジタルシネマカメラの中に大型単板センサーを使用したデジタルシネマカメラがあります。これらのカメラの多くのセンサーはベイヤー型カラーフィルタ配列に基づいています。デモザイクするアルゴリズムの進歩が、ポストプロダクションで必要とされるカラーグレーディングの技術を充実させてきました。キヤノンは、35mmフィルム映画の最高画質の実現を目指し、画質全体を上げるためにこうしたデモザイクアルゴリズムに代わるものを探求してきました。

本書では、デモザイクアルゴリズムを必要としないキヤノンの新開発CMOSイメージセンサーについて説明します。

### 1.0 はじめに

最初の大型単板センサー搭載デジタルカメラは、それまでのフィルム映画制作に代わるべく特別に開発されたデジタルカメラとして 2003 年に登場しました。その後 10 年で、世界のプロ仕様カメラメーカーがそのようなカメラやビデオカメラを発売しました。さらには、高性能大判デジタルカメラシステム開発に特化した全く新しいメーカーも登場しました。映画カメラマンにとって、こうした大判デジタルカメラシステムの最大の魅力は、現在世界中にある 35mm フィルム映画用レンズ群を使用できることにあります。それと同時に大手光学メーカーで新しいレンズ（特にズームレンズ）の開発も進められています。特に注目すべきは、動画分野の競争が確実に激化しており、そのようなカメラでの階層構造（コスト、イメージング性能及び操作機能の点で）が急速に拡大しています。

こうした単板センサーを用いたカメラでは CCD と CMOS の両方が採用されています。また、一般的なベイヤー [1] 型のカラーフィルタ配列 (CFA) が使われているのが大半ですが、RGB ストライプフィルタ方式を採用しているという注目に値する例外もあります。

### 2.0 新しいイメージセンサーの目標

低予算映画だけではなく、大型映画の制作にも使われたことによって、新世代のハイブリッド HD デジタル一眼レフカメラの動画の長所と短所について激論が交わされ、今でも業界で広く議論が続いています。ただ、イメージングの基準が 35mm フィルム映画であることに変わりはありません。この 10 年、35mm フィルムの相対的な画像性能と発展を続ける各種デジタル機器について多くのことが発表されてきました。キヤノンは、特にデジタル・モーションイメージング用に高性能イメージセンサーを開発することで、新しいセンサーテクノロジーを利用してフィルムとデジタルイメージングの差を縮めることができるのではないかと考えています。

具体的には、35mm のネガフィルムで撮影され、（従来の光化学プロセスまたはデジタルの中間処理によって）ネガのマスターから得られたポジフィルムから投影される映像のように、目を見張る画質を実現する複数のイメージング属性を備えたイメージセンサーの開発は可能であると考えました。この新しい CMOS イメージセンサーの設計で最初に決定したのは、画像サイズを、よく知られている標準の 3-perf の 35mm 映画フィルムフォーマットを基準とするということでした。この決定は、世界にある関連の映画レンズ群を使える可能性を見越してのものでした。

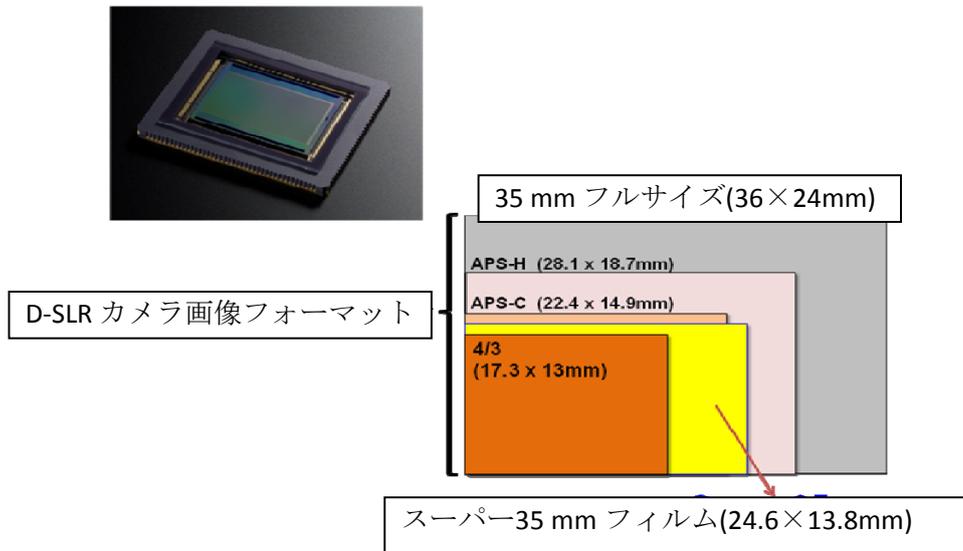


図1 黄色の部分、現在の大型デジタル画像サイズと比較した新しいキヤノン・イメージセンサーの有効画像サイズ

### 3.0 シネマ映像制作の基準

映画フィルムで制作された映像の様々な側面についてはカメラマンにはよく知られており、何十年も昔から技術文献で多数発表されてきました。こうした側面は以下のイメージング属性に分けることができます:

- スピード [2] 露出指数(EI)によって指定されたフィルム感度
- 画像のシャープネス [3] [4] MTF フィルムシステムからの客観的評価
- 粒状性 [5] 写真の沈澱物が不均一であることから生じる粒度
- 階調再現性 [6] シーンの輝度比の管理
- 露出ラチチュード [7] 生のネガフィルム最大感光範囲
- 色再現性 [3] [7] 3つの乳剤の分光感度

左側の専門用語は、映画業界で広く認められている用語です。これらは必然的に、写真フィルムの感光性の化学物質に関連する画像損傷を伴い、「粒子」として知られています。

#### 4.0 映画の専門用語とイメージセンサーの専門用語との整合性

CCD であるか CMOS であるかを問わず、イメージセンサー配列は本質的には同じイメージングパラメータを持っています。各属性の特性は映画フィルムと顕著に違う場合があります。通常、デバイスエンジニアやビデオエンジニアになじみのある専門用語が使われます。例えば、イメージセンサーの「電子ノイズ」は、映画フィルムの「粒子」の類義語と考えることができます。ビデオの専門用語としてはフィルムの「露出ラチチュード」の代わりに「ダイナミックレンジ」が一般的に使われます。同様に、「階調再現性」の代わりに「コントラスト」、「画像のシャープネス」の代わりに「解像度」が使われます。

表 1 は、2 つの専門用語集を対比させたものです。

表 1

映画フィルム	半導体式イメージセンサー
● 露出指数と ISO スピード	感度
● 画像のシャープネス	解像度
● 粒状性	ノイズ
● 階調再現性	コントラスト比
● 露出ラチチュード	ダイナミックレンジ
● 色再現性	色域と精度

## 5.0 新しいセンサーの特性

新しい CMOS イメージセンサーの物理的な特性を表 1 にまとめてみました。

表 1

Physical Characteristics	
Active Image Area Size	24.6 (H) x 13.8 (V) mm
Total Number Photosites	4206 (H) x 2340 (V)
Number Photosites for Active Image	3840 (H) x 2160 (V)
Color Filter Array (with $\mu$ Lens)	RGB Bayer
Size of Photosite ( $\mu$ m)	6.4 (H) x 6.4 (V) $\mu$ m
Pixel Pitch	6.4 $\mu$ m
Power Supply	3.3V / 1.8V
Power Consumption	950mW

図 2 は、カメラからの最終的なビデオ画質を決めるイメージセンサーと密接に関連したシステム構成要素をまとめたものです。

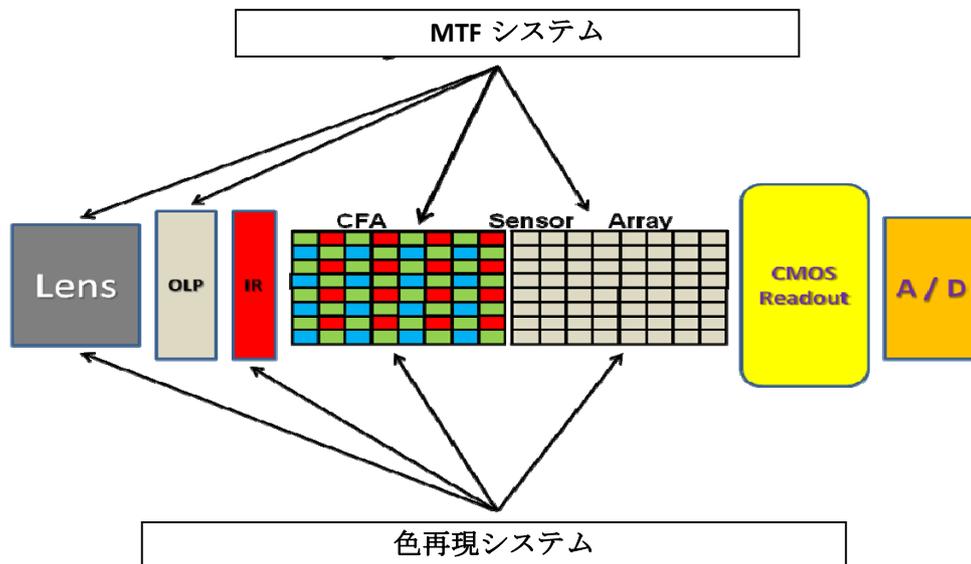


図 2 イメージセンサーシステムを構成する必須要素、キヤノン EOS C300 デジタルシネマカメラのセンサーの前に置かれた外部の光学要素（レンズ、光学ローパスフィルタ、赤外線フィルタ）、およびいくつかの主な性能パラメーターとの全体的な関係

CMOS センサーの配列自体は投影される映像の輝度に対して敏感です。必要なカラースペクトルは、有効な CMOS 画素配列に空間的にマッチするよう設計されたオンチップ・カラーフィルタアレイ (CFA) でサンプリングされます。新しいセンサーで使用されるカラーフィルタアレイは、図 2 で示されている一般的なベイヤー [1]型です。

## 6.0 画素

新しいイメージセンサーの設計目標は低電力での動作を実現することでした。センサーが低電力になればカメラ全体の消費電力が減り、効率的にカメラを動作させることができます。このような理由から、電源電圧を 3.3V に設定しました。広いダイナミックレンジを実現できる画素を開発するには問題が 2 つあります。1 つ目は、十分な飽和電荷量を蓄積できるフォトダイオードの設計、2 つ目は、蓄積された電荷を高速に転送し、出力電圧として読み出す能力です。多くの画素を有するイメージセンサーを、60 フレームのプログレッシブ方式で読み出す必要がある場合この能力は特に課題となっています。新しいイメージセンサーでは、この課題を自社独自の新しい画素構造によって解決しています。

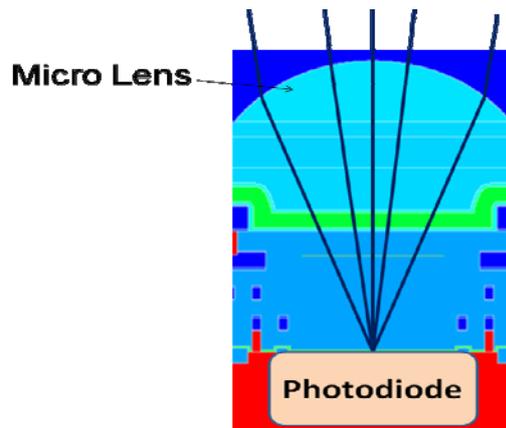


図 3 画素単体の断面

図 3 ようにマイクロレンズを使うと画素の感度が向上します。

## 7.0 画素サンプリング格子

新しいイメージセンサーには合計 4206 (H) x 2340 (V)の画素があります。しかし、イメージセンサーは、内部画像キャプチャ速度最大 60 フレーム/秒でプログレッシブスキャンが行われる標準の 1920 (H) x 1080 (V)高解像度 RGB4:4:4 の映像構成要素出力セットを作り出すように具体的に設計されています。従って、実装されている有効画素数は 3840 (H) x 2160 (V)です。

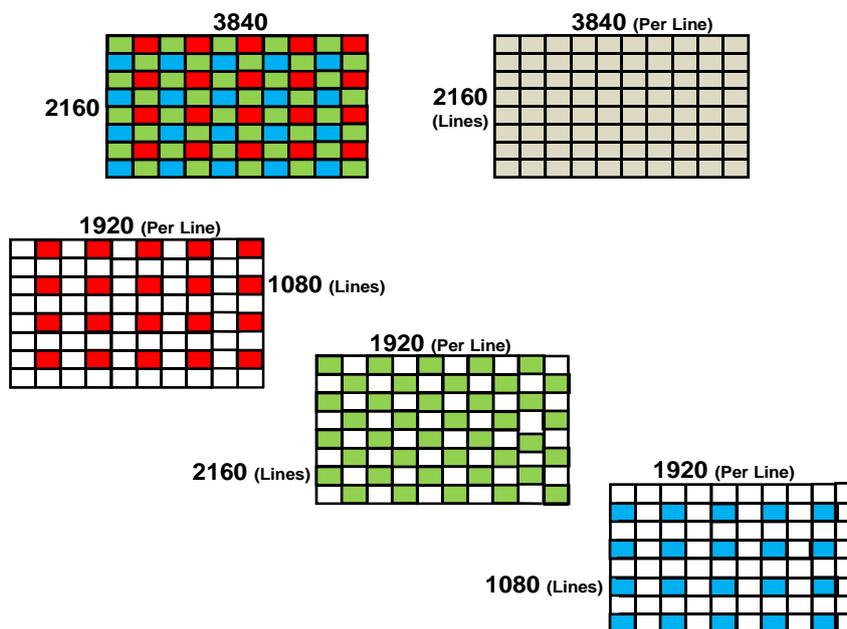


図4 カラーフィルタアレイと CMOS イメージセンサーの個別の図解、およびまばらに抽出された各格子の構造を分かりやすくするために構成要素のカラーフィルタ別に分けた CFA。

グリーンの解像度（輝度の解像度）を最大にするため、イメージセンサーの読み出し法は、一般的にグリーンの画素の 5 点形サンプリングの「ベイヤー補完」を行っていません。この新しいセンサーの設計では、その形を問わず「4K」解像度を追求するものではなく、R、G、B の各映像構成要素の再現を 1920 (H) x 1080 (V) にしています。

図5に示されているように、グリーンの画素配列は実際に 1920 (H) x 1080 (V)の2つの個別の格子で構成されています。2つのサンプリング格子は時間内にサンプリング周期によって互いに分離されます。水平ドメインでは2つの画素が水平のサンプリング周期で、縦方向では1行周期で分離されます。光電変換後にこれら2種類のグリーンの画像配列を抽出する際、補完は一切必要ありません。

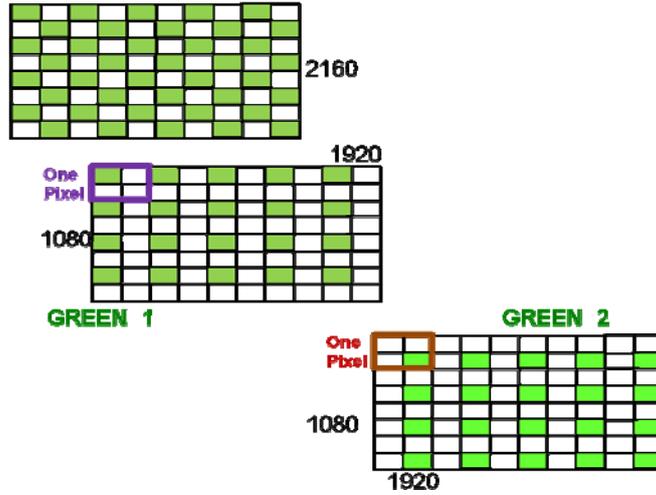


図5 それぞれ 1920 x 1080 の画素を持つ 2 種類のグリーンのサンプリング格子

## 8.0 レッドとブルーの出力デジタルサンプリング構造の構成

CMOS イメージセンサーの利点は、読み出し時に個々の画素にアクセスできるということです。図6を見ると、レッドとブルーの各サンプリング格子は、実際に横の画素が 1920、縦のラインが 1080 本あるが、各サンプルは空間的に横も縦も互いに切り離されていることが分かります。読み出しの仕組みにより、レッドとブルーの出力は 1920 (H) x 1080 (V) のデジタルサンプリング構造になります。個々のカラーコンポーネントの間に補完の必要は一切ありません。

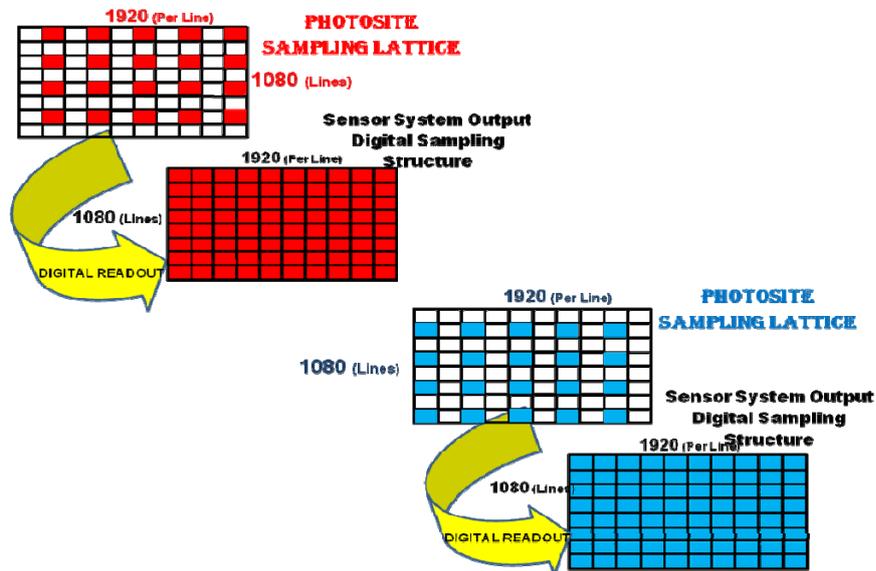


図6 まばらに抽出された画素を標準出力デジタルビデオサンプリング構造にするレッドとブルーのセンサー読み出し

## 9.0 映像の RGB の構造化

新しいイメージセンサーには、同じ帯域幅の RGB、つまり、それぞれプログレッシブに読み出され、それぞれのデジタルサンプルが 1920 (H) x 1080 (V) の RGB 4:4:4 のセットを作り出せるという利点があります。グリーンには 2 つの 1920 x 1080 の構成要素のセットがあります。4 種類の映像構成要素はプリプロセッサ LSI に送られ、そこで 2 つのグリーンの映像信号の合成などが行われます。

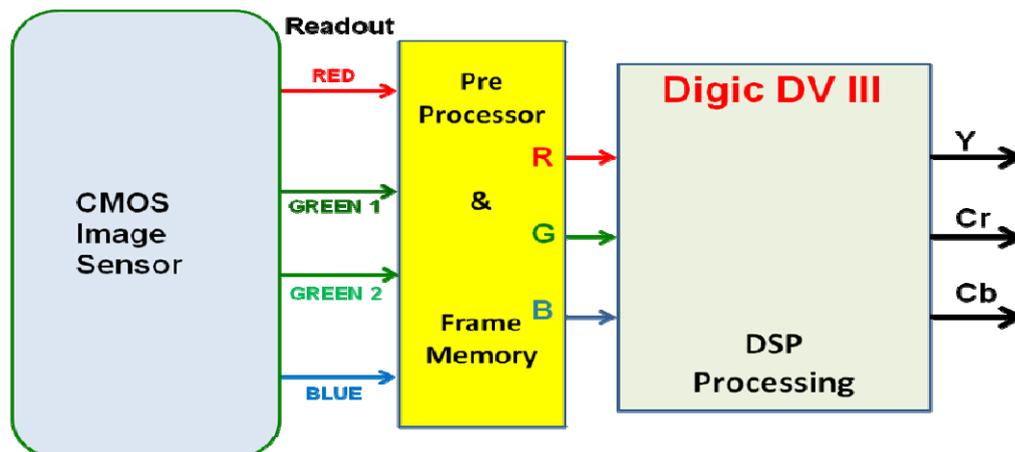


図 7 イメージセンサーから読み出された 2 種類のグリーンの映像信号は外部のプリプロセッサ LSI で合成されます。

## 10.0 グリーンのシステムの利点

2 種類のグリーンの映像は、図 8 に示されているように合成され、最終的にビット深度の高いグリーンの映像構成要素が生まれます。

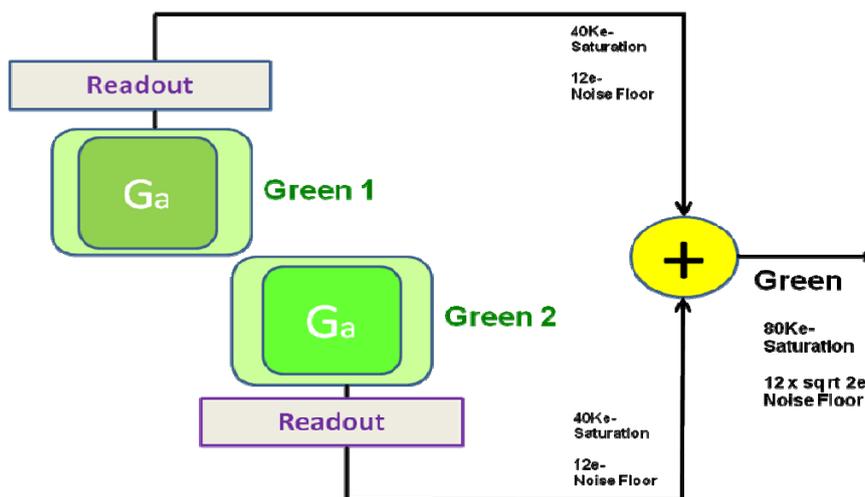


図 8 CMOS イメージセンサーから得られた 2 つの映像読み出しがプリプロセッサ LSI の中で最終的なグリーンの映像構成要素になるという考え方

グリーンのプロセスには技術的に重要な以下の利点があります。

- 1) 加算したグリーンの出力映像の有効な飽和レベルが倍になる。
- 2) 最終的なグリーンの出力のノイズの増加はわずかに $\sqrt{2}$ 倍。
- 3) 上記 1) と 2) により、グリーンの信号の有効ダイナミックレンジが広がる。
- 4) 有効出力のグリーンの映像のビット深度が増す。
- 5) 2 つの個別のグリーンのサンプリング格子（縦横両方）の半画素オフセットで実際にセンサーのサンプリングプロセスに伴う一次側波帯スペクトルが消え、グリーンのエイリアジングが消える。
- 6) 読み出し過程で、横の MTF、プログレッシブな縦の MTF および関連のエイリアジングの最適化に役立つ有効な FIR\* フィルタを作る。

上記 5) と 6) については、イメージセンサーの解像度について論じている付属のホワイトペーパーをご覧ください。

\* FIR は Finite Impulse Response（有限インパルス応答）の略語で、デジタル信号処理(DSP)に使われるデジタルフィルタの一種です。

## 11.0 高速読み出し

ほとんどの CMOS イメージセンサーには、ある速度で水平に動いている画像に垂直の歪みが生じる場合があるという固有の課題があります。この歪は、行単位で行うセンサーの読み出しの仕組みによるもので、1 フレームの読み出し時間に依存します。新しいイメージセンサーは、画像キャプチャレートを 24 フレームに設定した場合 1 フレームの読み出し時間が 1/60 秒という高速で行われ、上記 CMOS イメージセンサーの課題である「ローリングシャッター歪」が大幅に減ります。新しいキヤノン EOS C300 デジタルシネマカメラの場合、4 つの映像信号が（イメージセンサーの後の LSI チップの中にある）フレームメモリに入り、24P 映像出力に合わせて構成要素がフレームメモリから読み出されます（図 10 を参照）。25P と 30P の場合にも仕組みは同じです（つまり、読み出しは 1/60 秒）。

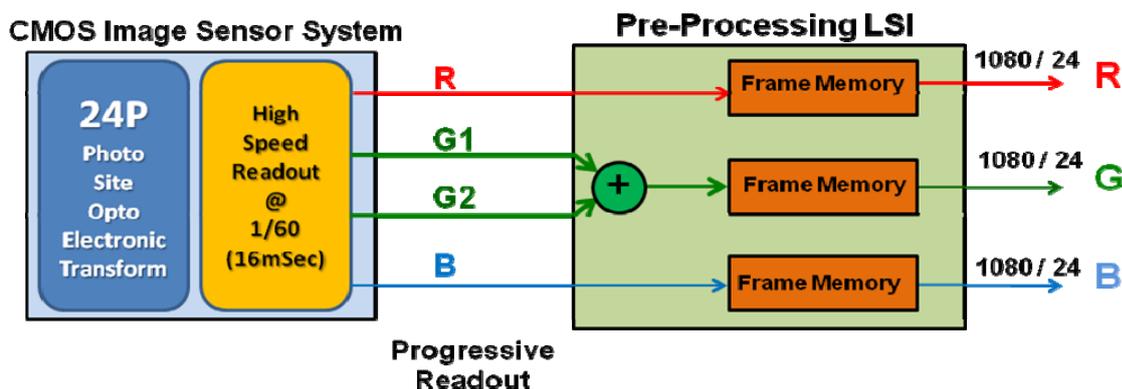


図 9 24 フレームの画素画像キャプチャの高速読み出し

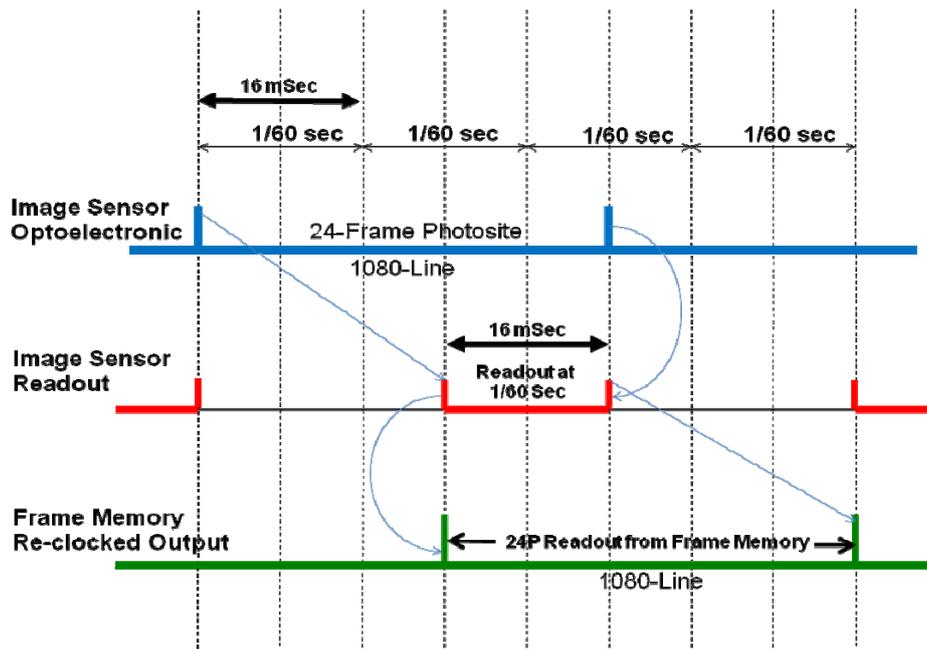


図 10 キャプチャされた 24P 画素が、1/60 秒で読み出され、次にメモリー処理されて 24P が保存される仕組み

1080 本のインターレース、60i のモードにイメージセンサーが設定されている場合、4 つの映像構成要素がイメージセンサーから読み出される速度は 2 倍になります。この 60i モードでは、イメージセンサーの中で 2 つのラインを加算し 540 本のフィールド信号を形成し、各フィールドは 1/120 秒の速度で読み出されます。4 つの映像信号は（イメージセンサーの後の LSI チップの中にある）フレームメモリに入り、個々の 540 本のフィールドをそれぞれ 1/60 秒で読み出すようにメモリー処理され、最終的に 1080/60i の映像フォーマットを構成します（図 12 を参照）。

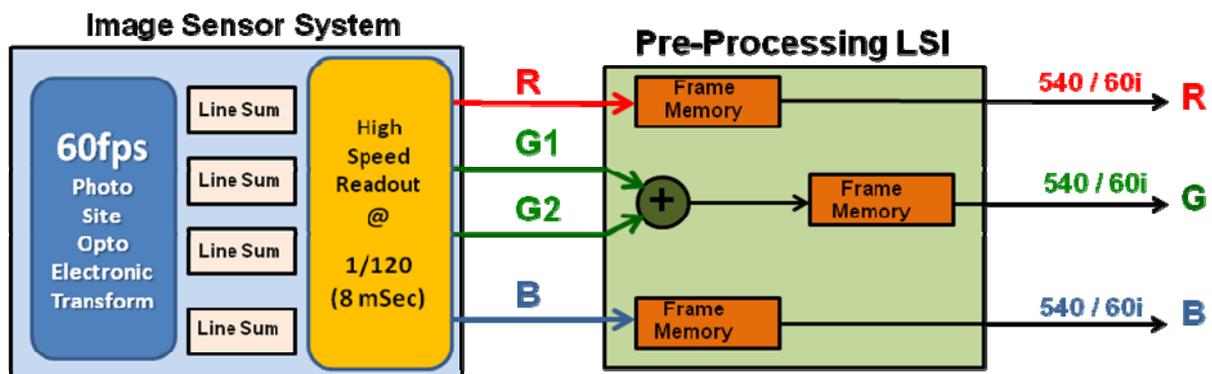


図 11 インターレース 1080/60i フォーマットの 540 本のフィールドがイメージセンサーの中で処理され、ローリングシャッター効果を減らすために 1/120 秒で読み出しが行われます。

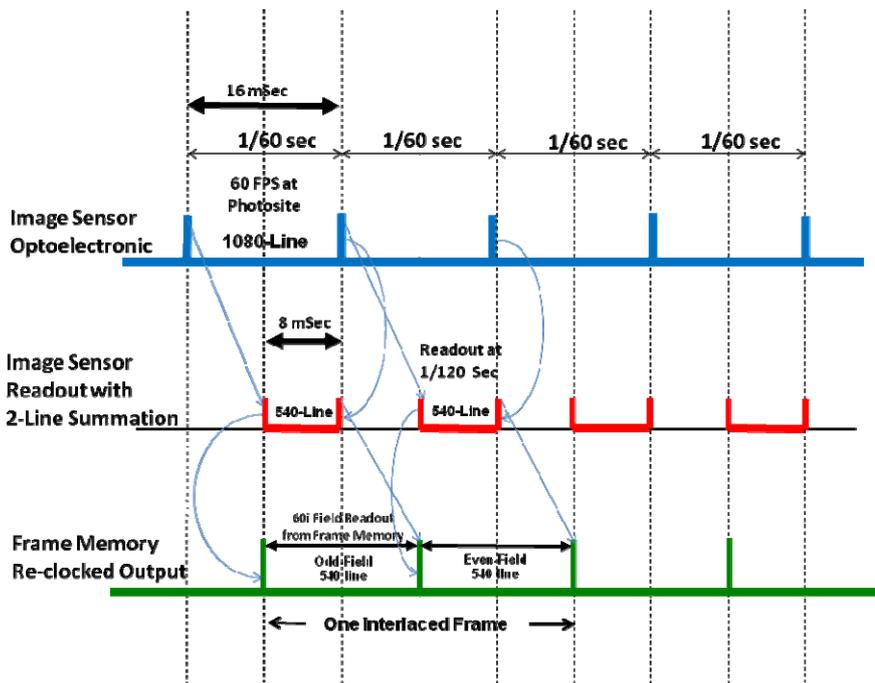


図 12 キャプチャされた 1/60 秒の画素が、1/120 秒で 540 本のフィールドとして読み出され、次に 60i を構成するためにメモリー処理される仕組み

高速読み出しによって、被写体の急激な動きに伴う歪みが大幅に減ります。

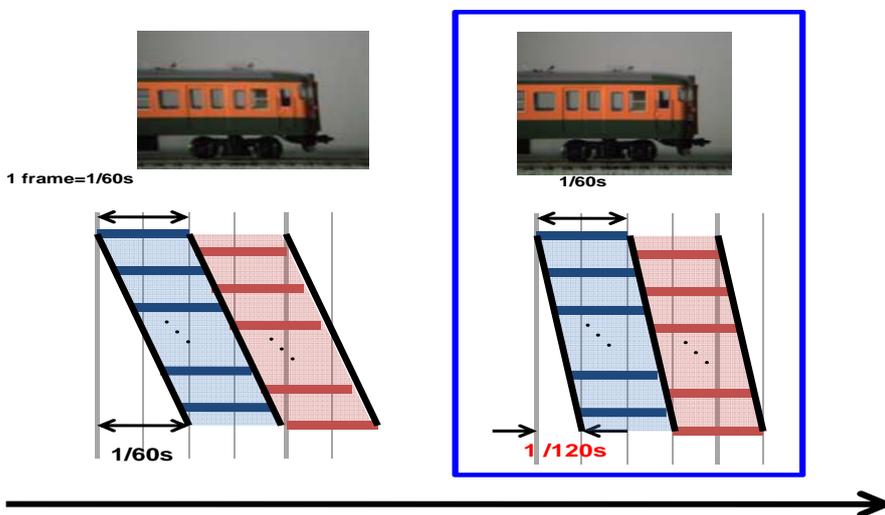


図 13 1/120 秒の高速インターレース方式の読み出しの採用によるローリングシャッターの歪み減少の基礎となる考え方

## 12.0 イメージセンサーのノイズ

各画素には、内部で生じる各種物理的メカニズムに関連するノイズ発生源があります。

- 入カメカニズムによるノイズ：短時間で集められた光電子のランダム性に起因する光ショットノイズ
- リセットノイズ：画素の信号読み出し部分(電荷検出部)をリセットする時に発生する熱ノイズ
- 出力ノイズ：画素アンプで発生する  $1/f$  ノイズ
- 出力アンプのノイズ：MOSFET 増幅回路の KTC ノイズ

新しいイメージセンサーでは、全体でイメージセンサーのノイズフロアを定義する最後の 3 つのノイズ発生源を効果的に減らす多くの方法が採用されています。

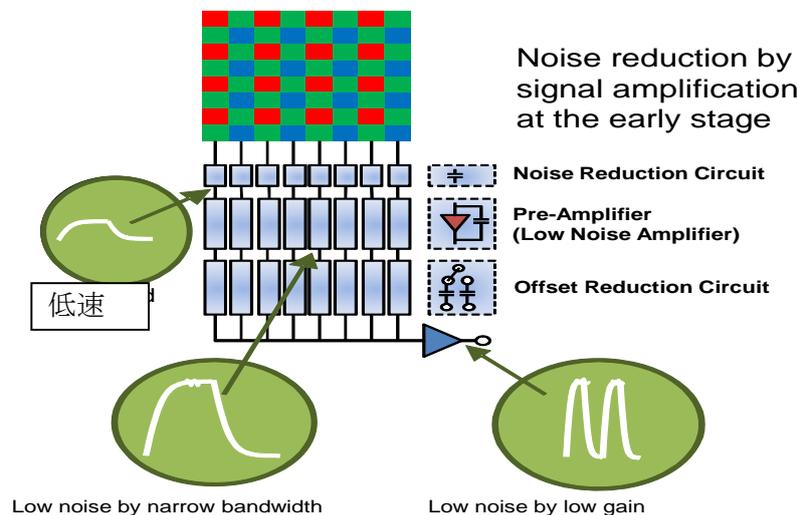


図 14 アナログドメインにおける CMOS イメージセンサーの構造の概要

画素からの出力信号に含まれるノイズは主に、画素をリセットする際に発生する熱ノイズ（リセットノイズ）と固定パターンノイズです。固定パターンノイズは主に、画素アンプに用いられる MOS トランジスタのしきい値のばらつきによるものです。これらのノイズは、ノイズ低減回路（相関二重サンプリング回路）によって低減されます。ノイズが低減された信号は次に、プリアンプによって、次段の AD 変換処理に最適なレベルに増幅されます。プリアンプは、帯域が狭いため、低ノイズのまま増幅することができます。増幅された信号は、オフセット除去回路により、プリアンプのオフセットが除去された後、出力アンプにより出力されます。

### 13.0 イメージセンサーダイナミックレンジ

ダイナミックレンジ (DR) の正式な定義は、飽和レベル (飽和電荷量) とノイズフロアの比率です。

$$\text{DR (単位 dB)} = 20 \text{ Log (飽和時における最高フォトダイオード信号/ r.m.s. ノイズ)}$$

この新しいイメージセンサーの場合、個々の RGB 画素の飽和電荷量は

$$= \text{約 } 40,000 \text{ 電子}$$

$$\text{ノイズフロア (飽和電荷が読み出せるゲインに設定した場合)} = 12 \text{ e-}$$

$$\text{ダイナミックレンジ} = 20\text{Log}(40,00/12)$$

$$= 70 \text{ dB}$$

$$\text{有効グリーン (2つのグリーン信号の合計) の飽和電荷量} = 80,000\text{e-}$$

$$\text{ノイズフロア} = 12 \times 1.414 \text{ e-}$$

$$\text{ダイナミックレンジ} = 20\text{Log}(80,00/17)$$

$$= 20 \text{ Log } 4714$$

$$= 73.5 \text{ dB}$$

### 14.0 カメラ操作のダイナミックレンジ

この新しい CMOS イメージセンサーを実際に搭載した新しいキヤノン C300 デジタルシネマカメラでは、カメラの輝度映像は以下のようにグリーン映像要素が支配的です。

$$Y = 0.213R + 0.715G + 0.072B \quad (\text{Rec 709 の標準マトリクス})$$

この式では明らかにグリーンが支配的であるため、輝度映像の有効ダイナミックレンジは 72 dB (または 4000:1) を超えます。

イメージセンサーのダイナミックレンジを利用する従来の映像手法は、(優れた輝度の階調再現性を確保するため) 求めるコントラストレンジをこのセンサーを搭載したカメラの公称露出範囲に割り当てて映像処理システムのゲイン配分を設計することです。通常、コントラストレンジが 54dB の近辺 (500:1 レンジ以上) になるよう、ノイズフロアに対するシーンの基準となるホワイト (スタンダードのグレースケールチャートで反射率 89.9%のホワイト) を選びます。今回の新しい CMOS イメージセンサーの場合、シーンのハイライトをキャプチャするため約 18dB の露出オーバー範囲を残し、センサーの総ダイナミックレンジは 800%になります (図 15 を参照)。

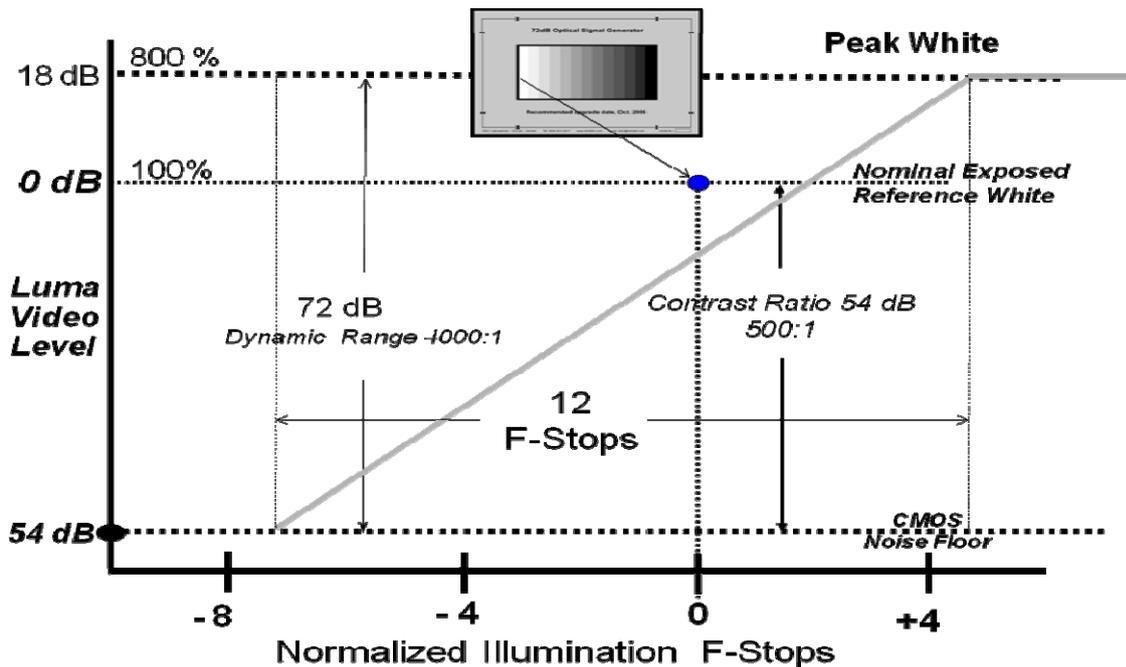


図 15 カメラの主ゲインを 0dB に設定した時に、明度比 54 dB（公称露出の信号部分）と残りの過剰露出部分に対処する 18 dB レンジの間の総ダイナミックレンジについて想定される輝度 72 dB を利用した場合

## 15.0 カメラのダイナミックレンジ：放送映像の場合

カメラ内の RGB 映像処理システム的设计では、キャップをした状態のブラックから基準となるホワイトレベルまで優れた階調再現性を確保しつつ露出オーバー部分でシーンの詳細を忠実にとどめるようにセンサーのダイナミックレンジを利用することが課題です。そして、そのためには RGB の映像信号がノンリニアに処理される方法に十分に注意しなければなりません。各種 HDTV 製作規格 (SMPTE と ITU) では、カメラのキャップをした状態のブラックレベルから基準となるホワイトレベルまでの映像領域のノンリニア光電変換関数 (ガンマ補正) の特性が数学的に規定されていますが、イメージセンサー能力 100% から 800% にかけてのシーンの詳細のノンリニア処理の構造についてはカメラメーカーに一任されています。このことは、一般的に、特定のガンマ曲線をうまく調整する機能および通常露出オーバー信号に対処するために「KNEE」機能が実装されています。

こうした処理を行うと露出オーバーのレベルが 300% 程度に収まります (図 16 を参照)。C300 には実際にプログラムされた 9 つのノンリニア変換特性の選択肢があります。選択肢は、図 16 で概説されているものの変形であり、プログラムの由来する形に対応しています。様々な形のブロードキャストビデオアプリケーション、その他特に映像制作に合わせた曲線を選択することができます。

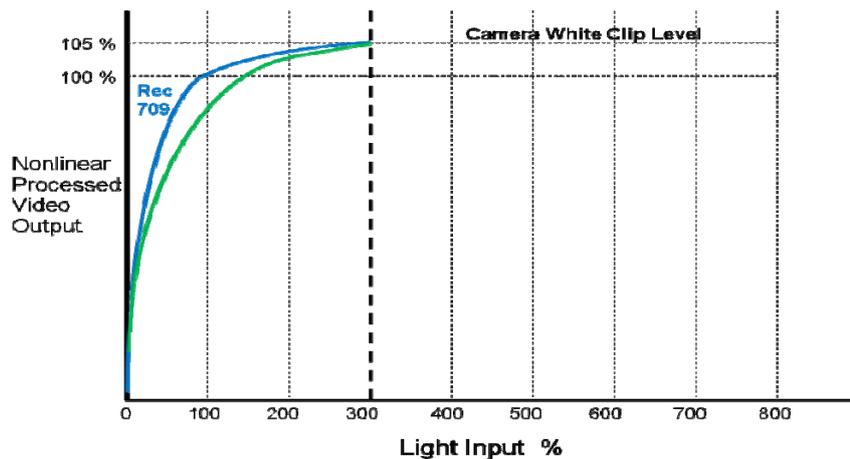


図 16 青は露出オーバー信号に対応するスタンダードな Rec 709 のガンマ曲線および追加の KNEE 曲線。緑の曲線は、総合特性をより滑らかにすることを目指したガンマ曲線。

C300 に搭載されているガンマ曲線 Canon-Log については別のホワイトペーパーで説明します。これは特別に設計された、イメージセンサーの 800%の輝度ダイナミックレンジをフルに利用する対数曲線で（主ゲインを+2.5dB (ISO850) に設定した時）、カメラの記録メディアに記録します。

## 16.0 結論

新しい大型単板 CMOS イメージセンサーが開発されました。高品位 HD 映像の制作を意図したものであり、全体として最高画質の 35mm 映画フィルムに近い映像の獲得というゴールを支える多くの技術が活かされています。

### 参考文献

- [1] B.E. Bayer "Color imaging Array" U.S. Patent No. 3,971,065
- [2] Fujifilm Team, "New Fujicolor High-Speed Negative Film and Fujicolor Positive Film" J.SMPTE, July 1985, p: 735-742
- [3] Kodak Team, "Eastman Color Negative Film 7291" J. SMPTE, Dec 1983, p: 1302 – 1309
- [4] Otto H. Schade, Sr. "Image Quality: A Comparison of Photographic and Television Systems" J.SMPTE, June 1987 p: 567 - 595
- [5] Kodak team, "Choosing Eastman Color Negative Film 5247 or Eastman Color High-Speed Negative Film 5294" J. SMPTE, July 1985, p: 724 – 734
- [6] Kodak Team, "Interface of Motion-Picture Film and Video" J. SMPTE, June 1986, p: 614 – 623
- [7] Dr. R.W.G. Hunt "The Reproduction of Color in Photography Printing and Television" Fountain Press, 1975 Pages: 167 – 184