

デジタルカメラ用撮像素子

三 沢 岳 志

Image Sensor for Digital Still Cameras

Takeshi MISAWA

Pixel number of the image sensor was increasing with the rapid diffusion of the digital still camera. The reduction of image sensor pixel size and wide dynamic range image sensor are mentioned here.

Key words: digital still camera, image sensor, CCD, CMOS, wide dynamic range

1995年より普及の始まったデジタルカメラも、カメラ映像機器工業界の発表によると、2003年には国内だけで877万台（トイカメラを除く）、輸出を加えた全世界では4341万台もの台数が出荷された。今年はさらに、全世界で前年比40%増の6090万台のデジタルカメラが出荷されると予測されている。図1は国内カメラ種類別の出荷台数の推移を示したものであるが、デジタルカメラの普及に伴ってフィルムカメラが減少していく様子がよくわかる。台数ベースでは2001年にフィルムカメラとデジタルカメラが入れ替わっており、いまやカメラといえばフィルムカメラではなくデジタルカメラのことを指すようになった。また、カメラ全体の台数としては、デジタルカメラが普及することにより大幅な台数増となり、また単価がデジタルカメラのほうが高価であるために、市場は拡大している。

デジタルカメラに使われる撮像素子の画素数も、コンパクトタイプで800万画素、一眼レフタイプで1100万画素に達している。このように進歩の著しいデジタルカメラの撮像素子について、微細化の観点からと、新しい機能として注目されている高ダイナミックレンジ撮像について、さらにその他撮像素子の最近の動向について述べる。

1. デジタルカメラ用撮像素子の開発動向

デジタルカメラに使われている撮像素子は、CCD型撮像素子（以下、CCD）とCMOS型撮像素子（以下、CMOS）の2種類がある。このうち、コンパクトタイプのデジタルカメラに使われているのは、ほぼCCDである。これはCCDのもつ高感度、高SNRが評価されているためであると考えられる。

デジタルカメラに用いられる撮像素子に対しては、2つの要求が市場にある。1つは、デジタルカメラの小型化・低価格化へ対応するための撮像素子の画素ピッチ縮小要求、もう1つは、デジタルカメラの描写力向上に対応するための多画素化要求である。要するに、ユーザーは小さくて高性能なデジタルカメラを求めている。より小さく、より多画素の撮像素子を求める声に応じて、撮像素子の微細化が進行した。

図2は、国内デジタルカメラの画素数別国内出荷台数の推移を示したものである。出荷台数中で、年ごとにどの画素数クラスのデジタルカメラが売れているかがわかる。1999年から2002年までは、前年に比べより画素数の多いデジタルカメラが出荷されているが、それに対し、その下の画素数のデジタルカメラ出荷台数はほぼ影響を受けていないことが読み取れる。しかし、2003年の出荷台数をみると、順調に伸びていた200万画素クラスが大幅減に

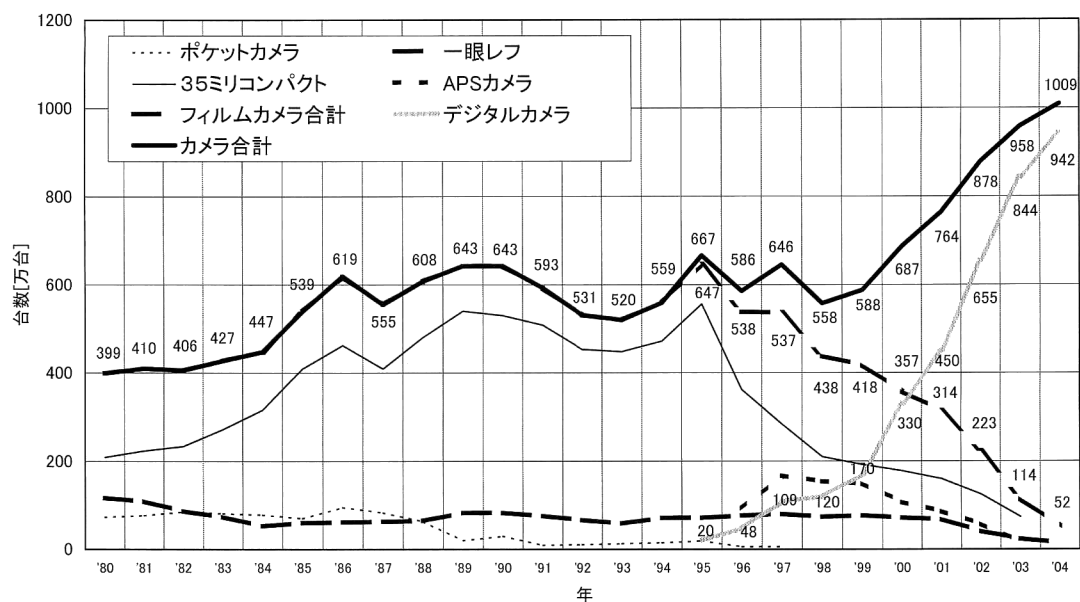


図1 国内カメラ種類別出荷台数の推移。

転じている。かわって伸びたのは、300万画素クラスのデジタルカメラである。また、2003年は100万画素クラスのデジタルカメラが大幅減となっているが、これは携帯電話に100万～200万画素クラスのカメラが搭載されたことに起因する。携帯電話に搭載されていれば、あえて同画素クラスのデジタルカメラを買うことはない。

今年については、あくまでも予測であるが、ユーザーはより多画素のデジタルカメラを求める傾向が続くと考えられることから、300万画素クラスが底辺となり、400～500万画素が売れ筋、600～800万画素がハイエンドのデジタルカメラになると思われる。200万画素クラスは、先ほど述べた携帯電話のカメラの影響で大幅減になると予想できる。

1.1 撮像素子の微細化

ここでは、デジタルカメラに用いられる撮像素子の一般的な微細化について、特にコンパクトタイプのデジタルカメラに注目して述べる。この中で、CMOSの微細化については最近大きな進歩があったので、次節にまとめた。

図3は、2004年3月現在で市場に流通しているコンパクトタイプのデジタルカメラの発売日と、使用されている撮像素子の画素数を示したものである。一時期、画素数については〇〇万画素で十分という記事がデジタルカメラ雑誌などで語られたが、実際には多画素化への流れを止められなかった。コンパクトタイプのデジタルカメラの撮像素子画素数は一時期500万画素でとどまっていたものの、2003年夏に600万画素、秋には800万画素のカメラが登場した。また、2004年1/4半期には、200万画素クラス

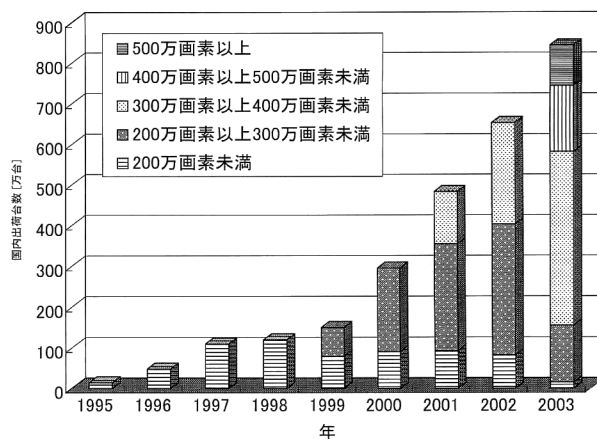


図2 国内コンパクトタイプデジタルカメラ画素数クラス別出荷台数。

のデジタルカメラの発売はない。市場から100～200万画素クラスのデジタルカメラが消える日も近いと思われる。

図4は図3と同様に、市場に流通しているコンパクトタイプのデジタルカメラの発売日と、それに用いられている撮像素子の画素ピッチをプロットしたもので、画素ピッチ微細化の傾向を実線で示したものである（一部公表されている資料よりの推測を含む）。

まず、市場には、画素ピッチが2.2～4μmまでの撮像素子が混在していることがわかる。この中で特にバリエーションが豊富なものは200万画素クラスで、低価格をねらい3.9μmのCMOSを搭載したものと、小型化をねらい2.8μmピッチのCCDを採用したものが混在している。300万

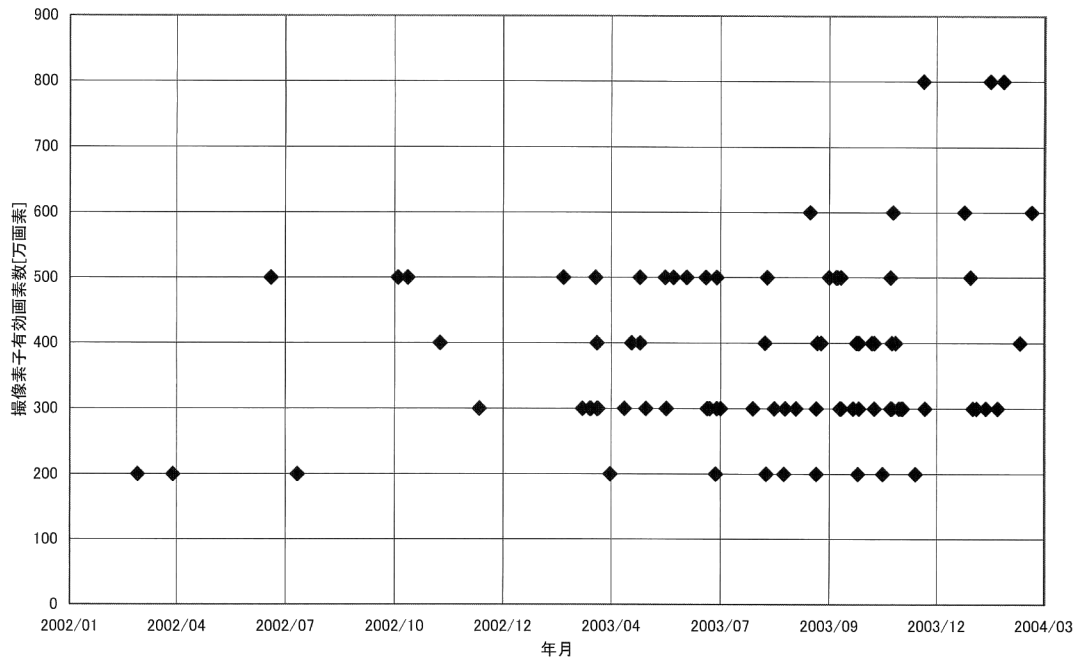


図3 コンパクトタイプデジタルカメラの発売日と画素数.

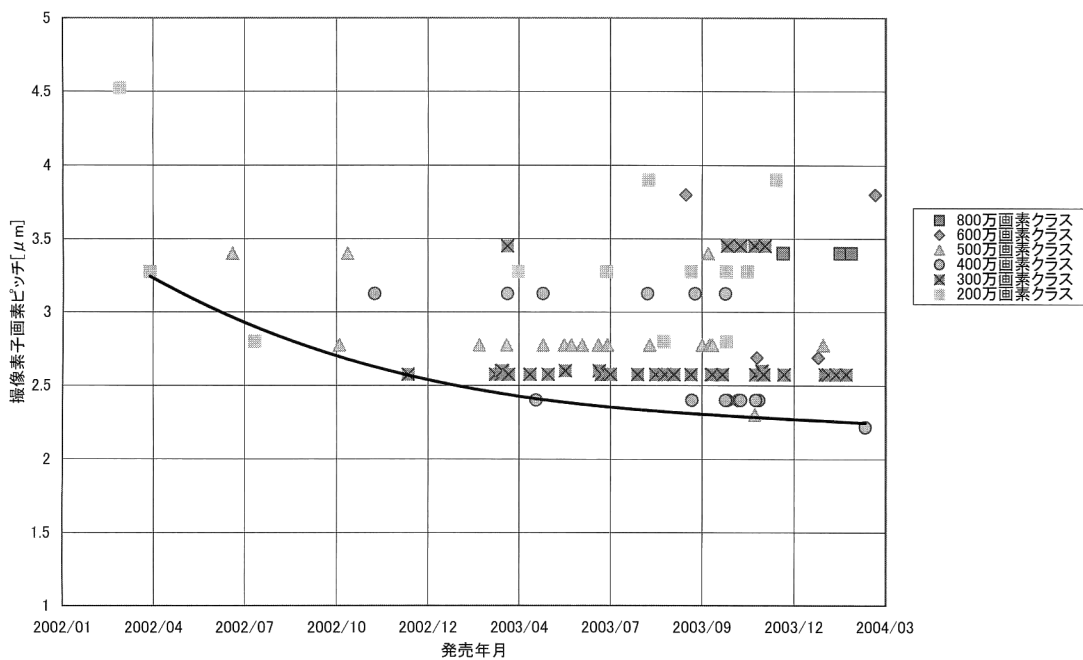


図4 コンパクトタイプデジタルカメラの発売日と画素ピッチ.

画素クラス～500万画素クラスは、ほぼ2種類のサイズのセンサーを使用していることがわかる。発売時期に入手可能な最小画素ピッチに近い撮像素子を採用している機種と、画質 (SNR) を求めて、あるいは、より初期にその画素数の機種を投入する目的で、大きい画素ピッチを採用している機種がある。

また、画素ピッチが縮小していくとともに悪化する傾向

にある SNR を改善するために、従来の垂直方向の電荷混合に加え、水平方向にも電荷混合できる CCD を富士フイルムほかが開発している¹⁾。

全体的な傾向として、最小画素ピッチは減少傾向を続けており、このまま $2\mu\text{m}$ ピッチに漸近するように推移していくものと思われる。

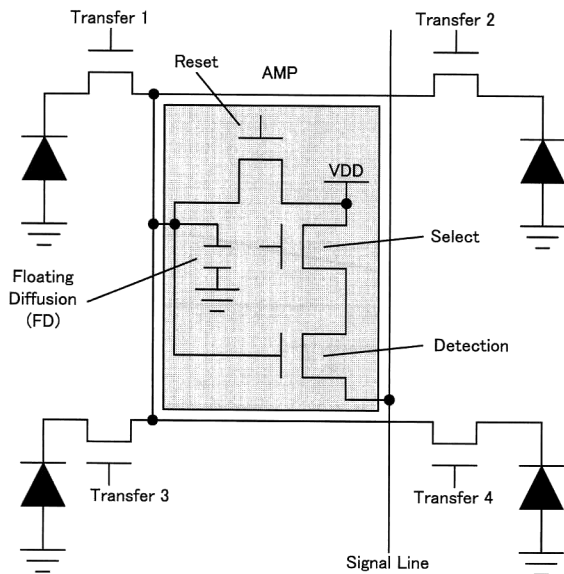


図5 1.75トランジスタ/素子CMOSの画素構造。

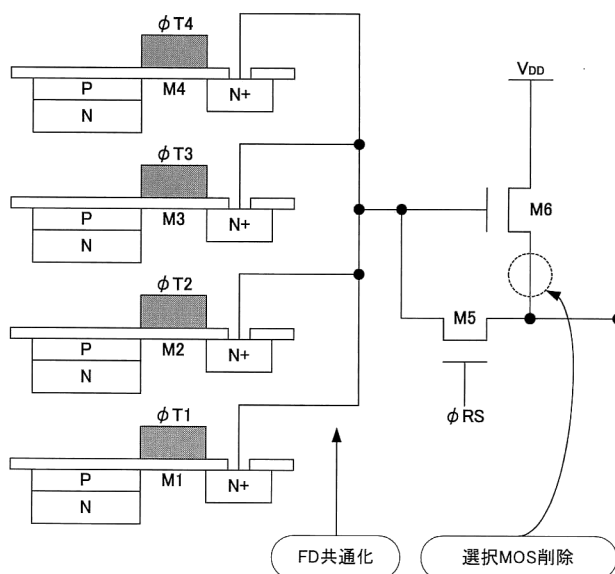


図6 1.5トランジスタ/素子CMOSの画素構造。

1.2 CMOSの微細化

CMOSは、撮像面を縮小しようとしても1画素あたり最低3トランジスタを配置しなくてはならないために、このトランジスタの微細化がネックとなり微細化が難しかった。しかし、最近相次いで、一部のトランジスタを共用することにより微細化を可能にしたCMOSが発表されている。

図5は、松下電器より発表のあった $2.25\mu\text{m}$ ピッチの画素構造を示したものである²⁾。4画素を1ユニットとし、4画素でフローティングディフュージョン（信号検出アンプ）回路を共用する4画素共有トランジスタ構造を実現することにより、 $2.25\mu\text{m}$ ピッチを実現した。4画素で7トランジスタ構成のため、1.75トランジスタ/画素となる。ここで“トランジスタ/画素”とは、CMOSの1画素あたりに使用するトランジスタの数である。また、この構造により、フォトダイオードの開口率も、従来構造では5%であったものを20%まで向上させている。

1画素あたりのトランジスタの削減については、このほかキヤノンよりも発表があり、こちらは前記構造では独立していたリセット部および選択部も共有化している³⁾。この構造を図6に示す。4画素で6トランジスタ構成のため、1.5トランジスタ/画素となる。ただし、こちらは使用したプロセスの制約から、 $3.9\mu\text{m}$ の画素ピッチにとどまっている。

CMOSは埋め込みフォトダイオード部などを除けば、一般的なダイナミックメモリー製作のプロセスを流用できることや、同一シリコン上に他の回路（ADコンバーター、ノイズキャンセル回路、タイミング・ジェネレーター、信

号処理など）を入れることができ、さらに低電圧単一電源で動作するなど、CCDに対して有利な点が多い。微細化と画質の向上が進めば、現在ほぼCCDが占めているデジタルカメラでも採用拡大が考えられる。

2. 撮像素子の高ダイナミックレンジ化

画素ピッチの縮小による多画素化（微細化）は、解像度向上や電子ズーム倍率向上などのメリットは大きい。しかし、このことは確実に、1つのフォトダイオード内に発生する電子数を減らし、結果としてSNRを劣化させる。このため、特に高感度時の画質劣化が問題となる。高解像度でありながらSNRが悪く、性能的にアンバランスと思えるデジタルカメラもある。

また、デジタルカメラで撮影された写真のうち、失敗写真を見てみると、ダイナミックレンジが不足することで失敗しているものが多いことに気づかされる。例えば、逆光シーンやハイコントラストシーンを撮影すると、明部は再現されるが暗部が再現されていない、あるいは逆に明部がとんでしまい再現されないという画像が記録されてしまうことがある。これは、撮影領域の輝度差が大きく、撮像素子のダイナミックレンジを超えてしまうことがおもな原因である。特にストロボを用いたシーンでは、主要被写体である人物などが白とびを起こすなど、不満も大きい。これら失敗写真は、撮像素子のダイナミックレンジが広がれば救えるものも多いと考えられる。

それに対するひとつの答えとして、富士写真フィルムは、広ダイナミックレンジ撮像が可能な撮像素子と、それを用いたデジタルカメラを提案している⁴⁾。

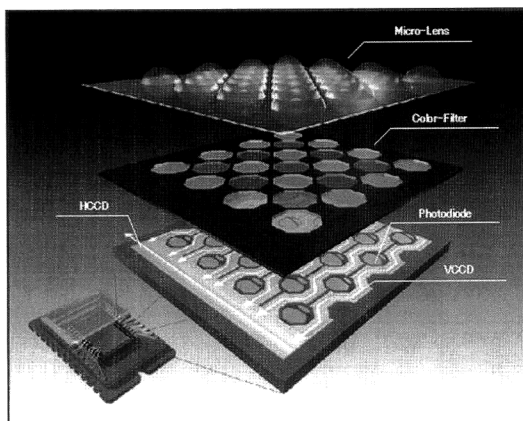


図7 広ダイナミックレンジ撮像可能な CCD の全体構造。

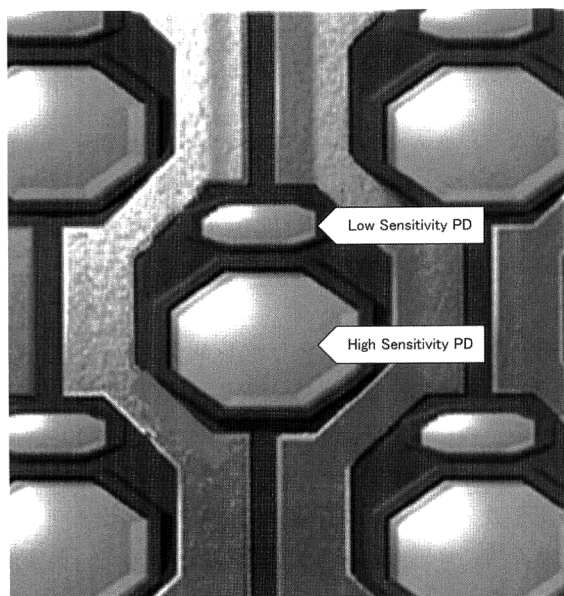


図8 高感度および低感度フォトダイオードの配置。

2.1 広ダイナミックレンジ撮像素子の構造

ダイナミックレンジを広げる手段のひとつとして、標準出力に対して十分な飽和出力を確保する方法がある。例えば、従来、撮像素子に対して3~4倍程度に高輝度側の再現域を広げようとする、当然ながら3~4倍の飽和出力を確保する必要があり、実現性に乏しくなっていた。かといって、標準出力を下げればSNRが劣化する。

それに対し、提案された CCD は、感度の異なる画素を用いることで広ダイナミックレンジを実現している。図7に、広ダイナミックレンジ撮像可能な CCD の全体構造を示す。最上部に配置されるマイクロレンズの下に RGB 原色カラーフィルターがあり、その下部に感度の異なる2つのフォトダイオードが独立に配置されている。このように、2つのフォトダイオードを1つのマイクロレンズ下に

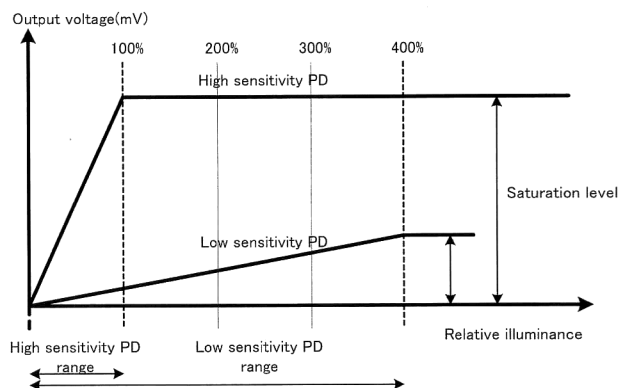


図9 2種類のフォトダイオードの光電変換特性。

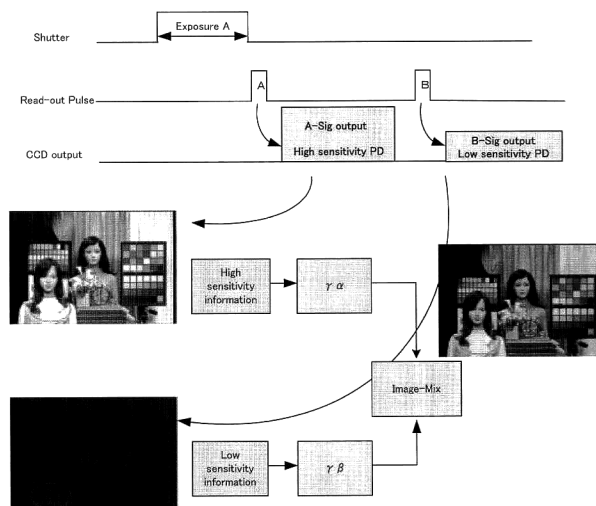


図10 2種類の信号読み出しタイミングと信号処理。

配置することで、同一画素位置で感度の異なる2つの画像情報が得られる。感度の差は、画素の受光面積を変えることで実現している。図8に、高感度および低感度フォトダイオードの配置を示している。受光面積の大きなフォトダイオードが高感度用として機能し、受光面積の小さなフォトダイオードが低感度用として機能する。高感度フォトダイオードが標準的なダイナミックレンジ部分を担当し、低感度フォトダイオードが標準以上のダイナミックレンジを担当する。

図9に、2種類のフォトダイオードの光電変換特性を示す。従来品に対して4倍以上のダイナミックレンジを得るために、高感度側のフォトダイオードに対して、低感度側のフォトダイオードの感度は約16分の1になるように設計されている。

飽和出力信号は、高感度フォトダイオードの飽和出力に対して、約4分の1の信号を低感度フォトダイオードが蓄積できるようになっている。低感度フォトダイオードに対

し、4分の1の飽和のフォトダイオードに16分の1の感度で電荷が蓄積されるため、結果として約4倍の明るさまでの情報を得ることが可能となる。

2.2 信号読み出しと合成方法

高感度フォトダイオードと低感度フォトダイオードは同時に露光されるが、読み出しは順次読み出しとなる。2つのフォトダイオードに蓄積された信号電荷は、まず高感度フォトダイオードが先に読み出され、その後低感度フォトダイオードを読み出すようになっている。

2つの信号は、アナログ信号処理を経て、図10に示すようにそれぞれ階調変換された後に合成される。合成された信号は、従来の再現域に対して、4倍のダイナミックレンジを確保できる。

これらの技術は製品に搭載され、ハイライト部分も白とびせず忠実に再現するほか、逆光などの条件でも自然な肌色を実現している。白とびや黒つぶれに強く、ネガフィルムに近づいた写真表現を実現可能にしている。

3. その他の撮像素子の動向

ここでは、上記の話題のほかに、最近の撮像素子の動向について述べる。

3.1 FIT-CCD

放送用カメラ向けとしてしか製品が発売されていなかったFIT (frame interline transfer)-CCD (受光部と転送路が分離しており、高速で受光部から蓄積部に電荷を転送するために、スミアと呼ばれる高輝度での縦引きノイズが少) であるが、シャープより、携帯電話向けとして採用したとの発表があった。

3.2 原色系四色カラーフィルター CCD

ソニーは、デジタルカメラ向けとして、四色(赤・緑・青+エメラルド)のカラーフィルターを搭載したCCDと、その信号処理システムを実用化した。従来の三原色(RGB)カラーフィルターCCDで撮影した画像よりも色再現の差を低減することができ、より自然な表現が可能という。

撮像素子の微細化と、高機能化の一環としての高ダイナミックレンジ撮像などについて紹介してきた。微細化の流れについては、今の流れを止めることはできないが、CCD、CMOS共通の壁として、画素ピッチ $2\mu\text{m}$ があるのではないかと考えている。また、デジタルカメラの差異化へのひとつの流れとして、高ダイナミックレンジ化や四色撮像などの多機能化も進んでいくと考えている。デジタルカメラはフィルムカメラよりはるかに多機能であるが、今後は、その多機能をいかにユーザーが簡単に使えるようになるかがキーであると思う。

文 献

- 1) 三沢岳志, 久保直基, 乾谷正史, 池田勝己, 藤沢 薫, 山田哲生: “30 fps VGA 相当動画読み出し対応 330 万画素 CCD イメージセンサとその応用”, ITE Tech. Rep., **26**, No. 26 (2002) 65-70.
- 2) 春日繁孝, 森 三佳, 勝野元成, 村田隆彦, 山口琢己: “1.75 トランジスター画素構成による 1/4 型 200 万画素 CMOS イメージセンサ”, ITE Tech. Rep., **28**, No. 23 (2004) 31-34.
- 3) 高橋秀和, 木下正邦, 森田一路, 白井誉浩, 佐藤俊明, 木村隆之, 譲原 浩, 井上俊輔: “1.5 トランジスター画素構成 10 bit デジタル出力 CMOS イメージセンサ”, ITE Tech. Rep., **28**, No. 23 (2004) 27-30.
- 4) 小田和也, 小林寛和, 竹村和彦, 竹内 豊, 山田哲生ほか: “広ダイナミックレンジ撮像素子の開発—第4世代スーパー CCD ハニカム—”, ITE Tech. Rep., **27**, No. 25 (2003) 17-20.

(2004年4月21日受理)