

# 横型オーバーフロー蓄積と電流読出し動作を組合せたダイナミックレンジ200dB超のCMOSイメージセンサ

An Over 200-dB Dynamic Range CMOS Image Sensor Combining a Lateral Overflow Integration with Photo-Current Readout Operation

学生会員 赤羽 奈々<sup>†</sup>, 井出 典子<sup>†</sup>, 足立 理<sup>††</sup>,  
溝 渕 孝 一<sup>††</sup>, 正会員 須川 成 利<sup>†</sup>

Nana Akahane<sup>†</sup>, Noriko Ide<sup>†</sup>, Satoru Adachi<sup>††</sup>, Koichi Mizobuchi<sup>††</sup> and Shigetoshi Sugawa<sup>†</sup>

**Abstract** A wide dynamic range  $64 \times 64$  CMOS image sensor with  $20 \times 20 \mu\text{m}^2$  pixel that combines a lateral overflow integration voltage-readout operation with the current readout operation from the buried photo-diode has been developed. In the voltage readout operation, an over 160-dB dynamic range image with a linear response is obtained from sequential electronic shutter operations from 1/30 s to 1/130 ks with a dynamic range of about 100-dB within a light intensity range from about  $10^{-2}\text{lx}$  to  $10^6\text{lx}$ . In addition, an over 200-dB dynamic range performance of up to  $10^8\text{lx}$  or more with few time exposures in the high illuminance region is made possible by combining it with the current reading operation. More than 40 dB for all noises, including photon shot noise, occurs around all the switching points.

キーワード: CMOSイメージセンサ, 広ダイナミックレンジ, 高S/N

## 1. ま え が き

高画質デジタルカメラ, 車載, 監視, 医療, FA, 科学計測などの分野へのイメージセンサの普及拡大に伴い, 高感度, 高S/N, 高解像度といったイメージセンサの基本性能に加え, 明暗の差が大きい条件の下でも良好な撮像が行える, 広ダイナミックレンジ性能を有するイメージセンサの実現が強く求められるようになってきた<sup>1)2)</sup>. こうした要求に応えるべく, 今までにさまざまな方法を用いた広ダイナミックレンジイメージセンサが提案されている<sup>3)4)</sup>. 例えば, 非線形応答のイメージセンサでは, MOSFETサブスレッショルド特性を用いた対数圧縮<sup>5)</sup>, 対数圧縮固定パターン雑音除去<sup>6)~8)</sup>, 対数圧縮信号の積分および固定パターン雑音除去<sup>9)10)</sup>, 蓄積電荷量可変繰返し積分<sup>11)</sup>などの方法が, また, 線形応答のイメージセンサでは, 長短2回露光<sup>12)</sup>, ローリングシャッタ長短2回露光<sup>13)14)</sup>, 時系列複数回露光<sup>15)16)</sup>, 非破壊読出し<sup>17)~21)</sup>, 感度の異なる複数のフォトダイオード

ド<sup>22)</sup>, 横型オーバーフロー電荷蓄積<sup>23)~29)</sup>などの方法が, さらに線形・非線形応答を組合せた方法<sup>30)~33)</sup>, などが提案されており, 概ね約140dB程度までのダイナミックレンジ性能が報告されている.

本論文では, 埋込み型フォトダイオードに隣接して飽和を超える光電荷を画素毎に蓄積する横型オーバーフロー容量を用いた電圧読出し動作と, フォトダイオードから光電流を増幅して読出す電流読出し動作を組合せた超広ダイナミックレンジCMOS撮像素子について論じる. これにより, 全撮像光量範囲において高S/N性能を有する超広ダイナミックレンジイメージセンサ技術を提供する. 本撮像素子は, 約 $10^{-2}\text{lx}$ から約 $10^8\text{lx}$ 超の光量範囲で200dB超の広ダイナミックレンジ性能を実現した. また, 横型オーバーフロー容量を用いる方法により, 1回の撮像で100dBの広ダイナミックレンジ性能を実現しているため, 少ない露光回数で光ショットノイズを含むすべてのノイズに対し, すべての低感度・高感度露光および蓄積時間の切替え動作点でS/N 40dB以上を確保した.

## 2. センサ構成と駆動方法

図1に, 本CMOSイメージセンサの画素と列等価回路を示す. 本画素回路は, 埋込み型フォトダイオード(PD), 転送MOSスイッチ(T), 電荷電圧変換をするフローティングディフュージョン(FD), 過飽和時にPDからあふれた光信

2006年7月31日受付, 2006年12月7日再受付, 2007年1月5日採録

<sup>†</sup> 東北大学 大学院 工学研究科

(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-11, TEL 022-795-4833)

<sup>††</sup> 日本テキサス・インスツルメンツ株式会社

(〒300-0496 茨城県稲敷郡美浦村木原2350, TEL 029-880-4066)

<sup>†</sup> Graduate School of Engineering, Tohoku University

(6-6-11 Aza-Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, 980-8579, Japan)

<sup>††</sup> Texas Instruments Japan

(2350 Kihara, Miho-mura, Inashiki-gun, Ibaraki, 300-0496, Japan)

号電荷を蓄積する容量 (CS), FDとCSの電氣的接続を制御するためのMOSスイッチ (S), FDとCSをリセットするスイッチ (R), ソースフォロア (SF), 行選択スイッチ (X), 列毎に配置される電流源 ( $I_{Vol}$ ) から構成される電圧読出し回路 (PD, T, FD, CS, S, R, SF, X,  $I_{Vol}$ ) と, PDに隣接して設置されるもう一つの転送MOSスイッチ ( $T'$ ), PD

に流れる光電流を電流増倍するカレントミラー素子 (CM1, CM2), リファレンス電流を流す素子 ( $I_{REF}$ ), 行選択スイッチ ( $X1'$ ) から構成される電流読出し回路 (画素回路部分: PD,  $T'$ , CM1, CM2,  $I_{REF}$ ,  $X1'$ ) から構成される. 列回路はカレントミラー素子 (CM3, CM4), ゲート接地素子 ( $X2'$ ), 対数変換素子 (LOG) から構成される電流読出し回路 (列回路部分: CM3, CM4,  $X2'$ , LOG) とノイズ除去回路 (詳細は後述) から構成される. 本撮像素子では, 電圧読出し回路は横型オーバーフロー容量を用いたCMOS撮像素子<sup>24)</sup>と同様であり, 高感度高S/N性能を維持しながら, PDからあふれた電荷を捨てずに蓄積して有効に活かすことにより, ダイナミックレンジの拡大を行う. PD, T, R, SF, Xは従来の高性能4トランジスタ型CMOS撮像素子と同様のものを用いており, 4トランジスタ型CMOS撮像素子に横型オーバーフロー容量CSとSの二つの素子の追加だけで, 広ダイナミックレンジ化を実現している. 電流読出し回路は光電流を電流増倍し対数電圧変換して読出す回路であり, 横型オーバーフロー容量を用いた広ダイナミックレンジCMOS撮像素子に電流読出し回路を追加することで, さらに高照度側へのダイナミックレンジ拡大を行う.

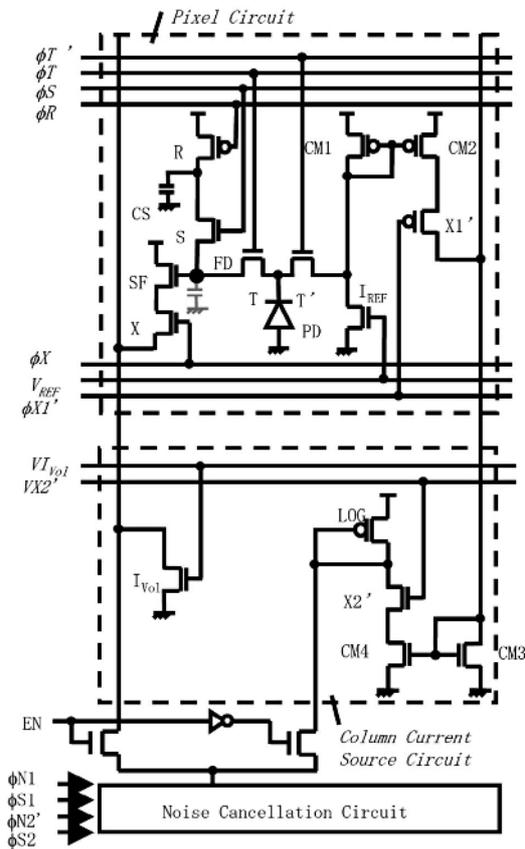


図1 画素回路と列回路

The schematic diagram of a pixel and a column current source circuit.

図2 (a) ~ 図2 (d) に電圧読出し動作, 図2 (e), 図2 (f) に電流読出し動作それぞれの駆動タイミング図と動作概念図を示す. 本動作は, 露光時間の異なる4回の電圧読出し動作 (露光時間: 1/30s, 1/500s, 1/8ks, 1/130ks) と1回の電流読出し動作がシーケンシャルに行われる. ここで, 露光時間の異なる4回の電圧読出し動作は, 複数回の露光を用いて広ダイナミックレンジ化を実現する概念<sup>15) 16)</sup>を, 横型オーバーフロー容量を用いた本広ダイナミックレンジ撮像素子に適用したものである. 最短露光時間 (1/130ks) 以外の電圧読出し動作は既報<sup>24)</sup>と同様の駆動タイミングおよび電子シャッター動作により行われる. その駆動タイミング図と

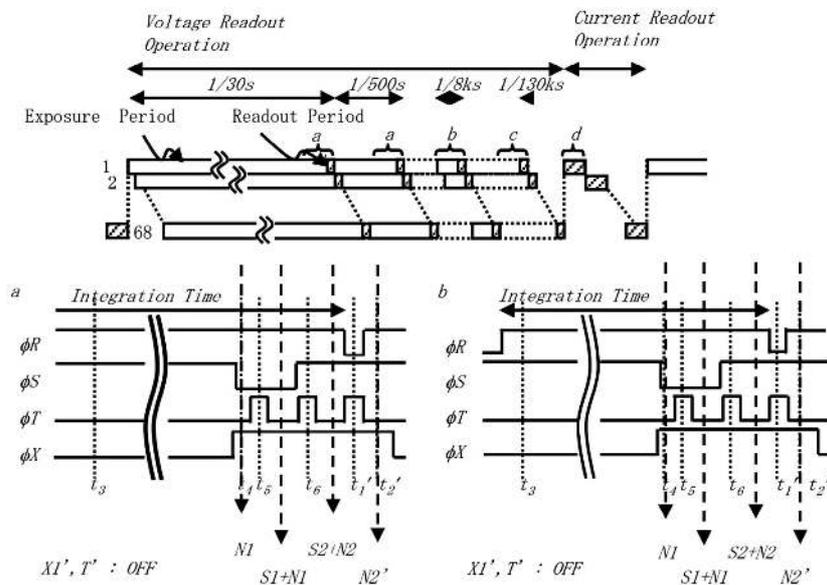


図2 (a) 電圧読出し動作: 駆動タイミング (1/30s~1/8ks)

The timing diagram of the voltage readout operation from 1/30s to 1/8ks integration.

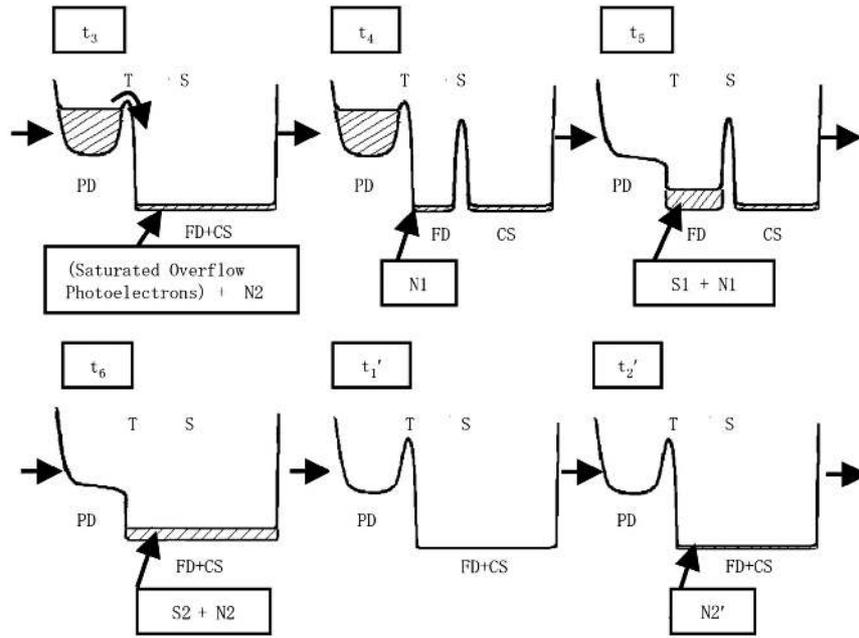


図2(b) 電圧読出し動作：ポテンシャル図 (1/30s~1/8ks)  
The potential diagram of the voltage readout operation from 1/30s to 1/8ks integration.

電子ポテンシャル図による動作概念図を図2(a), 図2(b)に示す。蓄積前に、FD+CSのリセットを行い( $t_1$ )、リセットスイッチRをOFFした直後の電位をFD+CSのリセットノイズN2として読出す( $t_2$ )。この際N2にはソースフォロアSFの閾値電圧ばらつきが固定パターンノイズ成分として含まれる。蓄積時間中( $t_3$ )において、飽和前の光電荷はPDで蓄積し、また飽和を超えた際の過剰光電荷はT、Sを介してFD+CSに蓄積する。この動作により、過飽和状態においてPDからあふれた電荷を捨てずに有効活用する。このとき、転送スイッチTの障壁高さは、TをOFFした状態においても、基板の電位障壁より数100mV程度低くなるため、PDからあふれた電荷は基板側よりも転送スイッチ側へ向かい、FD+CSに効率的に過剰電荷を蓄積することができる<sup>25) 26)</sup>。蓄積終了後( $t_4$ )、SをOFFし、FD+CSに蓄積された信号電荷(FD+CSのリセットノイズ(N2)と過剰電荷の混合信号の一部が含まれる)をFDとCSに分離し、FDに分配された信号をN1として読出す。次にTをONして( $t_5$ )、PDに蓄積された光信号電荷をFDへ完全転送し、信号S1+N1として読出す。次に、SをONして( $t_6$ )、PD、FD、CSに蓄積された信号電荷をFD+CSで混合し、S2+N2として読出す。この信号には、PDに蓄積された信号電荷とPDの過飽和状態においてFD+CSにあふれて蓄積された過剰電荷の混合信号である過飽和側信号S2と、蓄積開始直後に取り込まれたFD+CSのリセットノイズN2が含まれる。この電荷混合動作により、信号S2に対する暗電流と熱ノイズに対する許容度を向上させることができる<sup>25) 26)</sup>。次に、S、T、RをONして( $t_1'$ )、FDとCSのリセットを行い、RをOFFした直後に( $t_2'$ )、次フィールドのFD+CSのリセットノイズN2をN2'として読出す。この際N2'にはソースフォロアSFの閾値ばらつきが固定パターンノイズ成分として含

まれる。

最短露光時間における電圧読出し動作の駆動タイミングとポテンシャル図による動作概念図を図2(c), 図2(d)に示す。露光時間の異なる4回の電圧読出し動作のうち、最短露光時間(1/130ks)の電圧読出し動作と最短露光時間以外の三つの露光時間(1/30s, 1/500s, 1/8ks)の電圧読出し動作の違いは、転送スイッチTが常にONしていることと、蓄積時間が信号読出しとノイズ成分読出しの差により決定されることである。飽和前側の信号読出しの蓄積時間は、S1+N1の読出しとN1の読出しの時間差から3.9 $\mu$ sとなり、過飽和側の信号読出しによる蓄積時間は、S2+N2の読出しとN2'の読出し時間の差から7.8 $\mu$ sとなる。転送スイッチをON/OFFする時間を削減することにより、最短の露光時間を実現している。

本電圧読出し動作において、画素内から読出されるS1, S2に重畳されるランダムノイズ成分N1, N2は $C_{FD}$ ,  $C_{FD}+C_{CS}$ をリセットした時に発生するリセットノイズであり、それぞれ以下のように定義される。

$$V_{N1} = \sqrt{\frac{kT}{C_{FD}}}, Q_{N1} = \frac{\sqrt{kTC_{FD}}}{q} \quad (1)$$

$$V_{N2} = \sqrt{\frac{kT}{C_{FD}+C_{CS}}}, Q_{N2} = \frac{\sqrt{kT(C_{FD}+C_{CS})}}{q} \quad (2)$$

ノイズ除去演算(S1+N1) - N1および(S2+N2) - N2'はチップ内に設けられたノイズ除去回路(図1のNoise Cancellation Circuit)で行う。飽和前側信号においては、固定パターンノイズ(FPN)となる画素ソースフォロアの閾値電圧ばらつきとともに、このリセットノイズ成分N1が除去される。過飽和側信号においては、固定パターンノイ

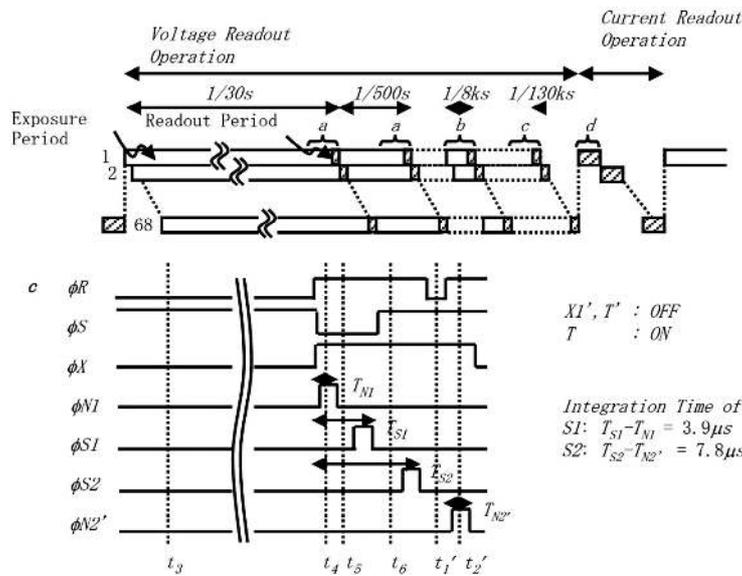


図2(c) 電圧読出し動作：駆動タイミング (1/130ks)

The timing diagram of the voltage readout operation for 1/130ks integration.

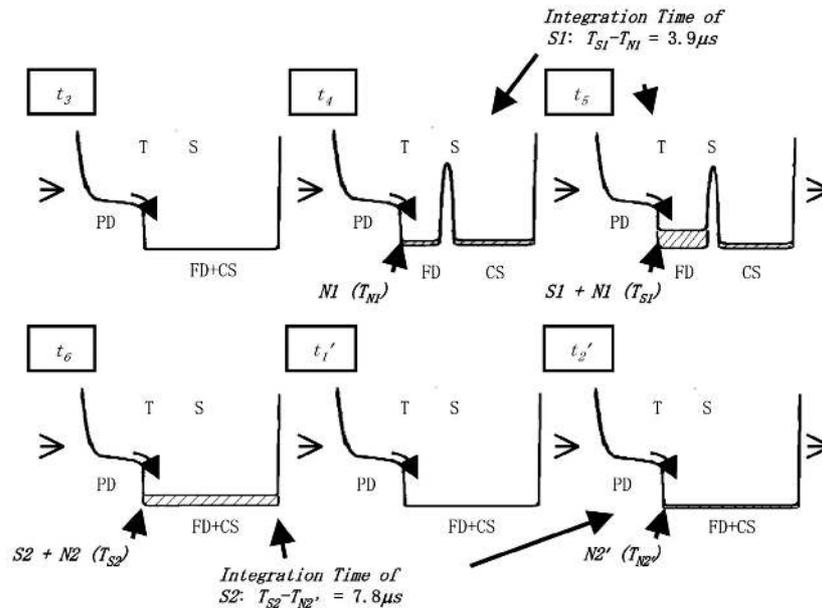


図2(d) 電圧読出し動作：ポテンシャル図 (1/130ks)

The potential diagram of the voltage readout operation for 1/130ks integration.

ズとなる画素ソースフォロアの閾値電圧ばらつきは除去されるが、次フレームのN2 (N2') との差分をとるため、N2 の $\sqrt{2}$  倍のノイズ $V_{N2}'$  が残留する。

$$V_{N2}' = \sqrt{\frac{2kT}{C_{FD} + C_{CS}}}, Q_{N2}' = \frac{\sqrt{2kT(C_{FD} + C_{CS})}}{q} \quad (3)$$

ノイズ除去演算後の飽和前側信号S1と過飽和側信号S2は、予め設定した基準参照電圧と比較してどちらを使用するかを選択し、画像信号を再現する。これにより低照度から高照度までリニアな信号でダイナミックレンジ拡大を実現する。

電流読出し動作は、リファレンス電流読出しとリファレンス電流+信号電流読出しの2フェーズからなる。図2(e),

図2(f) に電流読出し動作の駆動タイミング図と動作概念図を示す。リファレンス電流読出しは、R, S, T, X1' を ON, T', X を OFF にセットし ( $t_{11}$ ),  $I_{REF}$  のゲートに定電圧  $V_{REF}$  を印加してリファレンス電流を流した状態で行う。このリファレンス電流を画素内および列のカレントミラー回路で増倍した後に対数電圧変換し、基準電圧  $N_i$  として読出す。次に、R, S, T を OFF, T' を ON し ( $t_{21}$ ), 光強度に応じた PD 光電流およびリファレンス電流を同経路から読出し、信号電圧+リファレンス電圧  $S_i + N_i$  として読出す。

画素・列に設けられたカレントミラー回路によりリファレンス電流が  $a$  倍電流増倍されたとすると、リファレンス電流  $I_{REF}$  を流した時の電圧信号  $V_{N_i}$ , 信号電流+リファレンス電流 ( $I_S + I_{REF}$ ) を流した時の電圧信号  $V_{S_i + N_i}$  は次式で表さ

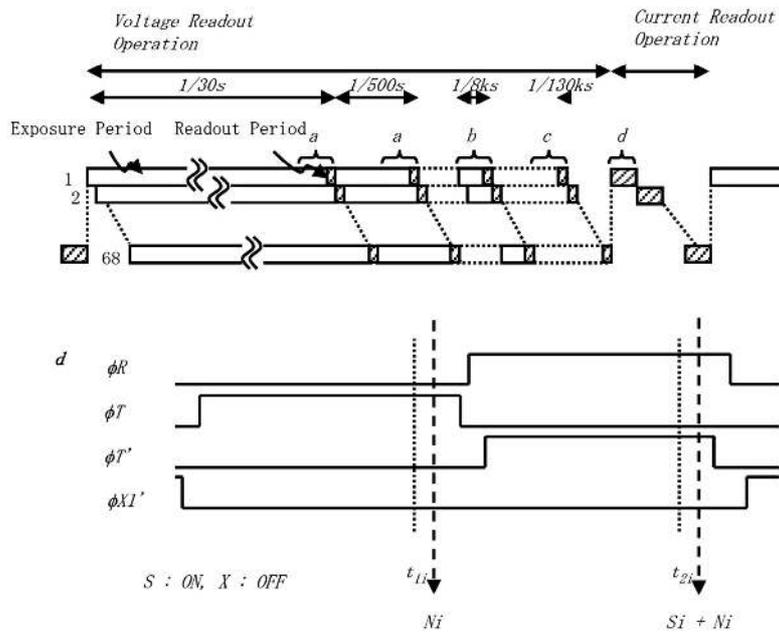


図2 (e) 電流読出し動作：駆動タイミング  
The timing diagram of the current readout operation.

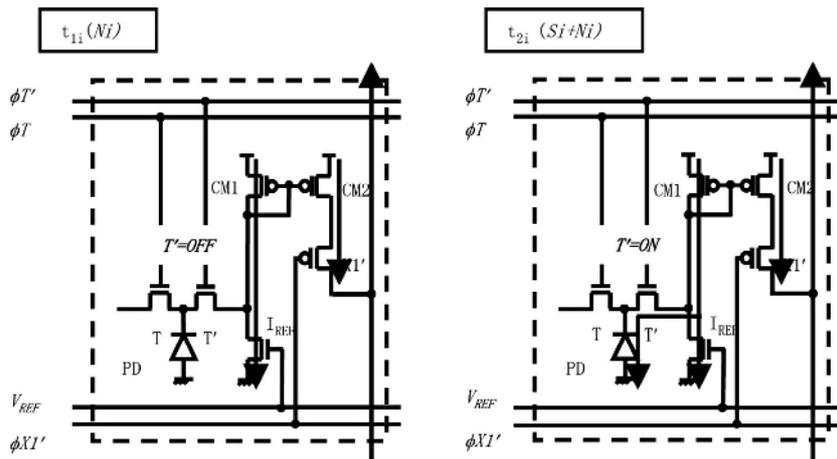


図2 (f) 電流読出し動作：動作概念図  
The current readout operation.

れる。

$$V_{Ni} = \log \alpha I_{REF} \quad (4)$$

$$V_{Si+Ni} = \log \alpha (I_S + I_{REF}) \quad (5)$$

この $N_i$ ,  $S_i + N_i$ は電圧読出しと同じノイズ除去回路(図1のNoise Cancellation Circuit)を使用してノイズ差し引きを行い、光信号 $S_i$ を読出す。ノイズ除去後の信号電圧 $V_{S_i}$ は次式で表される。

$$V_{S_i} = \log \left( \frac{I_S}{I_{REF}} + 1 \right) \quad (6)$$

リファレンス電流、信号+リファレンス電流の読出しを同じ回路系をとおして行うので、電流読出し動作においても画素・列のオフセットばらつきを補償した信号読出しが

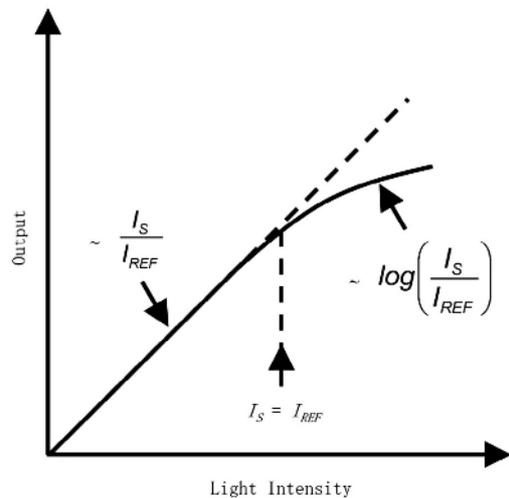


図3 電流読出し動作の光電変換特性模式図  
The simple form for the photoelectric conversion characteristics of the current readout operation.

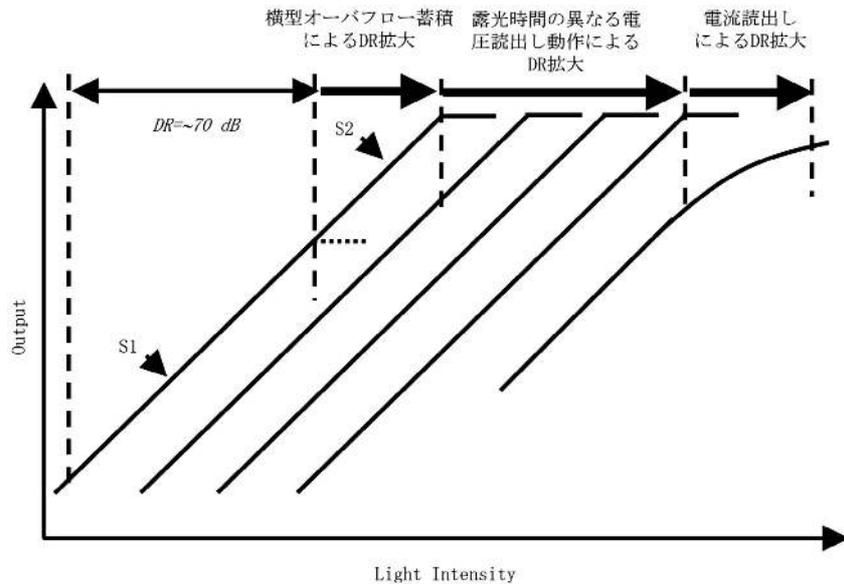


図4 ダイナミックレンジ拡大方法  
The dynamic range expansion.

行える。

電流読出し動作による信号 $V_{Si}$ は、マクローリン展開により、光電流信号 $I_S$ とリファレンス電流 $I_{REF}$ との関係から次のようになる。

$$V_{Si} = \begin{cases} \log\left(\frac{I_S}{I_{REF}}\right) & \left(\frac{I_S}{I_{REF}} \gg 1\right) \\ \frac{I_S}{I_{REF}} & \left(\frac{I_S}{I_{REF}} \ll 1\right) \end{cases} \quad (7)$$

図3には、電流読出し動作による信号 $S_i$ の光電変換特性を模式的に表している。リファレンス電流 $I_{REF}$ よりも光電流量が小さい低照度領域ではリニアな信号が得られ、 $I_{REF}$ よりも光電流量が大きい高照度領域では対数応答が得られる。

### 3. ダイナミックレンジ拡大と高 $S/N$ 信号切替え方法

図4に、ダイナミックレンジ拡大方法模式図を示す。本撮像素子は、横型オーバーフロー蓄積容量を用いるものと、露光時間の異なる電圧読出し動作と電流読出し動作を組合せることにより、ダイナミックレンジ拡大を実現する。

横型オーバーフロー蓄積容量を用いたダイナミックレンジは、 $S_1$ 暗時雑音信号に対応する光量と $S_2$ の飽和時に対応する光量との比で定義され、概略、次式のように表される。

$$DR = \frac{Q_{sat}}{Q_\eta} \cdot \frac{C_{FD} + C_{CS}}{C_{FD}} \quad (8)$$

また、露光時間の異なる電圧読出し動作によるダイナミックレンジは、低照度側の長時間露光の暗時雑音信号に対応する光量と高照度側の短時間露光の飽和時に対応する光量の比で定義され、概略、次式のように表される。

$$DR = \frac{Q_{sat}}{Q_\eta} \cdot \frac{t_{int}^{max}}{t_{int}^{min}} \quad (9)$$

さらに、電流読出しによるダイナミックレンジは、暗時雑音信号に対応する光量と飽和時に対応する光量の比で定義され、概略、次式のように表される。

$$DR = \frac{I_{sat}}{I_\eta} \quad (10)$$

ここで、 $Q_{sat}$ は一回の露光における飽和電荷量、 $Q_\eta$ は暗時雑音電荷量、 $C_{FD}$ はフローティングデフュージョン容量( $S_1$ の感度を決める)、 $C_{CS}$ は横型オーバーフロー容量( $S_2$ の感度を決める)、 $t_{int}^{max}$ は最長露光時間、 $t_{int}^{min}$ は最短露光時間、 $I_{sat}$ は飽和電流量、 $I_\eta$ は暗時雑音電流量である。

これらを組合せると、横型オーバーフロー蓄積+露光時間の異なる電圧読出し動作+電流読出しによるダイナミックレンジは、次式のようにあらわされる。

$$DR = \frac{Q_{sat}}{Q_\eta} \cdot \frac{C_{FD} + C_{CS}}{C_{FD}} \cdot \frac{t_{int}^{max}}{t_{int}^{min}} \cdot \frac{I_{sat}}{I_{SL}} \quad (11)$$

ここで、 $I_{SL}$ は電圧読出し動作と電流読出し動作の切替え点における電流量である。横型オーバーフロー蓄積容量を用いる方法を基盤に、露光時間の異なる電圧読出し動作・電流読出し動作を行うことで、高感度・高 $S/N$ 性能を維持しながらダイナミックレンジ拡大を行う。

次に、高 $S/N$ 性能を維持するための信号切替え方法について論じる。図5に、複数回の電圧読出し動作と1回の電流読出し動作において、すべての信号切替え点で40dB以上の高 $S/N$ 性能を保ちながら広ダイナミックレンジ信号を得るための信号切替え方法を示す。図5(a)は、1回の電圧読出し動作で100dB超の広ダイナミックレンジ性能を有する電

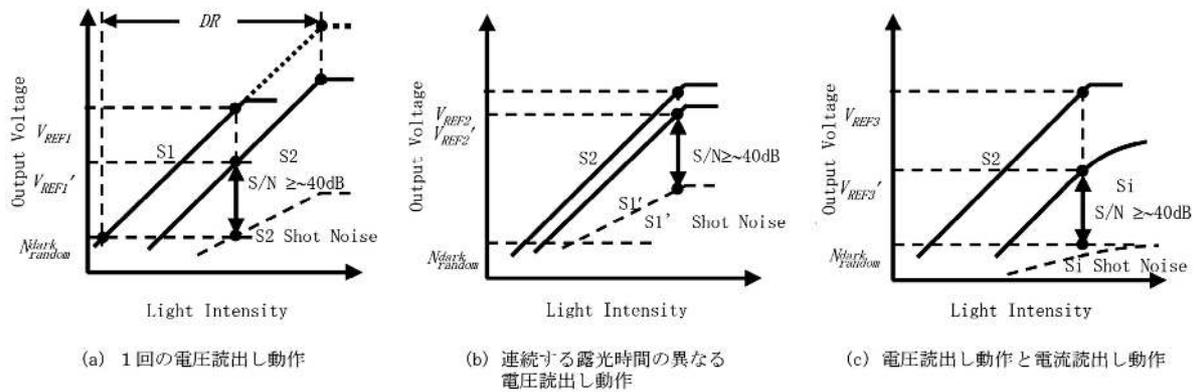


図5 高S/N信号切替え方法

The signal switching method for high S/N ratio (a) in one voltage readout operation. (b) between two voltage readout operation. (c) between voltage readout operation and current readout operation.

圧読出し動作における飽和前側信号S1と過飽和側信号S2の切替え方法である。S/Nは、S1/S2切替え点で低下するため、S1/S2切替え点でのS/N  $SN_{SL1}$ を十分に高く確保されるように切替え点を決めることが求められる。

1回の電圧読出し動作において、飽和前側信号S1は基準電圧 $V_{REF1}$ との比較を行い、 $V_{REF1}$ よりも飽和前側信号S1が小さい場合は飽和前側信号S1、 $V_{REF1}$ よりも飽和前側信号S1が大きい場合は過飽和側信号S2を選択する。基準電圧 $V_{REF1}$ は、飽和前側信号S1の飽和電圧ばらつきの影響を受けないよう、S1信号の飽和電圧よりも少し小さい値に設定する。このとき、 $SN_{SL1}$ は、FD+CSで電荷電圧変換したときのS1/S2切替え点でのS2信号を $V_{REF1}'$ とすると、以下の式で表される。

$$SN_{SL1} = \frac{V_{REF1}'}{\sqrt{(V_{N2}')^2 + (V_{shotnoise}^{SL1})^2}} \quad (12)$$

ここで、S1信号の切替え基準電圧を $V_{REF1}$ 、ノイズ除去後の残留ノイズ電荷を $Q_\eta$ 、切替え点における信号電荷数を $Q_S^{SL1}$ とすると、S2信号の切替え基準電圧 $V_{REF1}'$ 、 $(S2+N2) - N2'$ のノイズ補正を行った場合のS2信号における残留ノイズ電圧 $V_{N2}'$ 、切替え点における光ショットノイズ電圧(FD+CSで電荷電圧変換) $V_{shotnoise}^{SL1}$ は、次のように表される。

$$V_{REF1}' = \frac{C_{FD}}{C_{FD} + C_{CS}} \cdot V_{REF} \quad (13)$$

$$V_{N2}' = \frac{\sqrt{2kT(C_{FD} + C_{CS}) + (qQ_\eta)^2}}{C_{FD} + C_{CS}} \quad (14)$$

$$V_{shotnoise}^{SL1} = \frac{q\sqrt{Q_S^{SL1}}}{C_{FD} + C_{CS}} \quad (15)$$

$SN_{SL1} \geq 40\text{dB}$ となるよう動作点を選ぶようにすることで、S1/S2のつなぎ目においてもノイズ感が目立たない高画質な画像を得ることができる。

図5 (b) は、連続する露光時間の異なる電圧読出し動作における長蓄積動作の過飽和側信号S2と短蓄積動作の飽和前側信号S1'の切替え方法である。

連続する露光時間の異なる電圧読出し動作切替えは、長蓄積動作の電圧読出し動作の過飽和側信号S2と基準電圧 $V_{REF2}$ との比較によって行われる。 $V_{REF2}$ よりもS2信号が小さい場合には、長蓄積動作の電圧読出し動作のS2信号を選択し、S2信号が大きい場合には短蓄積動作の電圧読出し動作の飽和前側信号S1'を選択する。 $V_{REF2}$ は、S2の飽和電圧よりも低い値に設定され、S1'信号において、S2/S1'切替え点で40dB以上のS/N性能を確保するよう設定される。これにより、連続する露光時間の異なる電圧読出し動作のつなぎ目においてもノイズ感の目立たない高画質な画像を得ることができる。このとき、S2/S1'切替え点のS/N  $SN_{SL2}$ は、FD+CS容量で電荷電圧変換したときのS2/S1'切替え点でのS1'信号電圧を $V_{REF2}'$ とすると、以下の式で表される。

$$SN_{SL2} = \frac{V_{REF2}'}{\sqrt{(V_\eta)^2 + (V_{shotnoise}^{SL2})^2}} \quad (16)$$

ここで、切替え点における信号電荷数を $Q_S^{SL2}$ 、 $(S1+N1) - N1$ のノイズ補正を行った後にS1信号に残留するノイズ電圧 $V_\eta$ とすると、切替え点における光ショットノイズ電圧(FD+CSで電荷電圧変換) $V_{shotnoise}^{SL2}$ は、次のように表される。

$$V_\eta = \frac{qQ_\eta}{C_{FD} + C_{CS}} \quad (17)$$

$$V_{shotnoise}^{SL2} = \frac{q\sqrt{Q_S^{SL2}}}{C_{FD} + C_{CS}} \quad (18)$$

このようにして4回の電圧読出し動作で160dB超の高S/N広ダイナミックレンジ信号を実現する。

図5 (c) は、本動作中、最短露光時間の電圧読出し動作における過飽和側信号S2と電流読出し動作における信号Siとの切替え方法であり、4回の電圧読出し動作と1回の電流読

出し動作で総合して200dB超の高S/N広ダイナミックレンジ信号を実現する。Si信号におけるS/Nは、センサチップ出力後の信号処理回路で発生するノイズで決まっており、S2/Si切替え点でのS/N  $SN_{SL3}$ は40dB以上のS/Nを確保するように切替え点を決めることで、電圧読出し動作と電流読出し動作のつなぎ目においてもノイズ感のない高画質な画像を得ることができる。

最短露光時間電圧読出し動作と電流読出し動作の切替えは、電圧読出し動作の過飽和側信号S2と基準電圧 $V_{REF3}$ との比較により、 $V_{REF3}$ よりもS2信号が小さい場合は、最短露光時間電圧読出し動作の過飽和側信号S2を選択し、S2信号が大きい場合は電流読出し信号Siを選択する。 $V_{REF3}$ はS2の飽和電圧よりも低い値に設定し、Si信号においてS2/Si切替え点で40dB以上のS/Nを確保するよう設定する。このとき、S2/Si切替え点のS/N  $SN_{SL3}$ は、FD+CSで電荷電圧変換したときのS2/Si切替え点でのSi信号電圧を $V_{REF3}'$ とすると、以下の式で表される。

$$SN_{SL3} = \frac{V_{REF3}'}{\sqrt{(V_{ni})^2 + (V_{shotnoise}^{SL3})^2}} \quad (19)$$

ここで、 $V_{ni}$ はセンサチップ出力後の信号処理回路で発生するノイズ電圧、 $V_{shotnoise}^{SL3}$ は電流読出し動作における光電流ショットノイズである。

本CMOSイメージセンサの撮像は、レンズ絞りを固定したまま、露光時間を変えた4回のローリング電子シャッタ電圧読出し動作と1回の電流読出し動作を時系列的に組み合わせることで行う。1回の電圧読出し動作で100dBを超えるダイナミックレンジの撮像が行なえることにより、約 $10^{-2}lx$ から約 $10^6lx$ までの数回の電圧読出し動作と、約 $10^6lx$ から $10^8lx$ を超える高照度領域における電流読出し動作におけるすべての切替え点において高S/N性能を確保することができる<sup>36) 37)</sup>。

#### 4. 試作結果

0.35 $\mu$ m 2P3M CMOS技術を用いて本CMOSイメージセンサのチップ試作を行った。PDはシリコン表面をp+層で覆ったPN型埋込みフォトダイオードを用い、蓄積容量CSの形成にあたっては、PN接合容量より面積効率が一桁以上高い、プレナーMOS容量と2層ポリシリコン間容量を積層した並列容量構造を用いた。図6に、回路ブロック図とチップ写真、チップブロック図を示す。レンズ絞りを固定した低価格な光学系と簡易な制御系による動作を可能にするために、画素サイズは20 $\mu$ m角、画素数は有効64 $\times$ 64、基本動作クロックは5MHzとした。

図7に、本イメージセンサの光電変換特性を示す。電圧読出し動作における電子シャッタスピードは、1/30s、1/500s、1/8ks、1/130ksと約1/16倍ずつ変化させている。図7(a)は、入力換算後の全出力信号の光電変換特性であり、図7(b)は、AD変換後のS1、S2信号を合成したデジタル

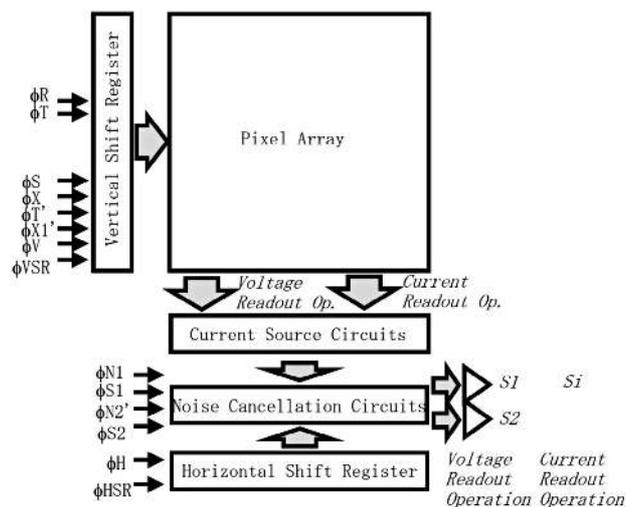


図6(a) 回路ブロック図  
The block diagram of the image sensor.

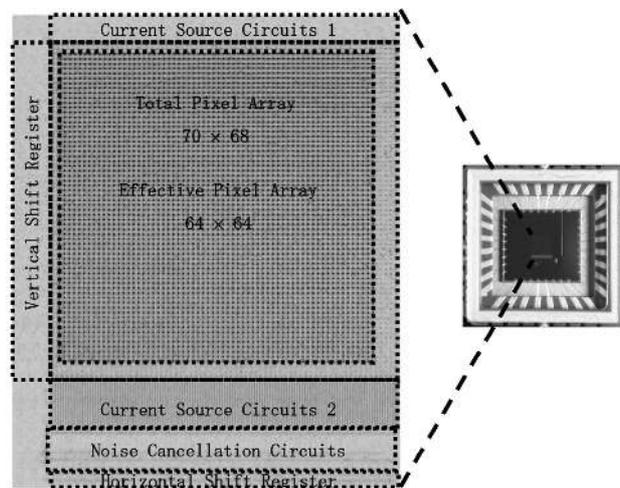


図6(b) チップ写真とチップブロック図  
The chip micrograph and chip block diagram.

信号の光電変換特性である。電圧読出し動作により、四つの露光時間によって、約 $10^{-2}lx$ から約 $10^6lx$ の光量範囲で良好な線形性が得られ、160dBを超えるダイナミックレンジ性能が実現できていることがわかる。電流読出し動作では、約 $10^5lx$ から約 $10^8lx$ まで良好な光電変換特性が得られており、電圧読出し動作と合わせて200dBを超えるダイナミックレンジ性能が得られていることがわかる。

図8に、約 $10^{-2}lx$ から約 $10^8lx$ の全光量範囲でのS/N特性を示す。電圧読出し動作におけるS/N特性は、約 $10^{-1}lx$ 以下では(S1+N1) - N1のノイズ除去後に残留する暗時ランダムノイズ、約 $10^{-1}lx$ 以上では、光ショットノイズによって決まる。電流読出し動作におけるノイズ成分は、センサチップ後の信号処理回路で発生しており、S/N特性はさらに改善するものと考えられる。すべての切替え点で40dB以上の高S/N性能を実現できていることがわかる。本撮像素子では、新たに設けた別容量(横型オーバフロー容量)に過剰電荷を蓄積して飽和電荷量を増やす、という方法で高感度を維持しながらダイナミックレンジ拡大を実現しており、

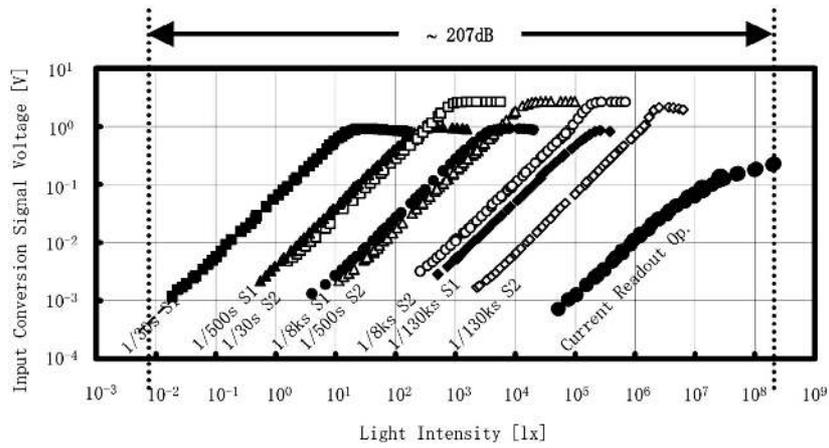


図7 (a) 光電変換特性

The photoelectric conversion characteristics.

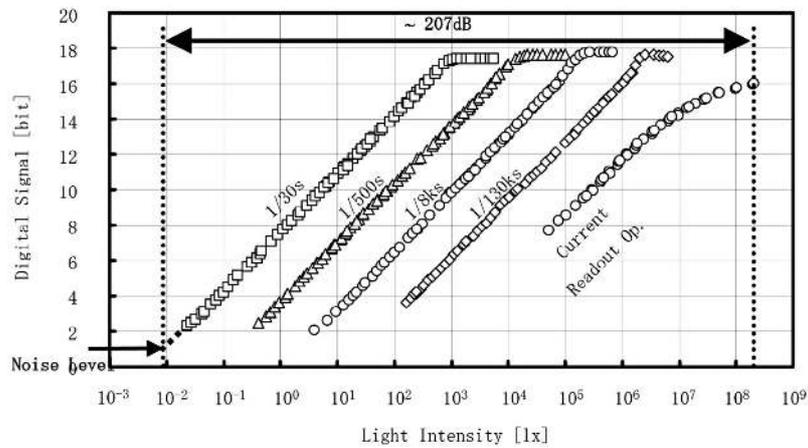


図7 (b) 電圧読出し動作S1/S2合成後の光電変換特性

The photoelectric conversion characteristics using the 100 dB synthesized data in each integration time of the voltage readout operation.

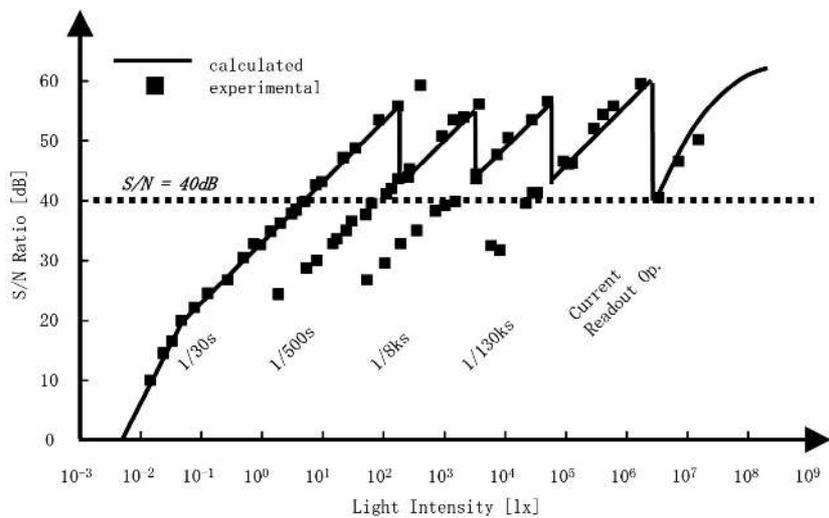


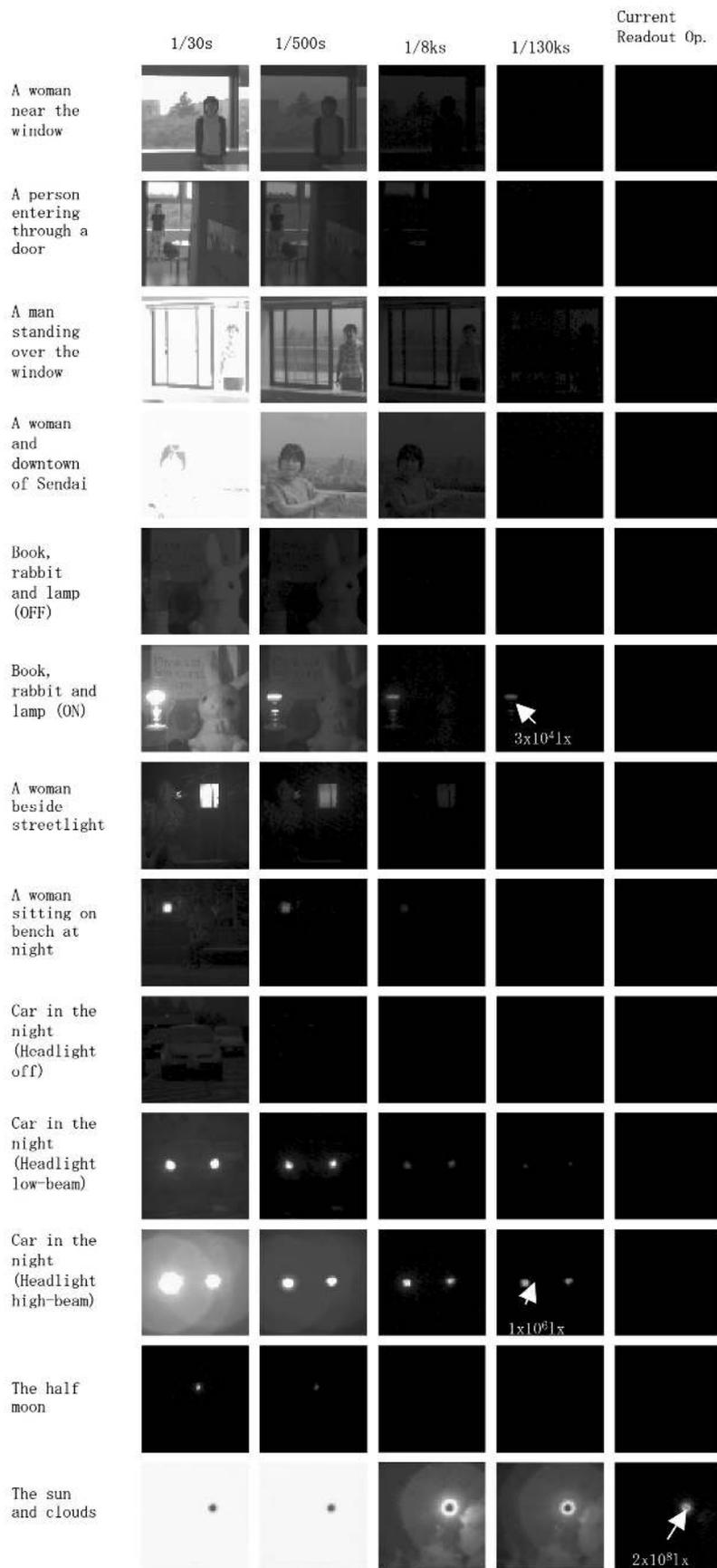
図8 S/N特性

The S/N ratio.

S1/S2の切替え点でS/N 40dB以上(信号電荷数1万個以上)を確保するように切替えを行っても、S2信号に切替えることができるため、S2信号分のダイナミックレンジ拡大が得られ、露光時間の異なる電圧読出し動作を行った場合にす

べての切替え点でS/N 40dB以上を確保してもダイナミックレンジ拡大をしながら高S/Nな信号切替えを実現することができる。

図9に撮像例を示す。図9 (a) の撮像例においては、時系



F#1.4, f=6mm,  $\gamma=0.20$  (Voltage Readout Op.),  $\gamma=0.45$  (Current Readout Op.)

図9 (a) 蓄積時間毎 (DR $\approx$ 100dB) の電圧読出し画像と電流読出し画像

The image for each integration times (DR $\approx$ 100 dB) of the voltage readout operation and the image of the current readout operation.

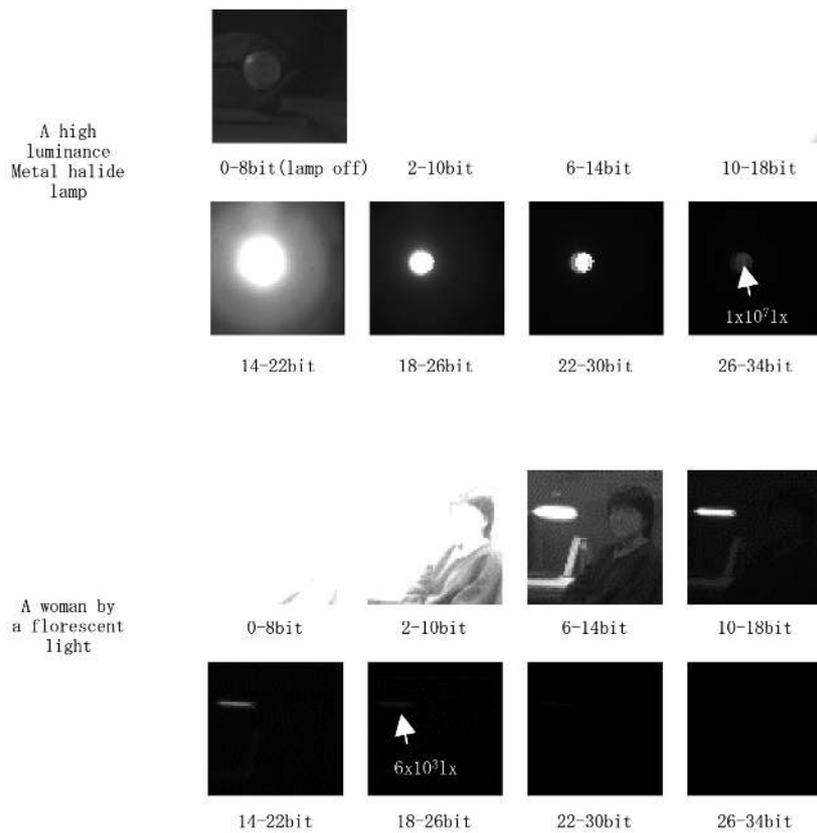


図9 (b) DR 200dB超の合成画像  
The 200 dB synthesized image.

列的に撮像した1/30s蓄積, 1/500s蓄積, 1/8ks蓄積, 1/130ks蓄積の電圧読出し動作4画面と電流読出し動作1画面の計5画面である。印刷の都合上, 電圧読出し動作の撮像例に関しては, それぞれ100dBのダイナミックレンジ, 16ビット長の画像に,  $\gamma \approx 0.20$ をかけ, 8ビットに圧縮して表示している。電流読出し動作では,  $\gamma \approx 0.45$ をかけ, 8ビット長画像として表示している。レンズ絞り値はF1.4に固定している。三日月や夜間でヘッドライトをオフにした状態での車の撮像, また暗室においたぬいぐるみ, 本, 非点灯の電球を撮像したものから, ヘッドライトをハイビームにしたときの車の撮像, さらに太陽を直接撮像した場合まで, 約 $10^{-2}lx$ から $10^8lx$ を超えるまでのさまざまな光量条件の中で良好な撮像を行えていることがわかる。図9 (b)の撮像例においては, 画像を200dBのダイナミックレンジの1枚の画像信号(約34ビット長)に合成し, 0ビットから34ビットまでの画像データのうち8ビットの画像を切出して, 2~4ビットずつシフトさせて表示している。レンズ絞り値はF1.4に固定している。どの画像においても, 信号切替え点のつなぎ目にノイズ感がなく, 高S/Nな信号切替えができており, 約 $10^{-2}lx$ から約 $10^8lx$ までの光量範囲を持つ200dB超の高画質な画像が1枚の絵として合成できていることがわかる。

表1に, 主な仕様と特性を示す。ランダムノイズおよびFPNは入力換算で $0.3mV_{rms}$ と良好な値が得られている。ダイサイズは2.6mm角である。

表1 仕様と特性

The summary of the image sensor performance.

Chip Size		2.6 x 2.6 mm <sup>2</sup>	
Process technology		0.35μm 2P3M CMOS	
Pixel size		20 x 20 μm <sup>2</sup>	
Number of pixels	Effective	64 x 64	
	Total	70 x 68	
Random noise (Input conversion noise)		0.30 mV <sub>rms</sub>	
FPN (Input conversion noise)		0.30 mV <sub>rms</sub>	
Dynamic Range	Voltage Readout Op.	1/30s	~ 100dB ( $9.0 \times 10^{-3}$ - $9.3 \times 10^2$ lx)
		1/30s to 1/500s	~ 126dB ( $9.0 \times 10^{-3}$ - $1.9 \times 10^4$ lx)
		1/30s to 1/8ks	~ 148dB ( $9.0 \times 10^{-3}$ - $2.2 \times 10^5$ lx)
		1/30s to 1/130ks	~ 169dB ( $9.0 \times 10^{-3}$ - $2.5 \times 10^6$ lx)
	Voltage Readout Op. & Current Readout Op.		~ 207dB ( $9.0 \times 10^{-3}$ - $2.0 \times 10^8$ lx)
S/N ratio @Signal switching point		≥ 40 dB	

## 5. 考 察

夜間のヘッドライトオフ時の車から, 太陽を直接撮像した場合まで, 約200dBのダイナミックレンジを持つ光電変換特性が得られたが, レンズのフレアの影響により, 明る

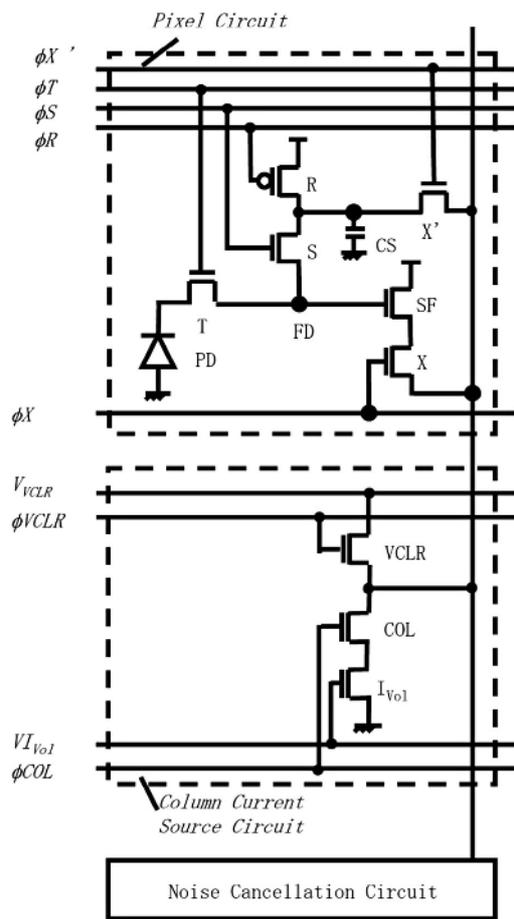


図10 新リニア応答200 dB超撮像素子

A novel image sensor with linear responses and an over 200 dB dynamic range.

い被写体に隣接した暗い被写体を撮像することができなかった。レンズの改善も重要である。今回は、実験的には照度 $2 \times 10^8 \text{lx}$ の太陽の撮像まで実証したが、設計上は約230dB程度まで、ダイナミックレンジ拡大が可能である。センサ出力としては、後段の処理を考えれば非線形応答よりも、すべて線形応答で出力が行われることがよい場合がある。例えば、図10に示すように、容量CSと垂直出力線の間光電流読出し用スイッチを挿入した横型オーバーフロー積分容量CMOSイメージセンサにより、200dB超のダイナミックレンジを持ち、全光量範囲でリニアな応答をもつ撮像素子を提供することも可能である。これまで、画素・列に設置されていたカレントミラーと列に設置されていた対数変換素子を、スイッチ一つに置き換え、列に設けられたノイズ除去回路内部の容量で光電流を直接積分することにより、全光量範囲でリニアな応答を維持しながら、ダイナミックレンジ200dB超を実現する。画素内、列内に設けていたカレントミラー、また対数変換素子がスイッチ一つに置き換わるため、大幅な画素サイズ・列回路サイズ縮小が期待される。

## 6. む す び

埋込み型フォトダイオードに隣接して飽和を超える光電

荷を画素毎に蓄積する横型オーバーフロー蓄積容量を用いた電圧読出し動作と、フォトダイオードから光電流を増幅して読出す電流読出し動作を行う、広ダイナミックレンジCMOS撮像素子を開発し、照射光量範囲約 $10^{-2} \text{lx}$ から約 $10^8 \text{lx}$ においてレンズ絞りをを用いることなしに200dBを超えるダイナミックレンジ撮像が行えており、すべての切替点で光ショットノイズを含むすべてのノイズ成分に対して40dB以上の高S/N性能を維持していることを確認した。さらに、究極に必要なダイナミックレンジ性能を見極め、非線形応答をやめることで、リニアな応答を持ちながら、高感度・高S/N性能を維持し、高解像度を実現できる200dB超のダイナミックレンジ性能を実現する撮像素子を提案した。本イメージセンサ技術は高感度高S/Nかつ超広ダイナミックレンジ性能が要求される多様な用途への応用が期待される。

## 【文 献】

- 1) 川人祥二：“応用からみたイメージセンサの開発動向”，映情学誌，59, 3, pp.359-361 (2005)
- 2) 浜本隆之，太田 淳：“新機能・新原理の撮像デバイスとその応用”，映情学誌，59, 3, pp.362-367 (2005)
- 3) 須川成利：“広ダイナミックレンジイメージセンサの最新動向”，映情学誌，60, 3, pp.299-302 (2006)
- 4) 須川成利：“広ダイナミックレンジCMOSイメージセンサ技術”，映情学技報，30, 33, pp.25-32 (June 2006)
- 5) S.G. Chamberlain and J.P.Y. Lee: "A Novel Wide Dynamic Range Silicon Photodetector and Linear Imaging Array", IEEE Trans. Electron Devices, ED-31, 2, pp.175-182 (1984)
- 6) D. Scheffer, B. Dierickx and G. Meynants: "Random Addressable 2048 x 2048 Active Pixel Image Sensor", IEEE Tran. Electron Devices, 44, 10, pp.1716-1720 (1997)
- 7) S. Kavadias, B. Dierickx, D. Scheffer, A. Alaerts, D. Uwaerts and J. Bogaerts: "A Logarithmic Response CMOS Image Sensor with On-Chip Calibration", IEEE J. Solid-State Circuits, 35, 8, pp.1146-1152 (2000)
- 8) M. Loose, K. Meier and J. Schemmel: "A Self-Calibrating Single-Chip CMOS Camera with Logarithmic Response", IEEE J. Solid-State Circuits, 36, 4, pp.586-596 (2001)
- 9) 角本兼一，矢野社，楠田将之，掃部幸一，田中良弘：“FPNキャンセル・積分機能内蔵対数変換形CMOSイメージセンサ”，映情学誌，57, 8, pp.1013-1018 (2003)
- 10) B. Choubey, D. Joseph, S. Aoyama and S. Collins: "Dark Current Reduction Techniques for Wide Dynamic Range Logarithmic CMOS Pixels", 2006 International Congress of Imaging Science, pp.155-159 (May 2006)
- 11) S. Decker, R. D. McGrath, K. Brehmer and C. G. Sodini: "A 256 x 256 CMOS Imaging Array with Wide Dynamic Range Pixels and Column-Parallel Digital Output", IEEE J. Solid-State Circuits, 33, 12, pp.2081-2091 (1998)
- 12) H. Komobuchi, A. Fukumoto, T. Yamada, Y. Matsuda, and T. Kuroda: "1/4 inch NTSC Format Hyper-D Range IL-CCD", Proc. 1995 IEEE Workshop on CCDs and AISs, SS-1 (Apr. 1995)
- 13) O. Yadid-Pecht and E.R. Fossum: "Wide Intrascene Dynamic Range CMOS APS Using Dual Sampling", IEEE Trans. Electron Devices, 44, 10, pp.1721-1723 (1997)
- 14) K. Mabuchi, N. Nakamura, E. Funastu, T. Abe, T. Umeda, T. Hoshino, R. Suzuki and H. Sumi: "CMOS Image Sensor Comprised of Floating Diffusion Driving Pixels with Buried Photodiode", J. Solid-State Circuits, 39, 12, pp.2408-2416 (2004)
- 15) M. Mase, S. Kawahito, M. Sasaki and Y. Wakamori: "A 19.5b Dynamic Range CMOS Image Sensor with 12b Column-Parallel

Cyclic A/D Converters", 2005 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.350-351 (Feb. 2005)

16) J.-H. Park, M. Mase, S. Kawahito, M. Sasaki, Y. Wakamori and Y. Ohta: "A 142dB Dynamic Range CMOS Image Sensor with Multiple Exposure Time Signals", 2005 A-SSCC Dig. Tech. Papers, pp.85-88 (Nov. 2005)

17) T. Nakamura and K. Saitoh: "Recent progress of CMD imaging", Proc. 1997 IEEE Workshop on CCDs and AISs, R14 (June 1997)

18) D.X.D. Yang, A.El Gamal, B. Fowler and H. Tian: "A 640 x 512 CMOS Image Sensor with Ultrawide Dynamic Range Floating-Point Pixel-Level ADC", IEEE J. Solid-State Circuits, **34**, 12, pp.1821-1834 (1999)

19) D. Stoppa, A. Simoni, L. Gonzo, M. Gottardi, and G.-F. Dalla Betta: "Novel CMOS Image Sensor with a 132-dB Dynamic Range", IEEE J. Solid-State Circuits, **37**, 12, pp.1846-1852 (2002)

20) W. Bidermann, A. El Gamal, S. Ewedemi, J. Reyneri, H. Tian, D. Wile and D. Yang: "A 0.18 $\mu$ m High Dynamic Range NTSC/PAL Imaging System-on-Chip with Embedded DRAM Frame Buffer", 2003 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.212-213 (Feb. 2003)

21) P.M. Acosta-Serafini, I. Masaki and C.G. Sodini: "A 1/3" VGA Linear Wide Dynamic Range CMOS Image Sensor Implementing a Predictive Multiple Sampling Algorithm with Overlapping Integration Intervals", IEEE J. Solid-State Circuits, **39**, pp.1487-1496 (2004)

22) 小田和也, 小林寛和, 竹村和彦, 竹内 豊, 山田哲生: "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-", 映情学技報, **27**, 25, pp. 17-20 (2003)

23) S. Sugawa, N. Akahane, S. Adachi, K. Mori, T. Ishiuchi and K. Mizobuchi: "A 100 dB Dynamic Range CMOS Image Sensor Using a Lateral Overflow Integration Capacitor", 2005 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.352-353 (Feb. 2005)

24) 須川成利, 赤羽奈々, 足立理, 盛一也, 石内敏之, 溝渕孝一: "横型オーバーフロー蓄積容量を用いた広ダイナミックレンジCMOSイメージセンサ", 映情学技報, **29**, 24, pp.29-32 (Mar. 2005)

25) S. Adachi, S. Sugawa, N. Akahane, K. Mori, T. Ishiuchi and K. Mizobuchi: "The Tolerance for FD Dark Current and PD Overflow Current Characteristics of Wide Dynamic Range CMOS Image Sensor Using a Lateral Overflow Integration Capacitor", Proc. 2005 IEEE Workshop on CCDs and AISs, pp.153-156 (June 2005)

26) 盛 一也, 須川成利, 足立理, 赤羽奈々, 石内敏之, 溝渕孝一: "横型オーバーフロー蓄積容量を用いた広ダイナミックレンジCMOSイメージセンサの暗電流耐性とオーバーフロー特性", 映情学技報, **29**, 40, pp.49-53 (July 2005)

27) N. Akahane, S. Sugawa, S. Adachi, K. Mori, T. Ishiuchi and K. Mizobuchi: "A Sensitivity and Linearity Improvement of a 100 dB Dynamic Range CMOS Image Sensor Using a Lateral Overflow Integration Capacitor", 2005 Symposium on VLSI Circuits, pp.62-65 (June 2005)

28) 赤羽奈々, 須川成利, 足立理, 盛一也, 石内敏之, 溝渕孝一: "感度とリニアリティ特性を改善した横型オーバーフロー蓄積容量型広ダイナミックレンジCMOSイメージセンサ", 映情学技報, **29**, 61, pp.21-24 (Oct. 2005)

29) N. Akahane, S. Sugawa, S. Adachi, K. Mori, T. Ishiuchi and K. Mizobuchi: "A Sensitivity and Linearity Improvement of a 100-dB Dynamic Range CMOS Image Sensor Using a Lateral Overflow Integration Capacitor", IEEE J. Solid-State Circuits, **41**, 4, pp.851-858 (2006)

30) E.C. Fox, J. Hyneczek and D.R. Dykaar: "Wide- Dynamic-Range Pixel with Combined Linear and Logarithmic Response and Increased Signal Swing", Proc. SPIE, 3965, pp.4-10 (Jan. 2000)

31) M. Waeny, S. Tanner, S.C. Lauxtermann, N. Blanc, M. Willemin, M. Rechsteiner, E. Doering, J. Grupp, P. Seitz, F. Pellandini and M. Ansorge: "High-Sensitivity High-Dynamic Digital CMOS Imager", Proc. SPIE, 4306, pp.78-84 (May 2001)

32) G.G. Storm, J.E.D. Hurwitz, D. Renshaw, K.M. Findlater, R.K. Henderson and M.D. Purcell: "Combined Linear-Logarithmic CMOS Image Sensor", 2004 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.116-117 (Feb. 2004)

33) K. Hara, H. Kubo, M. Kimura, F. Murao and S. Komori: "A Linear-Logarithmic CMOS Sensor with Offset Calibration Using an Injected Charge Signal", 2005 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.354-355 (Feb. 2005)

34) N. Akahane, R. Ryuzaki, S. Adachi, K. Mizobuchi and S. Sugawa: "A 200dB Dynamic Range Iris-less CMOS Image Sensor with Lateral Overflow Integration Capacitor using Hybrid Voltage and Current Readout Operation", 2006 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.300-301 (Feb. 2006)

35) 須川成利, 赤羽奈々, 龍崎梨絵, 足立理, 溝渕孝一: "横型オーバーフロー蓄積と電流読出し動作を組合せたダイナミックレンジ200dB超のCMOSイメージセンサ", 映情学技報, **30**, 25, pp.9-12 (Mar. 2006)

36) N. Akahane, R. Ryuzaki, S. Sugawa, S. Adachi and K. Mizobuchi: "An Over 200 dB Dynamic Range Image Capture using a CMOS Image Sensor with Lateral Overflow Integration Capacitor and Current Readout Circuit in a Pixel", 2006 International Congress of Imaging Science, pp.160-163 (May 2006)

37) 赤羽奈々, 龍崎梨絵, 足立理, 溝渕孝一, 須川成利: "200dB超のダイナミックレンジ性能を持つ横型オーバーフロー容量CMOSイメージセンサの高S/N動作方法", 映情学技報, **30**, 33, pp.13-16 (June 2006)



**赤羽 奈々** 2004年, 東北大学工学部電子工学科卒業。2006年, 同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。現在, 同大学大学院工学研究科博士後期課程に在学中。イメージセンサに関する研究に従事。日本学術振興会特別研究員。学生会員。



**井出 典子** 2003年, 東北大学工学部入学。現在, 東北大学工学部電子工学科において, イメージセンサに関する研究に従事。



**足立 理** 1992年, 東北大学工学部材料物性学科卒業。1994年, 同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。同年, 日本テキサス・インスツルメンツ(株)入社。イメージセンサの開発に従事。



**溝渕 孝一** 1983年, 室蘭工業大学応用物性学科卒業。同年(株)ほくさん, 1987年, 日本テキサス・インスツルメンツ(株)に入社し, 超伝導磁束量子干渉計, メモリーの開発を経て, 現在, イメージセンサの研究開発に従事。同社上級主任技師兼グループ長。



**須川 成利** 1982年, 東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年, キヤノン(株)入社。1996年, 東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了。1999年, 東北大学大学院工学研究科助教授。2002年, 同教授。半導体, ディスプレイ, イメージセンサの研究に従事。工学博士。正会員。