

## 情報センシングの研究開発動向

須川成利<sup>†1</sup>, 大竹 浩<sup>†2</sup>, 池辺将之<sup>†3</sup>, 佐藤俊明<sup>†4</sup>, 小林昌弘<sup>†5</sup>, 黒田理人<sup>†1</sup>,  
 浜本隆之<sup>†6</sup>, 小室 孝<sup>†7</sup>, 徳田 崇<sup>†8</sup>, 山下誉行<sup>†2</sup>, 綱井史郎<sup>†9</sup>, 廣瀬 裕<sup>†10</sup>,  
 赤井大輔<sup>†11</sup>, 山本洋夫<sup>†12</sup>

## 1. まえがき

情報センシング分野では、センサを用いた画像および関連する空間情報の入力と処理にかかわる技術を対象としている。センサとは、自然界に存在する物理量を検出して、電気信号に変換するデバイスのことを指すが、センサの中でも、画像信号をとらえるイメージセンサは、今日では、スマートフォンやデジタルカメラなどの電子機器に広く搭載され、世界中の人々が日常的に利用するようになった。また、他の用途への利用も拡大し続けており、イメージセンサの世界市場は、この3年間においても、大きな成長を遂げている。イメージセンサは、近い将来に到来する生体レベルから宇宙を含む地球規模のセンサ・ネットワーク社会で中心的な役割を演じるものとなるであろう。

本稿は、情報センシング研究委員会の委員が分担して、情報センシング分野の中から、ここ3年の進展が著しい技術として、イメージセンサにおけるセンサ構造・材料、回

路技術、画素微細化・多画素化、高感度・低ノイズ化、高速化・広ダイナミックレンジ化・広波長化、画像処理、特殊機能、カメラにおける放送用カメラ・高精細カメラ、携帯電話用カメラ・デジタルカメラ・ビデオカメラ、車載用カメラ・セキュリティ用カメラ・産業用カメラ、不可視光撮像における赤外線、X線の技術についてまとめる。

## 2. イメージセンサ

## 2.1 センサ構造・材料

これまでのイメージセンサの進展を振り返ると、CCDからCMOSへの移行により、駆動電圧の低電圧化、低消費電力化、高速化、多画素化を達成してきた。さらに、裏面照射構造の開発により、画素の微細化に伴う光利用率の低下を大幅に改善し、チップサイズおよび画素サイズが縮小しても高感度化が実現されてきた。ここ3年間を振り返ると、裏面照射型イメージセンサは、ロジック回路を集積化した支持基板をThrough Silicon Via (TSV) で電氣的に接続した3次元積層型イメージセンサへと進化し、本格的に実用化されたこと、また、有機材料などシリコン以外の光電変換膜をCMOS回路上に積層した光電変換膜積層型イメージセンサの開発が活発化してきたことなど、センサ構造や材料に関する研究開発が行われたことが特徴的であった。ここでは、センサ構造・材料をキーワードとして、代表的な報告を紹介する。

画素サイズの微細化による感度の低下は裏面照射構造により解決され、飽和信号量の確保とクロストーク(混色)の抑圧が次の課題となっていた。その解決に向けて、転送ゲートを縦型構造にすることと、遮光メタルを埋め込むことで飽和信号の増大と混色抑制を行った画素サイズ1.2 $\mu\text{m}$ の裏面照射型イメージセンサが報告された<sup>1)</sup>。また、レンズの像面湾曲収差を克服するため、半球状に湾曲した裏面照射型イメージセンサが開発された<sup>2)</sup>。中心で感度を2倍、端部で1.4倍の感度向上を実現している。また、湾曲形状にすることにより、センサの引張り応力がエネルギーバンドギャップを広げる働きをすることで暗電流が1/5に低減した。

すべての画素をオートフォーカス用の位相差検出画素に割当てたCMOSイメージセンサが報告された<sup>3) 4)</sup>。一つの

<sup>†1</sup> 東北大学 大学院工学研究科

<sup>†2</sup> NHK 放送技術研究所

<sup>†3</sup> 北海道大学 大学院情報科学研究科

<sup>†4</sup> オン・セミコンダクター

<sup>†5</sup> キヤノン株式会社

<sup>†6</sup> 東京理科大学 工学部 電気工学科

<sup>†7</sup> 埼玉大学 大学院理工学研究科

<sup>†8</sup> 奈良先端科学技術大学院大学 物質創成科学研究科

<sup>†9</sup> 株式会社ニコン

<sup>†10</sup> パナソニック株式会社

<sup>†11</sup> 豊橋技術科学大学 エレクトロニクス先端融合研究所

<sup>†12</sup> 浜松ホトニクス株式会社

"Image Electronics Information Sensing" by Shigetoshi Sugawa, Rihito Kuroda (Graduate School of Engineering, Tohoku University, Miyagi), Hiroshi Ohtake, Takayuki Yamashita (Science and Technology Research Laboratories, NHK, Tokyo), Masayuki Ikebe (Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University, Hokkaido), Toshiaki Sato (ON Semiconductor, Tokyo), Masahiro Kobayashi (Canon Inc., Kanagawa), Takayuki Hamamoto (Faculty of Engineering, Tokyo University of Science, Tokyo), Takashi Komuro (Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, Saitama), Takashi Tokuda (Graduate School of Materials Science, Nara Institute of Science Technology, Nara), Shiro Tsunai (Nikon Corporation, Tokyo), Yutaka Hirose (Panasonic Corporation, Kyoto), Daisuke Akai (Electronics-Inspired Interdisciplinary Research Institute, Toyohashi University of Technology, Aichi), Hiroo Yamamoto (Hamamatsu Photonics K.K., Shizuoka)

マイクロレンズの下に二つのフォトダイオードを設けた画素構造により、全画素から信号情報と位相差情報を高速に読出すことができる。

1  $\mu\text{m}$ 以下の画素サイズにおいても、良好な感度と広いダイナミックレンジを実現するために、CMOS回路上の画素部全面に有機光電変換膜を積層したイメージセンサが開発された<sup>5)</sup>。有機膜はシリコンフォトダイオードに比べて吸収係数が高いため、薄膜化が可能であり、クロストークの低減にも有効である。また、画素設計の自由度が高く飽和電荷量を大きく設計することができる。膜積層センサの課題であるリセットノイズについては、負帰還ノイズ抑圧回路の適用により、ほぼ問題のないレベルに抑えられたと報告されている。また、2016年のInternational Solid-State Circuits Conference (ISSCC)では、2件の有機CMOSイメージセンサが報告された。一つは、画素を高感度画素と低感度画素に分け、信号合成により120 dBのダイナミックレンジを実現するとともに、ノイズキャンセル回路の改良によりノイズ電子数1.6電子を実現した<sup>6)</sup>。もう一つは、有機膜内で発生する信号の生成消滅を動的に制御することでグローバルシャッタや電子シャッタ機能を実現したものである<sup>7)</sup>。

光電変換膜積層型のイメージセンサとして、単結晶セレン膜や<sup>8)9)</sup>、CIGS膜を積層したもの<sup>10)</sup>も報告された。これらは、光電変換膜内でのアバランシェ増倍による高感度化を目指したもので将来の高感度技術として有望と考えられる。また、シリコン回路上に耐圧の高い結晶性酸化半導体を積層し、その上に光電変換膜を積層したデバイスも報告された<sup>11)</sup>。

赤、緑、青色にのみ感度を持つ有機光電変換膜と透明な酸化半導体で形成した回路とを積層することで深さ方向に光を捉える有機撮像デバイスについて、色ごとのフォーカスずれを解決するための直接積層型のセンサの試作結果が報告された<sup>12)</sup>。デバイスの形成温度を有機膜の耐熱温度以下の150°Cで製作するためのプロセスを開発し、トータルの厚み5.4  $\mu\text{m}$ での試作に成功している。さらに、赤、緑用の積層構造と、青色用のデバイスを向かい合わせ、貼り合わせることで、製造歩留まりを向上させる試みも報告された<sup>13)</sup>。

3次元積層型イメージセンサについては、上側の裏面照射センサと下側の回路基板とを7.6  $\mu\text{m}$ ピッチ400万個のバンプにより接続した1,600万画素のイメージセンサ<sup>14)</sup>や、TSVとハイブリッドスタッキング技術による8Kスーパーハイビジョン用1.1  $\mu\text{m}$ 画素3,300万画素240fps 3次元積層イメージセンサ<sup>15)</sup>、完全画素並列処理を目指し、全画素に接合電極を形成し、直接接合技術により接合形成したイメージセンサの試作結果が報告された<sup>16)</sup>。

ここでは、構造や材料という観点から特筆すべき報告を紹介した。今後もより一層の研究開発により性能・機能向上が期待される。

(大竹)

## 2.2 回路技術

イメージセンサの高解像度化・高速化に合わせ、センサ用のカラムA/D変換技術の研究開発も継続されている。センサ研究開発における重要な要素として、低ノイズ・高速動作・小面積・線形性(特に微分線形直線性DNL: Differential Non Linearity)・低電力があげられる。カラムA/D変換器として、高解像度センサに向けたさまざまな高速化手法の提案がなされるとともに、近年、画素値のサンプリングに関連した低ノイズ化手法に注目が集まっている。容量値Cに対する信号のサンプリングにおいて、ランダムノイズである熱雑音の総量は、 $kT/C$ ( $k$ :ボルツマン定数、 $T$ :温度)となる。入力信号の再現性が高い場合、同一条件で信号のサンプリングを $n$ 回行って加算平均することで、ランダムノイズに対するS/N比が改善する。このとき、ノイズ成分は $1/\sqrt{n}$ となるため、S/N比は $\sqrt{n}$ 倍改善される<sup>17)</sup>。

平均化を行うためには、マルチサンプリング(複数回のサンプリング)が必要となる。逐次的な手法と複数回路による手法とに大きく分かれ、主に前者からの提案が多い。逐次的なサンプリング手法として、まず $\Delta\Sigma$ 型A/D変換器が挙げられる。DC成分に対するオーバーサンプリングは、まさにマルチサンプリングと等価であり、積分出力を行うことで平均化と同じ効果を得る。また、量子化雑音に対するノイズシェーピング効果から、1ビットの2次 $\Delta\Sigma$ 型A/D変換器の場合、DC成分に対して $N$ ビット精度を得る場合 $N=\log_2 M(M+1)-1$ として $M$ 回のサンプリングを行えば良い。110回ほどのサンプリングで14ビット精度を得ることができる<sup>18)</sup>。

マルチサンプリング出力を積分し、折り返し型アンプによって出力しA/D変換する手法も提案されている。マルチサンプリングによる積分出力は、上位ビットに対応する信号範囲ごとに、中間信号電圧が折り返されて出力される。その中間信号電圧を、サイクリック型の下位ビットA/D変換を行う。80  $\mu\text{V}_{\text{rms}}$ の低ノイズ化、ダイナミックレンジ82 dB、13から19ビット精度を実現している<sup>19)</sup>。

近年は、シングルスロープA/D変換器を用いた、逐次的マルチサンプリング手法の提案も盛んである。暗部のA/D変換の場合、信号電荷(電子)の発生が少ないため、リセット電圧からの変化が少なく、ランプ信号と画素信号の比較が変換時間の速い段階で終了する。そのため、残りの変換時間に対して、マルチサンプリングを行う。手法としては、比較器の反転タイミングにより暗部・明部を検出して、シングル/マルチサンプリングを切替える(サンプリング回数5回で1.28  $e_{\text{rms}}$ から0.66  $e_{\text{rms}}$ のノイズ低減)<sup>20)</sup>、比較器の反転時に、ある一定の電圧範囲内でランプ信号を複数回折り返すものが提案されている(サンプリング回数105回で160  $\mu\text{V}_{\text{rms}}$ から18.6  $\mu\text{V}_{\text{rms}}$ へノイズ低減)<sup>21)</sup>。

逐次比較型A/D変換器では、マルチサンプリング手法を下位ビットの変換に用いる手法が提案されている。上位8ビ

ットの変換により信号電圧範囲を特定し、下位4ビットの変換を複数回行い、それを平均化する。逐次比較型A/D変換器では、下位ビット変換に用いる容量値は小さくなるため、省電力化の効果も同時に得ることができる。試作センサにより $225\mu\text{V}_{\text{rms}}$ から $96.5\mu\text{V}_{\text{rms}}$ へノイズ低減を実現した<sup>22)</sup>。

単一画素値に対して、複数のA/D変換器を用いてマルチサンプリングを行うものとして、積層センサの特徴を活かした手法が提案されている。積層型センサでは、ピクセル部とロジック部にそれぞれ適切なプロセスを割当てることができる。そこで、カラムA/D変換器のロジック部を高集積化することで、2倍のA/D変換器を実装し、同一変換時間でのマルチサンプリングを実現した( $1.3e_{\text{rms}}$ のノイズ低減)<sup>23)</sup>。

また、カラム部のソースフォロアの駆動手法に着目し、低ノイズ化を図る報告もされている。本来、ソースフォロアの負荷素子として、定電流駆動MOSFETのドレイン抵抗を用いているが、定電流を生じさせない浮遊容量負荷とすることで、信号出力に積分とドレイン接地の負帰還効果を持たせることができる。十分な読出し速度も確保でき、浮遊容量負荷読出しにより、 $0.74e_{\text{rms}}$ から $0.46e_{\text{rms}}$ のノイズ低減を実現している<sup>24)</sup>。(池辺)

### 2.3 画素微細化・多画素化

中国市場の景気減速が大いに懸念される昨今ではあるが、世界のイメージセンサ市場はこの3年間順調に成長を続け、今後も年率10%強の高い成長が見込まれている。イメージセンサ市場の内訳は2013年には携帯電話、スマートフォンおよびタブレットがおよそ90%を占めていたが、近年は特に車載カメラ、セキュリティカメラなどの分野での成長が著しい。

そういった中、カメラの高画質化、小型化などの要求から依然、スマートフォン市場が画素の微細化技術を牽引している。スマートフォンカメラ向けのCMOSイメージセンサの画素数は、2013年当時500万から800万画素が主流であったが、現在は1,200万から1,300万画素が主流となっている。画素サイズはこの間に $1.75\mu\text{m}$ クラスから順次縮小され、量産品ベースでは $1.12\mu\text{m}$ が現行最小画素サイズとなっている。2015年にはOmniVision社<sup>25)</sup>とSamsung社<sup>26)</sup>が、2016年2月にはSony社<sup>27)</sup>が $1.0\mu\text{m}$ 画素を搭載したセンサの製品化を発表して、いよいよサブミクロン画素時代の到来を予感させているが、その一方で画素シュリンクに関する研究発表は、ここ数年頭打ちの傾向が若干見受けられる。画素の微細化に伴う感度低下、色ノイズを含めたS/Nの改善が重要な研究開発課題である。前記3社は積層型CMOSセンサ技術を採用しており、センサチップのBSI (Back Side Illumination) 化による感度向上のみならず、処理チップを分離することで画素プロセスの最適化を可能にし特性改善を図っていると見られる。IISW (International Image Sensor Workshop) 2015では、V.C. Veneziaら (OmniVision社) はカスタマイズしたNMOS-pixelプロセス

を用いて、 $1.0\mu\text{m}$ 画素にて飽和電荷数 $6,500e^-$ 、暗電流 (@ $60^\circ\text{C}$ )  $4e^-/\text{sec}$ 、読出しノイズ (@ $\times 16$  gain)  $1.5e^-$ の性能を達成したとした<sup>28)</sup>。V.C. Veneziaらはまた、BCFA (Buried Color Filter Array) と、B-DTI (Backside Deep Trench Isolation) を用いることにより、シリコン表面近くにカラーフィルタを形成して量子効率の低下を抑え、かつクロストークを低減することで上記性能を達成したとした。前記Samsung社も同様の画素分離構造を採用している<sup>29)</sup>。このように光の利用効率を高める光学的特性の改善もまた必要不可欠の技術である。

一方、従来のシリコンフォトダイオードに代わる光電変換材料の研究開発が注目されてきた。IDEM (International Electron Devices Meeting) 2015で、M. Takaseら (Panasonic社) は有機薄膜を用いた画素サイズ $0.9\mu\text{m}$ のグローバルシャッターCMOSイメージセンサを報告した<sup>30)</sup>。有機薄膜は光吸収係数が大きく薄膜化が可能であり、また受光面積をほぼ画素全域に形成できるため、高い光利用効率が期待できる技術である。

多画素化においては、画素サイズはやや大きめであるものの1億画素を超える報告が出てきた。R. Funatsuら (NHK, Forza Silicon社) はISSCC 2015で単板8Kスーパーハイビジョンカメラ用の1億3,300万画素センサ<sup>31)</sup>を、H. Totsukaら (Canon) はISSCC 2016でその倍近い画素数の2億5千万画素を有するセンサ<sup>32)</sup>を報告した。2020年東京オリンピック・パラリンピックへ向けた8Kスーパーハイビジョン放送の本格開始と相まって、民生用8Kカメラの普及もまた期待される。(佐藤)

### 2.4 高感度化・低ノイズ化

近年のイメージセンサにおいて、感度向上に対する大きなブレイクスルーの一つである裏面照射型CMOSイメージセンサの開発発表から8年が経過した<sup>33)</sup>。当初は問題の一つとして色分離性が挙げられていたが、カラーフィルタ領域にも遮光部材を設ける構造や、DTI (Deep Trench Isolation) と呼ばれるSi内に設けた分離層を用いて色分離性を改善する構造などが提案され<sup>34)</sup>、多くのデジタルカメラやスマートフォンなどで、画素サイズが $1.4\mu\text{m}$ 以下の裏面照射型CMOSイメージセンサが採用されている。さらに、APS-Cサイズや35mmフルサイズの光学フォーマットで裏面照射型を採用した例もある<sup>35) 36)</sup>。しかしながら、ここ数年は画素サイズの微細化スピードが鈍化し、裏面照射型CMOSイメージセンサを用いた高感度化技術も成熟してきたとの見方が大勢となってきた。ポストCMOSイメージセンサ、ポストSiフォトダイオードに関する議論はこれまでもなされてきたが、いよいよ現実味を帯びてきたと言える。以上を踏まえ、高感度化および低ノイズ化それぞれに関して述べる。

高感度化に関しては、有機光電膜や量子ドットフィルムを用いたイメージセンサ、グローバル電子シャッター機能と高

感度を両立したものの、Siを用いたまま可視光以外へも検知感度を拡大させたもの、星明かり以下の照度でもカラー撮影が可能な超高感度カメラなど、さまざまな技術・製品が積極的に提案・発表された。有機積層型イメージセンサはこれまでも報告されていたが、リセットノイズ (kTCノイズ) の低減が依然として課題の一つであった。これに対し、フィードバックアンプと容量で容量結合型ノイズキャンセル回路を構成し、リセットノイズを $1.6e^-$ まで低減する技術が提案された<sup>37)</sup>。また、CMOS回路上にQuantum Filmと呼ばれる量子ドットで構成された膜を設け、外部量子効率を従来のSi比で1.5~2倍程度に向上可能とする技術を製品化した発表もなされた<sup>38)</sup>。いずれも現時点では膜の信頼性や暗電流などに難があることが予想されるが、Siの量子効率という制限を超える可能性のある技術として今後の展開が楽しみである。さらに、フォトダイオードとストレージノードとをそれぞれ異なるSi基板に形成しマイクロバンプで接合することで、グローバル電子シャッタ機能を有しながら、高感度かつ-180dBという高い寄生光感度耐性を実現したものが提案された<sup>39)</sup>。また、原子レベルで平坦なSi基板に、浅く急峻な表面p型層と $20\mu\text{m}$ の厚いエピ層を用いて、190~1000nmまでの幅広い波長の光に高い感度を持つイメージセンサが提案された<sup>40)</sup>。一方、画素サイズは $19\mu\text{m}$ と大きいながらも、最低被写体照度 $0.5\text{mlux}$ 、ISO感度400万相当を実現するカメラも発売された<sup>41)</sup>。これらの技術開発はいずれもイメージセンサの用途を拡大する意味でも非常に興味深い。

低ノイズ化に関しても、入力換算ノイズで $1e^-$ を大きく下回るレベルまで開発が進められた。E. Fossum氏が提唱したQuanta imaging<sup>42)</sup>の実現にまた一歩近づいていると言える。入力換算ノイズ低減のためのアプローチは大きく分けて二つあり、一つは電荷を電圧に変換する効率(電荷変換効率)を大きくすること、もう一つは光電変換後にイメージセンサの至る所で生じるノイズそのものを低減することである。前者の例としては、電荷変換効率を上げるためにFD (Floating Diffusion) の容量を高精度に見積もった上で、拡散層の構成や濃度の見直し等により、180nmプロセスでFD容量 $0.66\text{fF}$ 、電荷変換効率 $243\mu\text{V}/e^-$ 、読出しノイズ $0.43e^-$ を達成したとする報告がなされた<sup>43)</sup>。同様のアプローチとして、E. Fossum氏らは65nmプロセスで電荷変換効率 $426\mu\text{V}/e^-$ 、読出しノイズ $0.34e^-$ のイメージセンサを作製し、アバランシェ増幅を用いずに、入射光を量子的に捉えることに成功したと報告した<sup>44)</sup>。一方、後者のアプローチの一つとして、画素ソースフォロワアンプ(画素SFA)で生じるノイズを低減するために埋込トランジスタやp型チャンネルが有用であることが以前より示されている。IISW 2015においても、画素SFAのチャンネルをp型チャンネル化した報告が3件なされた<sup>45)~47)</sup>。さらに、画素SFAのゲート酸化膜を薄くすることで読出しノイズ $0.4e^-$ を達成したとする報告<sup>46)</sup>、および、

画素SFAのゲート界面における電荷のトラップ状態の相関をなくすために、チャンネルの蓄積状態と反転状態とを素早く往復させマルチサンプリング効果を高め、読出しノイズ $0.33e^-$ を達成したとする報告がなされた<sup>47)</sup>。さらには、リセットトランジスタを削減してFD容量を低減するとともに、AD (Analog to Digital) 変換回路においてマルチサンプリングを行い、 $-10^\circ\text{C}$ 環境下で $0.27e^-$ という読出しノイズを達成したとする報告もある<sup>48)</sup>。

近年のイメージセンサにおける最大の需要の担い手であるスマートフォンは、高感度化と低ノイズ化の恩恵を存分に受け、ますます高画質撮影が可能となっている。しかしながら、すべてのユーザが満足しているわけではなく、高感度化、低ノイズ化、高解像度化、広ダイナミックレンジ化に対しての要求は留まるところを知らない。今後はスマートフォンに加え、監視カメラ、マシンビジョンやドローンなどといった新たなイメージセンサの需要の創出に向け、ますます技術の進展を続けていくと考えられる。(小林)

## 2.5 高速化・広ダイナミックレンジ化・広波長化

連続撮像型のイメージセンサの高速化においては、列回路技術の進展と積層化技術の利用によって、多画素数・高出力レートのCMOSイメージセンサの提案がなされた。32列共用の逐次比較型ADCを有するCMOSイメージセンサでは画素サイズ $2.45\mu\text{m}$ 角、総画素数 $15488^{\text{H}} \times 8776^{\text{V}}$ (有効1億3,300万画素)において112チャンネル並列出力で128.7Gbpsのデータレート、撮像速度60fpsを達成している<sup>49)</sup>。また、画素領域に $4.4\mu\text{m}$ ピッチで配線接続を設けた画素 $1.1\mu\text{m}$ 角、サイズ有効画素数 $7728^{\text{H}} \times 4368^{\text{V}}$ (3,300万画素)の3次元積層型CMOSイメージセンサでは、 $1932^{\text{H}} \times 4^{\text{V}}$ のCDSおよび2段サイクリック型と逐次比較型からなる3段ADCによって、消費電力3.0Wにおいて階調12ビット、画素出力レート7.96Gpixel/sを得て、撮像速度240fpsを達成している<sup>50)</sup>。

バースト撮像型のイメージセンサでは、画素領域の上下の領域に画素毎に128個のアナログメモリーを有する画素ピッチ $32\mu\text{m}$ 、有効画素数 $400^{\text{H}} \times 250^{\text{V}}$ 、最高撮像速度20MfpsのCMOSイメージセンサにおいて、 $0.18\mu\text{m}$  1P6Mテクノロジーに基づくプロセス開発により、開口率・電荷電圧変換ゲイン(CG)・回路読出しゲインを増加させて従来比で8倍の光感度を得るとともに、電源電圧を5.0Vから3.3Vにすることで消費電力の半減が達成された<sup>51)</sup>。

また、高速電荷振分けを行う横電界制御型画素を有する $5 \times 3$ のマルチアパーチャイメージセンサが報告された<sup>52)</sup>。符号化シャッタを適用して時間多重で蓄積された光信号に対して逆問題を解いて時間分解することで、圧縮率47%における撮像速度200Mfpsを達成している。アパーチャ毎の有効画素数は $64 \times 108$ である。

広ダイナミックレンジ(DR)イメージセンサにおいては、低照度側、高照度側それぞれにおいてDR拡大技術の進展が見られた。

画素内に横型オーバーフロー容量 (LOFIC) を有する CMOS イメージセンサでは、FD 容量を極小化する構造・プロセス技術を導入して CG を  $247 \mu\text{V}/\text{e}$  に増加させるとともに、列出力に複数のゲイン (16 倍および 1 倍) を持つアンプを設けることで、浮遊容量付加読出し時において、信号読出し RN0.47 e- と飽和電荷数 87 ke-, DR104 dB を達成している<sup>53)</sup>。

また、画素毎に印加電圧で増幅率を調整する pn 接合アパランシェ増幅部を設けた CMOS イメージセンサが報告された<sup>54)</sup>。画素サイズ  $3.8 \mu\text{m}$  角、画素数  $1280^{\text{H}} \times 720^{\text{V}}$  のチップにおいて光電子を  $10^5$  倍に増加することで  $0.01 \text{ lux}$  におけるカラー画像を取得し、非アパランシェ増幅モードと合わせて DR100 dB を達成している。

画素毎に 6.5 倍の感度差を設けた 2 種類の PD と、CG を調整するために二つの FD 間にスイッチを設けた画素サイズ  $4.2 \mu\text{m}$  角、画素数  $1280^{\text{H}} \times 1080^{\text{V}}$  の裏面照射型 CMOS イメージセンサでは、3 種類の蓄積期間を適用することで DR120 dB を達成している<sup>55)</sup>。

また、有機光電変換薄膜を積層した CMOS イメージセンサにおいて、画素電極面積比、飽和電荷蓄積容量比にそれぞれ 10 倍の差を設けた 2 種類の画素を有するとともに、FD リセット時に取り込まれる熱雑音を低減する容量結合型ノイズキャンセル回路を適用することで、65 nm 1P4M プロセスを用いた画素サイズ  $6.0 \mu\text{m}$  角、画素数  $970^{\text{H}} \times 550^{\text{V}}$  のチップにおいて信号読出し RN5.4 e- と飽和電荷数 600 ke-, DR123.8 dB を達成している<sup>56)</sup>。

広波長化に関しては、イメージセンサの分光感度帯域を可視光帯域から紫外光帯域、近赤外光帯域へ拡大する技術に加え、オンチップ分光機能を備える分光イメージセンサ技術が提案された。

LOFIC CMOS イメージセンサでは、広光波長帯域・高紫外光照射耐性 PD 技術、低 FD 容量技術を導入することで、画素サイズ  $5.6 \mu\text{m}$  角、有効画素数  $1280^{\text{H}} \times 960^{\text{V}}$  のチップにおいて分光感度帯域  $190 \sim 1000 \text{ nm}$ 、CG  $240 \mu\text{V}/\text{e}$ 、飽和電荷数 200 ke- を達成している<sup>57)</sup>。

画素内に CG 切替えスイッチを設けた画素サイズ  $11 \mu\text{m}$  角、画素数  $2048 \times 2048$  の裏面照射型 CMOS において、分光感度帯域  $250 \sim 1000 \text{ nm}$  を得るとともに、反射防止膜の調整によって最大量子効率を得る波長を  $400 \text{ nm}$  および  $270 \text{ nm}$  に作り分けている。また、暗時 RN 1.4 e-, 飽和電荷数 120 ke-, DR96 dB を達成している<sup>58)</sup>。

マイクロバンプを用いて 3 次元積層された 2 層フォトダイオード構造を有する画素サイズ  $3.8 \mu\text{m}$  角、有効画素数  $4224^{\text{H}} \times 240^{\text{V}}$  の CMOS イメージセンサでは、赤外カットフィルタレスでベイヤー配列の 6 種類の画素で取得した信号を用いて RGB 画像と NIR 画像を得ている<sup>59)</sup>。

また、中心波長を作り分けたバンドパスフィルタをチップ上に最小  $5.5 \mu\text{m}$  ピッチでライン、タイル、モザイク状に設けたマルチハイパースペクトル CMOS イメージセンサでは、

ライン、タイル型では波長帯域  $600 \sim 1000 \text{ nm}$  において、それぞれ 100 および 32 波長、モザイク型では  $470 \sim 620 \text{ nm}$  において、16 波長分の分光情報を得ることを達成している<sup>60)</sup>。

以上、新規なプロセス技術や積層化技術の導入による速度・ダイナミックレンジ・光波長帯域といったイメージセンサ基本性能の向上に関する動向が目立った。今後とも技術の進展に伴い更なる性能向上が期待される。(黒田)

## 2.6 高機能化

セキュリティや車載、ロボティクスなどのさまざまな応用に向けた、特徴のあるイメージセンサの開発が進められている。中でも、カメラから被写体までの距離や被写体の形状を取得する 3 次元イメージセンサは、その用途の広さから引き続き検討が盛んである。近赤外 (IR) 光を照射し、その反射情報から距離を計測するアクティブセンシングには、光切断法、TOF (Time-of-Flight) 法などがあるが、いずれも撮像の時間解像度が測距の精度を決めるため、高速で高感度なイメージセンサが求められている。

光切断法とは、走査したシート光の反射位置と光源の位置から三角測量により距離を求めるものである。このためのイメージセンサとして、画素配列の周辺におかれた検波回路により、注目領域内の画素を並列に検波するものが検討されている<sup>61)</sup>。距離  $1000 \text{ mm}$  における測定誤差は  $10.7 \text{ mm}$  で、 $0.869 \text{ range maps/s}$  で計測できる。

TOF 法とは、変調された光を照射してからその反射光が検出されるまでの時間から距離を求めるものである。このためのイメージセンサとして、SPAD (Single Photon Avalanche Diode) を用いた高感度なものが検討されている<sup>62)</sup>。QVGA サイズであり、距離  $600 \text{ mm}$  における測定誤差 RMS は  $38 \text{ mm}$  である。VOD (Vertical Overflow Drain) 構造を用いた CMOS イメージセンサが検討されており<sup>63)</sup>、高速なグローバルシャッターを実現している。さらに、圧縮サンプリングを用いたマルチアパーチャ型のイメージセンサが検討されている<sup>64)</sup>。24 m までの範囲で、 $0.75 \text{ m}$  の分解能である。その他にも、環境光の影響を抑制し、照射光の成分を強調する機能を持ったものなどがあり、その精度向上に向けたさまざまな工夫がなされている。

複数のイメージセンサを用いる、または一つのイメージセンサに対して複数のレンズを組合せ分割して撮像するカメラの開発が進み、さまざまな応用が検討されている。距離計測だけでなく、複数の画像情報を組合せることで、高空間解像度、高フレームレート、広波長、高 DR (Dynamic Range) 化などを実現し、撮像後のフォーカス調整も可能である。例えば、TOMBO (Thin Observation Module by Bound Optics) と呼ばれるカメラでは、デンタルミラー、内視鏡などの医用への応用が考えられている<sup>65)</sup>。

通常のイメージセンサは、全画素が同じタイミングで撮像を開始し終了するが、画素ごとに異なる動作をするイメージセンサの検討が進んでいる。圧縮センシングを活用し

て超高速に撮像するイメージセンサがその代表例である。カラーセンサのベイヤー配列のように、4種類の蓄積動作パターンをブロック単位で繰り返して撮像することのできるイメージセンサが検討されている<sup>66)</sup>。後段の信号処理と組み合わせることで、空間・時間解像度、DRを自由に変更した画像を再構成することができる。

セキュリティ用のイメージセンサとして、RGBとIRを同時に撮像できるイメージセンサの応用の検討が進んでいる。例えば、IR光を照射することで可視光が低照度の中でも画質の良いRGBカラー画像を取得するものが検討されている<sup>67)</sup>。また、注目領域部分の空間解像度を落とす、DRを広げることのできるものが検討されている<sup>68)</sup>。

近年、画素回路と周辺・処理回路を積層化するイメージセンサの実用化が進んでいる。イメージセンサチップ内で処理と一体となった撮像を行うことで、新しい撮像方式に基づいた大幅な性能向上や機能拡張が期待される。(浜本)

## 2.7 画像処理

カメラを用いた撮像において高品質な画像を取得するためには、イメージセンサの性能向上だけでなく、イメージセンサで取得した画像を後処理することで、イメージセンサ単体の性能を超える高品質の画像を得ることができる。

例えば、撮影された画像の解像度を超えて、その画像に含まれる高周波成分を復元する超解像技術は、現在も盛んに研究が行われている。

中でも複数の画像を1枚に合成して高解像度化する方式は広く用いられているが、反復演算の回数の削減が課題となっていた。反復演算が不要で2枚の画像から1枚の高解像な画像を再構成できる技術としてTPS (Time domain Phase compensated Sub-sampling) 法が知られているが、影山らは画像にさまざまな動きが含まれる場合にも、TPS法が適用可能であることを理論的に示すとともに、TPS法の2次元拡張方式を提案した<sup>69)</sup>。

一方、撮像後に画像処理を行うことを前提とした新しいセンシング手法が数多く提案されている。これらは計算によって初めて画像が生成されることから、コンピュータシヨナルフォトグラフィと総称されている。

小林らは、カメラを露光中に移動させることにより、物体の動きの方向や大きさに依らず動きぼやけの復元が可能であることを示した<sup>70)</sup>。この撮像方法で任意の奥行きを持つ物体の奥行きぼやけ復元が可能であることがすでに知られていたが、提案法では任意の奥行きに存在する任意の動きを持つ物体の奥行きぼやけと動きぼやけを同時に復元することが可能となっている。

レンズに位相マスクを挿入して撮像した画像に画像復元処理を施すことで、被写界深度が拡大する Wavefront Coding という方式がある。佐藤らは、像面上でのPSF (Point Spread Function) の空間的な変換に着目し、復元に用いるPSFを実際のPSFとの差分が小さくなるように変化

させることにより、広い被写界深度を保ちつつ、復元画像の画質を改善する手法を提案した<sup>71)</sup>。

園田らは、反射型液晶素子を用いて高速に絞り形状を変更できる能動絞りカメラを提案した<sup>72)</sup>。絞りの形状を変えることで、カメラ撮像系のぼやけ関数を制御することができ、ぼやけ復元や画像の奥行き推定、ライトフィールド取得などに応用できる。透過型液晶ディスプレイ (LCD) を用いた同様の試みはあったが、提案システムはより高い光効率、絞り形状の高い自由度と高速な形状変更を実現している。

イメージセンサで取得した複数の情報を統合することで、高品質な画像を取得する技術も研究されている。

山下らは、RGBと近赤外 (NIR) の情報を単板のイメージセンサで取得できる撮像装置を用いて、取得したRGBとNIRの情報をもとに、補間処理とノイズ除去を同時に実現し、鮮明なカラー画像を再構成する手法を示した<sup>73)</sup>。

久下沼らは、CMOSイメージセンサを2次元アレイ状に配置したマルチアパーチャカメラシステムにより撮影した低SNR画像からデプスマップを推定し、視差補償した画像の合成を行う手法を提案した<sup>74)</sup>。確率的グラフィカルモデルを用いた大域的推定を行うことで、低照度下で撮影した画像からでもデプスマップを推定することができている。

望月らは、マルチアパーチャ構造を持つCMOSイメージセンサを用いて、プラズマ発光のような瞬間的な現象を観測するための高速撮像手法を提案した<sup>75)</sup>。アパーチャ毎に異なるパターンの符号化シャッタを適用し、信号電荷を画素に時間多重して蓄積する。得られた時間多重画像とアパーチャ毎のシャッタパターンから逆問題を解くことで時間分解した超高速画像を得ることができる。試作したセンサにより200 Mfpsでプラズマ発光を観測している。

山崎らは、単板イメージセンサを用いて時空間方向の露光制御を行い、信号処理と組み合わせることで、高ダイナミックレンジ、高フレームレート、高S/Nの撮像を実現する手法を提案した<sup>76)</sup>。試作したイメージセンサを用いて、10 dBのダイナミックレンジ拡大と3倍の高フレームレート化、および高S/N化を達成している。(小室)

## 2.8 特殊機能

イメージセンサ上に集積化したナノ構造により偏光や色分離・分光機能をしようとする研究が、さまざまなアプローチで続けられている。以前から報告されているイメージセンサ画素上にワイヤ構造で偏光子を形成する偏光計測技術では、*in vivo* (生体内) バイオイメージングを志向したデバイス技術の報告<sup>77)</sup>のほか、 $\mu$ TAS向けインライン偏光分析装置などの応用研究例がみられている<sup>78)</sup>。またIISW 2015における分光イメージング技術のセッションでは、垂直方向のナノ構造を利用した特徴的な取組みが複数報告された。Anzagiraらはイメージセンサにおいて通常の吸収型フィルタを廃し、画素面に対して垂直方向の分散ブラッグ反射器

(DBR) 構造を採用することで、低照度でのカラーイメージングを実現する技術を提案している<sup>79)</sup>。黒田らは、ラインセンサにおいて画素ごとに最大4層(2ペア)の $\text{SiN}_x/\text{SiO}_2$ 積層膜をつくりわけ、波長200~1100 nmの範囲を9種類の波長レンジに分解して測定できるセンサを報告している<sup>80)</sup>。さらに、垂直方向あるいは面内方向の干渉構造の一方だけでなく、面内・垂直方向のナノ構造を組合せた分光構造についても報告がなされている。Hongらは、65 nmプロセスで3次元井桁状に組んだナノフォトニックフィルタ構造によって、バイオ蛍光イメージングのためのフィルタを実現した<sup>81)</sup>。Garciaらは、従来から報告されているワイヤグリッド偏光子構造を、3層スタックフォトダイオード画素を備えたイメージセンサと組合せることで、分光と偏光分析機能を同時に備えたイメージセンサを報告している<sup>82)</sup>。研究開発のみならず、産業応用の例として、ナノフォトニック構造をイメージセンサ上に集積化することで実現した小型スペクトロメータデバイスの市販例<sup>83)</sup>も現れており、今後の研究開発と産業応用への展開が期待される。

バイオ応用のためのイメージング技術として、研究されてきたオンチップイメージングでは、蛍光フィルタ性能の向上がなされるなど、バイオ計測技術としての有効性が実証されつつある<sup>84)</sup>。また1次計測対象がプロトンイオンであるpHイメージセンサの高画素化、高性能化も実現されるとともに<sup>85)</sup>、メディアータ膜を付加することによるアセチルコリンやGABAといった各種のバイオ分子イメージングの実証も進んでいる。イメージセンサベースのバイオ計測テクノロジーとして今後の研究展開に興味を持たれる。

バイオ蛍光イメージングでは、波長選択的フィルタ構造によって励起光と蛍光を分離するのが一般的である。しかし、蛍光寿命より高速度な撮像技術があれば、励起光を停止した後の蛍光寿命の間に撮像を行うことで、フィルタレスの蛍光計測・イメージングが可能である。また蛍光寿命そのものを測定したいという強いニーズもある。単一電子アバランシェフォトダイオード(SPAD)を用いたアプローチのほか、最適化されたポテンシャルプロファイルと複数の転送ゲートによる振り分け転送方式の研究が進められており、IISW 2015で報告された時間分解能はそれぞれについて約6.7ps<sup>86)</sup>および約10ps<sup>87)</sup>である。高い時間分解能による蛍光(寿命)計測センサ技術は、別項に述べたTOF法による距離計測などとも合わせ、今後さらなる性能向上が期待される。

なおIISW 2015において報告された特殊用途イメージセンサと応用システムについては、本誌2016年3月号特集記事(秋田氏著)に詳細を掲載。(徳田)

### 3. カメラ

#### 3.1 放送用カメラ・高精細カメラ

放送衛星を用いた4K/8K放送について、2016年からの試

験放送、2018年からの実用放送が総務省のロードマップで謳われており、その推進母体であるNexTVフォーラムや電波産業会(ARIB)、各放送局やメーカーなどで急速に準備が進められている。これと歩調を合わせるかのように、上位の民生機でも4K撮影が可能なものが発売されており、高解像度化の流れは必然のように見える。

4K撮影が可能な業務用カメラは、デジタルシネマが主用途であったため、イメージセンサの光学サイズがSuper 35相当であり、放送用途としては、従来レンズの資産が生かせない、被写界深度が浅いため中継等に不向き、などの課題が指摘され、2015年になり放送を視野に入れたカメラが複数報告された<sup>88)~91)</sup>。いずれも、従来のHDTVと同様の光学サイズである2/3インチ系のイメージセンサを使用しており、文献<sup>88)</sup>はHDTV用MOSイメージセンサを使用したRGGB 4板式、そのほかについてはRGB3板式である。特に3板式の場合、画素サイズが2.5  $\mu\text{m}$ 程度となるため、飽和電荷量の低下が懸念されるが、従来に比べセンサの低ノイズ化が進捗しており、放送用として十分な性能を有する(HDTV換算S/N 62 dB@F8)<sup>90)</sup>仕様となっている。

一方でデジタルシネマ、放送共用のカメラの低廉化も進み、カメラメーカー以外の機器メーカーの参入も相次いでいる<sup>92) 93)</sup>。これはA/Dコンバータを搭載したイメージセンサが直接デジタル出力できるようになり、アナログ回路の開発コストの低減が要因の一つであると想定される。

また小型軽量で、自分の体に装着してスポーツなどを楽しみながら映像が撮影できる「アクションカメラ」と呼ばれる分野の民生カメラでも、4K化<sup>94)</sup>が進み、画質面では放送用や業務用カメラには及ばないものの、コンテンツのヴァリエーションの拡大に貢献している。

8K撮影可能なカメラについても、市販モデルに関する報告がされている<sup>95) 96)</sup>。文献<sup>95)</sup>では、8K単板カラーセンサを使用しており、ユニット交換によりハードウェア構成が容易に変更できるため、一旦6Kセンサなど低解像度モデルを購入したのち、センサユニットをアップデートし、8K化することが可能である。文献<sup>96)</sup>も同様に8K単板カラーセンサを用いており、カメラヘッドのみの重量が2 kgと、過去の8Kカメラと比較して大幅な小型化を実現している。

市販されている8Kカメラの種類が充分ではないなか、水平方向に8Kの画素数を有するセンサを用いた市販4Kカメラを利用し、そのセンサ出力(Raw出力)をアップコンバートすることにより、8K相当の解像度を得るための信号処理ユニットが開発されている<sup>97)</sup>。

また試作レベルではあるが、Super 35相当サイズのCMOSセンサを用いて、13STOPのハイダイナミックレンジと広色域化を実現したモデル<sup>98)</sup>や放送現場での導入が進んでいるモデル<sup>99) 100)</sup>についても開発が報告されている。さらにベイヤー配列の単板カラーイメージセンサでも、デモザイク処理が不要な8Kイメージセンサとして133 M画素撮

像素子<sup>101)</sup>と、この撮像素子を用いたカメラの試作が報告されている<sup>102)</sup>。

4K/8K放送において特徴的なのは、解像度だけではなく、ITU-R BT.2020 (Rec. 2020) にて勧告化されている広色域、フレーム周波数の倍速化、さらに高ダイナミックレンジ (HDR) が対象となっていることである。

カメラの広色域化について、Rec. 2020はHDTV映像フォーマットを規定しているITU-R BT.709の色域に比べ格段に広いため、従来の3板式HDTVカメラ用分光プリズムとリニアマトリックス処理による色域変換では、色誤差が多くなることが指摘されている。このため、専用のプリズムを設計し24色マクベスチャート撮像時の色差平均値として0.9を達成した例が報告されている<sup>103)</sup>。

フレーム周波数の倍速 (120Hz) 化について、4Kカメラでは先行して導入が進んでいる。他方8Kにおいてもイメージセンサの開発<sup>104)</sup>が進められており、このセンサを用いたカメラ開発の報告<sup>105)</sup>がされている。さらにフレーム周波数が4倍 (240Hz) のセンサ開発についても報告があり<sup>106)</sup>、8Kハイスピードカメラの開発が期待される。

放送におけるHDR化は、新たな光電変換関数をカメラに、またそれに対応した逆変換をディスプレイに導入することで、カメラの信号処理であるニー処理で抑圧されていた高輝度領域の再現を目指したものである。主に2種類の変換関数が提案<sup>107)</sup><sup>108)</sup>されているが、先行して規格化された関数<sup>108)</sup>を用いたHDR対応カメラ<sup>91)</sup>が開発されている。

RGBともに8K解像度を有し (4:4:4)、広色域、フレーム周波数120Hz、HDRといった放送規格のすべてのパラメータにおいて最上位を実現した唯一の8Kカメラとして、文献<sup>109)</sup>の報告がある。

今後も、高精細撮像デバイスの小型化、高感度化、高フレームレート化等一層の性能の向上が期待される。(山下)

### 3.2 携帯電話用カメラ・デジタルカメラ・ビデオカメラ

小型、薄型化が優先されるスマートフォンのカメラモジュールでは、イメージセンサのセルサイズを縮小することで光学特性を維持しつつ低背化した<sup>110)</sup>。2014年～2015年に発売されたフロントカメラの画素サイズは約1.12 $\mu\text{m}$ 、1,200～2,300万画素が採用されている。採用の多い1,300万1.12 $\mu\text{m}$ の画素は、レンズ光学系モジュールのサイズを維持した状態で4K-UHD画像撮影が可能な画素数であり、表示デバイスの大画面高解像化にも応じた選択と推察される。今後もスマートフォンにおける画素サイズの縮小は緩やかに進み、解像度とモジュールの小型化を両立しつつ、開発品では0.9 $\mu\text{m}$ 、製品としては1.0 $\mu\text{m}$ 前後の画素サイズが採用される見込みである<sup>111)</sup>。画素サイズの縮小、数の増加は、解像度よりも画素分離方式の撮像面位相差<sup>112)</sup><sup>113)</sup>として使用される傾向にある。

画素サイズの縮小は飽和状態であるが、画質改善、高解像の画像を撮影するための技術には進展がみられる。光学

機構の改良、例えば、光学手ぶれ補正、オートフォーカスといったレンズに駆動機構を必要とする機能やF2.0前後の明るいレンズが小型で薄いカメラモジュール内に実装された。また、光学3倍ズームを薄いボディ内に内蔵した製品<sup>114)</sup>も発表されており、今まではカメラ特有とされた技術もスマートフォンに搭載され始めている。

オートフォーカス、距離情報取得の方式としては、従来から採用されている遮光タイプの撮像面位相差を用いたもの、画素欠陥が発生しない画素分割方式の撮像面位相差に加えて、TOF (光の到達時間計測) を用いた距離センサ<sup>115)</sup>、奥行画像取得も可能な2眼カメラと言った新技術の採用が活発である。

スマートフォンは、通信機能、DSP、GPUによる高速演算処理機能を併せ持っている。高速演算処理は、フィルタリングなど画質の改善の用途にとどまらず、動画や複数撮影した画像から奥行情報の抽出、3次元像合成に代表されるコンピューショナルフォトグラフィー手法を具現化する映像表現アプリケーション<sup>116)</sup>に用いられている。

デジタルカメラでは、2012年にリフォーカスカメラLYTROが発売され、最近では16個のカメラモジュールを搭載し、最大5,200万画素、35～150mm相当のデジタルズーム、F1.2相当のぼかしを生成可能なカメラが発売予定<sup>117)</sup>である。今後、演算処理機能の高速化、低消費電力の進展に伴い、より複雑で高度な処理がリアルタイムで実現可能なインテリジェントカメラとしての進化も期待されるであろう。

デジタル一眼カメラでは、レンズ光学系を含めた入力画像のMTFに対して撮像センサのナイキスト周波数が低い場合にモアレ、偽色が発生する対策として光学ローパスフィルタを入れるが、ローパスフィルタを入れることにより解像度も劣化するため、解決策が模索された。35mm光学系カメラでは、2012年4月にニコンD800/800E (約3,600万画素) が光学LPF有りキャンセルを発売して以降、2014年発売のD810 (約3,600万画素) はLPFなしに統一された。キヤノンは5Ds/5DsR (約5,000万画素) で、光学LPF有りキャンセル両機種を発売し、リコーイメージングは露光中CMOSセンサを微小駆動させる方式で撮像センサの解像度をコントロールするローパスセクタを搭載したPentax K-3を、ソニーはDSC-RX1RM2に液晶の偏光を利用した光学式可変ローパスフィルタを、それぞれ世界初搭載することで、この問題に対応している。各社解像度と相反するLPF有無問題へ異なる対応を行い、ピント位置精度、絞りによる回折、機構ブレへの対応といった光学的要素の改善とともに、高解像度化を進めている。

ビデオカメラでは4k-UHDの採用が本格的に始まり、高速読出し、低消費電力、動画と静止画の同時撮影といった用途に対応する技術開発が進められている。これらの課題に対し、ソニーは裏面照射型センサに信号処理チップを積層

し、12ビット30fps時532mWと低消費電力で高速、 $1.3e_{-rms}$ の低ノイズADC、データ圧縮、静止画と動画の2ストリーム同時出力を可能とした1/1.7インチ、2,000万画素の裏面照射積層センサを開発した<sup>118)</sup>。さらに、動体を撮影する際にローリング歪みが発生する問題への対処として、長年CMOSイメージセンサでの開発が待たれているグローバルシャッタを実現する発表も活発である。オリンパスは400万個の微小バンプで3次元積層の受光層と信号処理層を接続した、1,600万画素のセンサ<sup>119)</sup>を、パナソニックは有機膜を使用した高ダイナミックレンジグローバルシャッタセンサを発表した<sup>120)</sup>。

今後、2020年開催の東京オリンピックに向けて、8K動画の開発、商品化が進められていくと思われ、ここにどのような新しい技術が採用されていくか、各社の動向が気になるところである。

(綱井)

### 3.3 車載用カメラ・セキュリティ用カメラ・産業用カメラ

車載用カメラにおいては、先進運転支援システム(Advanced Driver Assistance System: ADAS)技術の進展に伴い、近年活発な開発が進められている超高感度化イメージセンサ(CMOSイメージセンサ、シングルフォトンアバランシェ増倍センサ(SPAD))と融合したTOF測距システムの報告が増加している。

豊田中央研究所は、ADAS用高解像度光検知および測距システム(High-resolution Light Detection and Ranging Systems: LIDAR)として、半導体レーザとポリゴンミラーからなるスキャン光源を用いたTOF測距システムを報告している<sup>121)</sup>。200×96画素SPAD 2Dアレイを用いて、高感度フォトンカウンティング検出動作信号処理を可能とするSoCを開発し、太陽光相当の背景光下で、測距範囲100m、測定誤差0.14%を実現したとしている。類似の報告は多数あり、ISSCC 2016においても衛星用途であるが、64×64画素のSPADを用いた6kmまでの範囲で0.14%の精度を実現するTOFシステムが報告されている<sup>122)</sup>。レーザ光ビーム広がり角をレンズ系で調整することにより、照射領域幅を調節し、イメージングモードと長距離測距モードを切替える。また、TOFシステムの評価指標の一般的な検討については、文献<sup>123)</sup>で報告されている。

車載用途3D物体検知システムにおいて、従来より、複眼カメラ方式、単眼カメラ方式の優劣が議論されているが、最新のトヨタの自動運転システムでは、前方監視カメラとしては複眼カメラの片方だけを単眼カメラとして使用して白線検知に用いるという折衷案が報告されている<sup>124)</sup>。

また、車載、監視、産業用すべてに広範な応用が期待されるカメラとして、超高速度(1,000万fps)撮像が可能なビデオカメラが東北大より報告されている<sup>125)</sup>。本カメラに搭載した高速CMOSイメージセンサは、画素数400×250、画素サイズは32 $\mu$ m角であり、独自の高速電荷収集フォトダイオード構造により、高速高感度を達成した。1画素あ

たり128個のオンチップメモリーによりグローバルシャッタ動作が可能であり、フルスキャンで500万fps、128フレーム記録、ハーフスキャンで1,000万fps、256フレーム記録が可能である。本カメラの応用範囲は、自動車衝突現象の記録(車載、試験用)、エンジンの燃料噴射の可視化(試験解析用)、プラズマ発光現象のモニタリング(産業用)と極めて広い。

セキュリティ、車載用途として、RGB+IR一体型カメラに対しては常に高い要望がある。オリンパスより、フォトダイオードアレイを2層積層し、上部アレイで可視(RGB)画像を取得、波長が長く、侵入長の長い近赤外光画像を下部フォトダイオードアレイで撮像するCMOSイメージセンサが報告された<sup>126)</sup>。上部へのIR成分と下部へのRGB成分の混色の低減が課題となる可能性はあるものの、従来報告されている単板(RGB+IR, RGB+White)カラーフィルタ方式に比してIR専用画素を設けていない分、解像度は向上している。

セキュリティカメラ、産業用計測カメラにおいて、高解像度化の要求も高まっている。これを実現する有力な方法としてCMOSセンサの信号読出しの高速化、特にAD変換時間の高速化が進んでいる。シングルスロープAD変換(SS-ADC)のクロック周波数を単純に高めることで高速化すると消費電力増加が課題である。複数のランプ信号を用いた高速化が報告されたが、複数信号間の均一性が課題であった。キヤノンは、これらの課題を解決する方法として、デュアルゲインアンプ型シングルスロープ列ADC(SSDG-ADC)を搭載したAPS-Hサイズ2.5億画素CMOSイメージセンサをISSCC 2016において報告した<sup>127)</sup>。信号レベルによって、列回路アンプのゲインを切替えることで、AD変換時間を75%短縮し、ダイナミックレンジも6dB拡大している。

(廣瀬)

## 4. 不可視光撮影技術(特殊撮影技術)

### 4.1 赤外線

赤外線イメージセンサは、赤外線の検出方法により熱型および量子型の2種類に大別される。熱型は赤外線エネルギーによる検出部の温度変化を検出するセンサで、冷却機構が不要であることから一般的な監視、温度計測用途向けに広く利用されている。一方の量子型では、赤外線のフォトンエネルギーにより励起されたキャリアを信号として検出する。冷却機構が必要となるが、極めて高い感度を実現できるため天体観測、軍事用途などで利用されている。近年の赤外線検出器の開発動向の特徴としては、①検出波長のマルチバンド化、②フレキシブル、③新材料・原理・構造の導入、の3点が見られる。以下それぞれについて、紹介していく。

#### (1) 検出波長のマルチバンド化

量子型においてはInAs/GaSb系のTypeII超格子による2波

長検出素子の研究開発が盛んとなっている。本構造では、3~5  $\mu\text{m}$ 帯および8~12  $\mu\text{m}$ 帯の2バンド検出が可能とされている<sup>128)</sup>。256 × 256素子で $6.0 \times 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ <sup>129)</sup>、128 × 128素子で $1.3 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ <sup>130)</sup>が報告されており、今後も高感度化に向けた研究が進んでいくものと思われる。

熱型素子については、原理上は赤外線波長に対する選択性を有しないが、赤外線吸収膜の工夫により波長選択性を付与する試みがなされている。吸収膜上に金属の微細周期構造を形成することで表面プラズモンを誘起し、波長選択性が得られるとの報告<sup>131)~134)</sup>やSiN/SiO積層構造によるSiプロセス準拠の吸収膜<sup>135)</sup>、画素毎に吸収膜を塗り分ける技術<sup>136)</sup>が報告されている。

## (2) フレキシブル化

ウェアラブルや生体計測の観点でさまざまなセンサ・エレクトロニクスのフレキシブル化が進んでいる。赤外線センサにおいては、熱型(焦電型)センサとしてポリフッ化ビニリデン(PVDF)系の有機焦電材料を樹脂基板上に成膜したフレキシブルセンサが報告されている<sup>137)138)</sup>。しかしながら、感度はセラミクス系材料と比較して劣るため、今後も材料やプロセス改善を進める必要があると思われる。また、応用の観点からみるとサーモパイル型やボロメータ型で高感度なセンサの開発も求められるだろう。

## (3) 新材料・原理・構造の導入

熱型センサではMEMS(Micro Electro-Mechanical System)技術を応用した新しい検出素子や、グラフェンのような新規材料を用いた素子が提案されている。従来、赤外線センサにおけるMEMS技術の適用は熱分離構造の形成にあったが、近年提案されているデバイスでは、機械的な振動や構造変化を赤外線検出に用いようとするものが見られる<sup>139)140)</sup>。また、Si以外の材料、例えば、AlNやGaNのような材料とMEMS技術とを組合せた検出素子の提案もなされている<sup>141)~143)</sup>。

グラフェンの赤外線検出素子への応用範囲は広く、検出素子のみならず電極、吸収膜、フィルタなど多岐にわたる。ここでは、グラフェンをボロメータ型センサへ応用した例の紹介<sup>144)</sup>にとどめるが、(2)項のフレキシブルセンサへの応用など今後の展開が注目される。

いずれの技術も、赤外線検出素子の高機能・高感度・低コスト化に繋がるものであり、これからのIoT時代において赤外線センサ利用の拡大に繋がるものと期待される。

(赤井)

## 4.2 X線

フィルムに代わりイメージセンサを用いてX線イメージングを行うデジタルラジオグラフィは、低照射線量(フィルムの数分の1)で撮影できること、現像が不要で画像の確認が瞬時にできること、データを直接PCに保存できること、動画撮像ができること、と多くの特長を持つことか

ら、近年急速に普及している。

X線イメージングに使用される検出器は、単結晶検出器、化合物検出器など幅広い範囲にわたるが、中でもSi単結晶を材料としたものは、最新の半導体技術を使った専用のCCD/CMOSイメージセンサが開発され、多くの種類が存在している。

X線イメージングの主要アプリケーションは、胸部や歯科用レントゲン撮像の医療診断、工業製品や食品の品質管理における非破壊検査、空港の手荷物検査などである。このような用途では、硬X線と呼ばれる20 keV以上のエネルギーのX線を用い、物質に対するその高い透過性を利用して、被写体を透視撮像する。X線検出器には、間接変換型と呼ばれる撮像方式が使われており、その構成は、被写体を透過したX線をシンチレータで受けて、波長550 nm付近を中心とした可視光に変換した後、CCD/CMOSイメージセンサなどで可視光を電荷(電子)信号に変換して読出すものである。

キーデバイスとなるシンチレータは、主流であったGOS(ガドリニウム系蛍光体シンチレータ)に代わり、CsI(ヨウ化セシウム系シンチレータ)が多く用いられている。理由として、CsIは柱状結晶であるため光の広がりが少なく解像度が優れていること、厚膜化により検出効率を向上させることがあげられる。シンチレータとイメージセンサのカップリングは、FOP(Fiber Optic Plate)を介して行い、透過してくるX線をシールドし、イメージセンサの損傷、およびランダムノイズの発生を抑制している。

X線検出器の性能に対する要求は、低被ばくで撮像するための高感度化、大きな被写体を撮像するための大面積化、検査のスループットを向上するための高速化があげられる。

高感度化については、先に述べたシンチレータの検出効率向上に加えて、カップリングのFOPをなくして、シンチレータをイメージセンサに直接蒸着することで、シンチレーション光のロスを大幅に低減することができる。また、イメージセンサに関して、CCDではTDI(Time Delay Integration)動作を利用して、高速かつ高感度の撮像を実現しており、CMOSでは埋め込みフォトダイオード技術と、各画素内に増幅器を内蔵したAPS(Active Pixel Sensor)方式を採用することで、高感度化と低ノイズ化を同時に実現している。

大面積化については、a-Siを材料とする固体イメージセンサが開発されているが、信号の減衰に時間がかかるため、残像の問題から高フレームレートの撮像は困難である。CCD/CMOSイメージセンサチップの大型化も進んでいるが、チップを製造するSiウエハのサイズを超えることはできない。そこで複数のイメージセンサチップを高精度に近接して配置する、タイリングが提案されている。センサチップ間の接合部では、感度が低下する可能性があるが、ソフトウェアによる画像補正により、継ぎ目のない大面積画像

を取得することが可能となっている。

高速化については、一般的なイメージセンサと同じく、信号出力のマルチポート化、およびチップ内にA/Dコンバータを搭載してデジタル信号出力とする手法が取り入れられている。

以上に述べた間接変換型のX線検出器に対し、CMOSなどの信号処理回路にa-Se, CdTe, PbI<sub>2</sub>, HgI<sub>2</sub>などの膜を積層して、X線フォトンに直接電荷信号に変換して読出す方式は、直接変換型と呼ばれる。間接変換型と比べて、感度、解像度にメリットがあるが、現状ではコストが高い。直接変換型の検出器の各画素において、入射したX線フォトン個別に数えて、その総数を信号とするフォトンカウンティング型の検出器が提案されている。一つのX線フォトンから生成される信号電荷量は、そのエネルギーに比例するため、適当な閾値を設けて特定のエネルギーを弁別検出できるというユニークな特長がある。各画素にプリアンプ、ディスクリミネータ、カウンタなどの回路を集積しなければならないが、半導体微細加工技術の進歩に伴い、55 μmの画素ピッチのものが報告されている<sup>145)</sup>。(山本)

## 5. むすび

情報センシング分野におけるここ3年間の技術の進展をまとめた。幅広い分野でさまざまな進展があり、今後も継続的な発展が大いに期待できる。情報センシング技術は、今後さらに加速的に進化し、豊かで安心・安全な生活・環境を提供し、未来を切り拓いていく原動力となることが期待される。

(2016年4月1日受付)

## 〔文 献〕

- 1) 篠原ほか：“1.2 μm裏面照射型イメージセンサにおける飽和信号増大と混色抑制のための3次元構造”，映情学技報，38, 15, pp.7-10 (2014)
- 2) 江崎ほか：“湾曲CMOSイメージセンサ”，映情学技報，38, 37, pp.1-4 (2014)
- 3) 小林ほか：“像面位相差AFと撮像とを全画素で両立した低ノイズ・高感度CMOSイメージセンサ”，映情学技報，39, 35, pp.1-4 (2015)
- 4) A. Morimitsu, et al.: "A 4M pixel full-PDAF CMOS image sensor with 1.58 μm 2 × 1 On-Chip Micro-Split-Lens technology", 映情学技報，39, 36, pp.5-8 (2015)
- 5) 沖野ほか：“広ダイナミックレンジ・低ノイズ有機CMOSイメージセンサ”，映情学技報，38, 15, pp.1-4 (2014)
- 6) A. Nishimura, et al.: "An Over 120dB Simultaneous-Capture Wide-Dynamic-Range 1.6e- Ultra-Low-Reset-Noise Organic-Photoconductive-Film CMOS Image Sensor", 2016 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.110-111 (Feb. 2016)
- 7) S. Shishido et al.: "210ke- Saturation Signal 3 μm-Pixel Variable-Sensitivity Global-Shutter Organic Photoconductive Image Sensor for Motion capture", 2016 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.112-113 (Feb. 2016)
- 8) S. Imura, et al.: "High Sensitivity Image Sensors Overlaid with Thin-Film Gallium Oxide/Crystalline Selenium Heterojunction Photodiodes", IEEE Trans. on Electron Devices, 63, 1, pp.86-91 (2016)
- 9) S. Imura, et al.: "Stacked Image Sensor Using Chlorine-doped Crystalline Selenium Photo-conversion Layer Composed of Size-controlled Polycrystalline Particles", 2015 IEDM Tech. Dig., pp.30.7.1-30.7.4 (Dec. 2015)
- 10) K. Miyakawa et al.: "High Sensitivity CMOS Image Sensor Overlaid with Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CIGS Heterojunction Photodiode", 2016 IS&T International Symposium on Electronic Imaging (Feb. 2016)
- 11) Y. Kurokawa et al.: "High-Sensitivity Image Sensor with Stacked Structure Comprising Crystalline Selenium Photoconductor, Crystalline OS FET and CMOS FET", Proc. 2015 IISW, pp.348-351 (June 2015)
- 12) H. Seo et al.: "Stacked Organic Photoconductive Films and Thin-Film Transistor Circuits Separated by Thin Silicon Nitride for a Color Image Sensor", 2014 IEEE Sensors, pp.1672-1675 (Nov. 2014)
- 13) T. Takagi et al.: "Fabrication of Image Sensor with Organic Photoconductive Films by Stacking Red/Green Component and Blue Component", 2016 IS&T International Symposium on Electronic Imaging (Feb. 2016)
- 14) J. Aoki et al.: "A rolling shutter distortion free 3D stacked image sensor with -160dB parasitic light sensitivity in-pixel storage node", 2013 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.482-483 (Feb. 2013)
- 15) T. Arai et al.: "A 1.1 μm 33Mpixel 240fps 3D-Stacked CMOS Image Sensor with 3-Stage Cyclic-Based Analog-to-Digital Converters", 2016 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.126-127 (Feb. 2016)
- 16) M. Goto et al.: "Pixel-Parallel 3-D Integrated CMOS Image Sensors with Pulse Frequency Modulation A/D Converters Developed by Direct Bonding of SOI Layers", IEEE Trans. on Electron Devices, 62, 11, pp.3530-3535 (2015)
- 17) Y. Lim, et al.: "A 1.1 e- Temporal Noise 1/3.2-inch 8Mpixel CMOS Image Sensor using Pseudo-Multiple Sampling", 2010 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.396-397 (Feb. 2010)
- 18) Y. Chae, et al.: "A 2.1Mpixel 120frame/s CMOS image sensor with column-parallel ΔΣ ADC architecture", 2010 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.394-395 (Feb. 2010)
- 19) M.W. Seo, et al.: "A Low-Noise High Intraframe Dynamic Range CMOS Image Sensor with a 13 to 19b Variable-Resolution Column-Parallel Folding-Integration/Cyclic ADC", IEEE Journal of Solid-State Circuits, 47, 1, pp 272-283 (2012)
- 20) Y. Shinozuka, et al.: "A single-slope based low-noise ADC with input-signal-dependent multiple sampling scheme for CMOS image sensors", Proc. 2015 ISCAS, pp.357-360 (May 2015)
- 21) S.F. Yeh, et al.: "A 0.66e<sup>-</sup><sub>rms</sub> temporal-readout-noise 3D-stacked CMOS image sensor with conditional correlated multiple sampling (CCMS) technique", 2015 Symp. VLSI Circuits Dig. Tech Papers, pp.84-85 (June 2015)
- 22) M.K. Kim, et al.: "A Fast Multiple Sampling Method for Low-Noise CMOS Image Sensors with Column-Parallel 12-bit SAR ADCs", Journal of Sensors, 16, 17, pp 2-14 (2016)
- 23) H. Wakabayashi, et al.: "A 1/1.7-inch 20Mpixel Back-Illuminated Stacked CMOS Image Sensor with Parallel Multiple Sampling", Proc. 2015 IISW, pp.44-47 (June 2015)
- 24) S. Wakashima, et al.: "Analysis of pixel gain and linearity of CMOS image sensor using floating capacitor load readout operation", Proc. 2015 SPIE 9403, Image Sensors and Imaging Systems, pp.94030E-1-10 (Mar. 2015)
- 25) <http://www.ovt.com/news/presskit.php?ID=170>
- 26) <https://news.samsung.com/global/samsung-announces-mass-production-of-industrys-first-mobile-image-sensor-with-1-0%CE%BCm-pixels>
- 27) <http://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/201602/16-013/>
- 28) V.C. Venezia, et al.: "Stack chip technology: New Direction for CMOS Imagers", Proc. 2015 IISW, pp.36-39 (June 2015)
- 29) J. Ahn, et al.: "A 1/4-inch 8Mpixel CMOS Image Sensor with 3D Backside-Illuminated 1.12 μm Pixel with Front-side Deep-Trench Isolation and Vertical Transfer Gate", 2014 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.124-125 (Feb. 2014)
- 30) M. Takase et al.: "First Demonstration of 0.9 μm Pixel Global Shutter Operation by Novel Charge Control in Organic Photoconductive Film", 2015 IEDM Tech. Dig., pp.775-778 (Dec. 2015)
- 31) R. Funatsu, et al.: "133Mpixel 60fps CMOS Image Sensor with 32-Column Shared High-Speed Column-Parallel SAR ADCs", 2015 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.112-113 (Feb. 2015)

- 32) H. Totsuka et al.: "An APS-H-Size 250Mpixel CMOS Image Sensor Using Column Single-Slope ADCs with Dual-Gain Amplifiers", 2016 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.116-117 (Feb. 2016)
- 33) <http://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/200806/08-069/index.html>
- 34) V.C. Venezia et al.: "Stack Chip Technology: A New Direction for CMOS Imagers", Proc. 2015 IISW, pp.36-39 (June 2015)
- 35) "Samsung Heralds a New Era of Photography with the Samsung NX1", <http://www.samsungmobilepress.com/2014/09/15/Samsung-Heralds-a-New-Era-of-Photography-with-the-Samsung-NX1-1>
- 36) <http://www.sony.jp/CorporateCruise/Press/201506/15-0626B/>
- 37) K. Nishimura et al.: "An Over 120dB Simultaneous-Capture Wide-Dynamic-Range 1.6e- Ultra-Low-Reset-Noise Organic-Photoconductive-Film CMOS Image Sensor", 2015 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.110-111 (Feb. 2015)
- 38) <http://www.invisage.com/news>
- 39) T. Kondo et al.: "A 3D stacked CMOS image sensor with 16Mpixel global-shutter mode and 2Mpixel 10000fps mode using 4 million interconnections", 2015 Symp. VLSI Circuits, Digest of Technical Papers, pp.4-5 (June 2015)
- 40) S. Nasuno et al.: "A CMOS Image Sensor with 240 $\mu$ V/e- Conversion Gain, 200ke- Full Well capacity and 190-1000nm Spectral Response", Proc. 2015 IISW, pp.312-315 (June 2015)
- 41) <http://cweb.canon.jp/newsrelease/2015-07/pr-me20fsh.html>
- 42) E. Fossum: "Application of Photon Statistics to the Quanta Image Sensor", Proc. 2013 IISW, pp.313-316 (June 2013)
- 43) F. Kusuhara et al.: "Analysis and reduction of Floating Diffusion Capacitance Components of CMOS Image Sensor for Photon-Countable Sensitivity", Proc. 2015 IISW, pp.120-123 (June 2015)
- 44) J. Ma et al.: "Quanta Image Sensor Jot with Sub 0.3e- r.m.s. Read Noise and Photon Counting Capability", IEEE Electron Device Letters, 36, 9, pp.926-928 (Sep. 2015)
- 45) B. Mamdy et al.: "A low-noise, P-type, vertically-pinned and back-side illuminated pixel structure for image sensor applications", Proc. 2015 IISW, pp.361-364 (June 2015)
- 46) A. Boukhayma et al.: "A 0.4e-rms Temporal Readout Noise, 7.5 $\mu$ m pitch and a 66% fill factor Pixel for Low Light CMOS Image Sensors", Proc. 2015 IISW, pp.365-368 (June 2015)
- 47) Q. Yao et al.: "CMOS image sensor reaching 0.34e-RMS read noise by inversion-accumulation cycling", Proc. 2015 IISW, pp.369-372 (June 2015)
- 48) M.W. Seo et al.: "A 0.27e-rms Read Noise 220 $\mu$ V/e- Conversion Gain Reset-Gate-Less CMOS Image Sensor with 0.11 $\mu$ m CIS Process", IEEE Electron Device Letters, 36, 12, pp.1344-1347 (2015)
- 49) R. Funatsu et al.: "133Mpixel 60fps CMOS image sensor with 32-column shared high-speed column-parallel SAR ADCs", 2015 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.112-113 (Feb. 2015)
- 50) T. Arai et al.: "A 1.1 $\mu$ m 33Mpixel 240fps 3D-Stacked CMOS Image Sensor with 3-Stage Cyclic-Based Analog-to-Digital Converters", 2016 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.126-127 (Feb. 2016)
- 51) S. Sugawa et al.: "A 20Mfps Global Shutter CMOS Image Sensor with Improved Sensitivity and Power Consumption", Proc. 2015 IISW, pp.166-169 (June 2015)
- 52) F. Mochizuki et al.: "Single-Shot 200Mfps 5 $\times$ 3-Aperture Compressive CMOS Imager", 2015 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.116-117 (Feb. 2015)
- 53) S. Wakashima et al.: "A Linear Response Single Exposure CMOS Image Sensor with 0.5e- Readout Noise and 76ke- Full Well Capacity", 2015 Symp. VLSI Circuits, Dig. Tech. Papers, pp.C88-C89 (June 2015)
- 54) M. Mori et al.: "A 1280 $\times$ 720 Single-Photon-Detecting Image Sensor with 100dB Dynamic Range Using a Sensitivity-Boosting Technique", 2016 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.120-121 (Feb. 2016)
- 55) T. Willassen et al.: "A 1280 $\times$ 1080 4.2 $\mu$ m Split-diode Pixel HDR Sensor in 110nm BSI CMOS Process", Proc. 2015 IISW, pp.377-380 (June 2015)
- 56) K. Nishimura et al.: "An Over 120dB Simultaneous-Capture Wide-Dynamic-Range 1.6e- Ultra-Low-Reset-Noise Organic-Photoconductive-Film CMOS Image Sensor", 2016 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.110-111 (Feb. 2016)
- 57) S. Nasuno et al.: "A CMOS Image Sensor with 240 $\mu$ V/e- Conversion Gain, 200ke- Full Well Capacity and 190-1000nm Spectral Response", Proc. 2015 IISW, pp.312-315 (June 2015)
- 58) X. Wang et al.: "A 4M, 1.4e- noise, 96dB dynamic range, back-side illuminated CMOS image sensor", Proc. 2015 IISW, pp.316-319 (June 2015)
- 59) Y. Takemoto et al.: "Multi-storied photodiode CMOS image sensor for multiband imaging with 3D technology", 2014 IEDM Tech. Dig., pp.771-774 (Dec. 2015)
- 60) A. Lambrechts et al.: "A CMOS-compatible, integrated approach to hyper- and multispectral imaging", 2014 IEDM Tech. Dig., pp.261-264 (Dec. 2014)
- 61) 松島ほか: "注目領域画素並列検出による3次元形状取得向けCMOSイメージセンサ", 映像学誌, 69, 3, pp.J80-J85 (2015)
- 62) N.A.W. Dutton et al.: "Oversampled ITOF Imaging Techniques using SPAD-based Quanta Image Sensors", Proc. 2015 IISW, pp.170-173 (June 2015)
- 63) E. Tadmor et al.: "A High QE, Fast Shuttered CMOS Image Sensor with a Vertical Overflow Drain Shutter Mechanism", Proc. 2015 IISW, pp.174-177 (June 2015)
- 64) F. Mochizuki et al.: "A multi-aperture compressive time-of-flight CMOS imager for pixel-wise coarse histogram acquisition", Proc. 2015 IISW, pp.178-181 (June 2015)
- 65) 香川ほか: "小型複眼カメラの医用応用", 映像学技報, 38, 23, pp.49-52 (2014)
- 66) H. Tabata et al.: "Spatiotemporally Varying Exposure Imaging for High Quality Image Reconstruction", Image sensor workshop (IISW'15), 7.14 (June 2015)
- 67) H. Yamashita et al.: "Enhancing Low-light Color Images using an RBG-NIR Sensor", IEEE International Conference on Visual Communications and Image Processing (VCIP), pp.119-121 (Dec. 2015)
- 68) R. Carmona-Galán et al.: "Automatic DR and spatial sampling rate adaptation for secure and privacy-aware ROI tracking based on focal-plane image processing", Proc. 2015 IISW, pp.397-400 (June 2015)
- 69) 影山ほか: "画像の位相シフトを利用した超解像再構成処理の適用可能性と2次元拡張に関する検討", 映像学誌, 68, 6, pp.J247-J251 (2014)
- 70) 小林ほか: "IPSFに基づく動きぼけと奥行きぼけの同時復元", 映像学誌, 68, 9, pp.J399-J407 (2014)
- 71) 佐藤ほか: "コマ収差による3次位相変化を用いたWavefront CodingにおけるPSF補正に基づく復元画像の画質改善", 映像学誌, 69, 3, pp.J91-J97 (2015)
- 72) 園田ほか: "さまざまな符号化撮像を実現する能動絞りカメラ", 日本光学学会年次学術講演会 Optics & Photonics Japan 2015 講演予稿集, 30aES15 (Oct. 2015)
- 73) 山下ほか: "RGB-NIR単板イメージセンサを用いた低照度カラー画像の画質改善", 映像学技報, 39, 17, pp.17-20 (2015)
- 74) 久下沼ほか: "低照度マルチアパーチャ画像からのデプスマップ推定", 映像学技報, 39, 17, pp.5-8 (2015)
- 75) 望月ほか: "画素内圧縮型マルチアパーチャ超高速イメージセンサによる200Mfpsバースト撮影", 映像学技報, 39, 16, pp.45-48 (2014)
- 76) 山崎ほか: "時空間の露光制御機能を持つイメージセンサと画質向上のための撮像・処理方式", 映像学誌, 69, 3, pp.J106-J112 (2015)
- 77) T. York, et al.: "220 $\times$ 128 120mW 60frames/s Current Mode Polarization Imager for in Vivo Optical Neural Recording", Proc. 2014 ISCAS, pp.1849-1852 (June 2014)
- 78) T. Tokuda, et al.: "CMOS sensor-based palm-sized in-line optical analysis device for microchemistry systems", Electronics Letters, 50, 17, pp.1222-1224 (2014)
- 79) L. Anzagira, et al.: "Two Layer Image Sensor Pixel Concept for Enhanced Low Light Color Imaging", Proc. 2015 IISW, pp.70-73 (June 2015)

- 80) R. Kuroda, et al.: "A 80% QE High Readout Speed 1024 Pixel Linear Photodiode Array for UV-VIS-NIR Spectroscopy", Proc. 2015 IISW, pp.78-81 (June 2015)
- 81) L. Hong, et al.: "A Fully Integrated CMOS Fluorescence Biosensor with on-chip Nanophotonic Filter", Proc. of 2015 Symp. VLSI Circuits, pp.C206-C207 (June 2015)
- 82) M. Gracia, et al.: "A 1300 × 800, 700mW, 30fps Spectral Polarization Imager", Proc. 2015 ISCAS, pp.1106-1109 (June 2015)
- 83) <http://www.nanolambda.net/>
- 84) T. Kobayashi, et al.: "Optical communication with brain cells by means of an implanted duplex micro-device with optogenetics and Ca<sup>2+</sup> fluorimaging", Scientific Reports 6, 21247 (2016)
- 85) H. Nakazawa, et al.: "High-Sensitivity Charge-Transfer-Type pH Sensor with Quasi-Signal Removal Structure", IEEE Trans. on Electron Devices, 61, 1, pp.136-140 (2015)
- 86) L. Parmesan, et al.: "A 256 × 256 SPAD array with in-pixel Time to Amplitude Conversion for Fluorescence Lifetime Imaging Microscopy", Proc. 2015 IISW, pp.296-299 (June 2015)
- 87) M.W. Seo, et al.: "Time-resolved imaging device with high-speed modulators for fluorescence lifetime measurement system", Proc. 2015 IISW, pp.251-254 (June 2015)
- 88) <http://www.hitachi-kokusai.co.jp/products/broadcast/camera/sk-uhd4000/index.html>
- 89) [http://www.ikegami.co.jp/news/detail.html?news\\_id=985](http://www.ikegami.co.jp/news/detail.html?news_id=985)
- 90) <https://pro.sony.com/bbsc/ssr/show-4kliveproduction/resource/latest.bbscems-assets-show-4kliveproduction-hdc4300landingpage.shtml>
- 91) K. Weber : "4K, HDR and Further Image Enhancements for Live Image Acquisition", SMPTE Annual Technical Conference and Exhibition 2015 (2015)
- 92) <https://www.blackmagicdesign.com/jp/products/cinematiccameras>
- 93) <https://www.aja.com/jp/products/cion>
- 94) 例えば, <http://shop.gopro.com/APAC/cameras>
- 95) <http://www.red.com/news/post-nab-2015-recap>
- 96) <http://www.astrodesign.co.jp/japanese/product/ah-4800>
- 97) K. Ichikawa et al.: "Development of Super Hi-Vision (8K) Baseband Processor Unit BPU-8000", SMPTE Annual Technical Conference and Exhibition 2014 (2014)
- 98) <http://web.canon.jp/pressrelease/2015/p2015sep08j02.html>
- 99) <http://www.hitachi-kokusai.co.jp/news/2015/news150406.html>
- 100) [http://www.ikegami.co.jp/news/detail.html?news\\_id=907](http://www.ikegami.co.jp/news/detail.html?news_id=907)
- 101) R. Funatsu, et al.: "A 133-Mpixel 60-fps CMOS Image Sensor with 32-Column Shared High-Speed Column Parallel SAR-ADCs", 2015 ISSCC Dig. Tech. Papers, 6.2 (Feb. 2015)
- 102) T. Nakamura, et al.: "Development of an 8K full-resolution single-chip image acquisition system", 2016 IS&T International Symposium on Electronic Imaging, IMSE-271 (Feb. 2016)
- 103) 添野ほか: "スーパーハイビジョンカメラの広色域化", 2013映情学年大講演予稿集, 10-5-1 (2013)
- 104) 安江ほか: "DMOSキャパシタを用いた3,300万画素, 120Hz, 14ビット CMOS イメージセンサの開発", 映情学技報, 39, 35, pp.25-28 (2015)
- 105) K. Kitamura, et al.: "Full-specification 8K Super Hi-Vision camera", 1st International Conference on Advanced Imaging (ICAI 2015), T304-02, pp.366-369 (2015)
- 106) T. Arai et al.: "1.1 μm 33Mpixel 240fps 3D-Stacked CMOS Image Sensor with 3-Stage Cyclic Based Analog-Digital Converters", 2016 ISSCC Dig. Tech. Papers, 6.9, pp.126-127 (Feb. 2016)
- 107) ARIB STD-B67: "ESSENTIAL PARAMETER VALUES FOR THE EXTENDED IMAGE DYNAMIC RANGE TELEVISION (EIDRTV) SYSTEM FOR PROGRAMME PRODUCTION" (2015)
- 108) SMPTE ST 2084: "High Dynamic Range Electro-Optical Transfer Function of Mastering Reference Displays" (2014)
- 109) K. Kitamura et al.: "Full-specification 8K Camera System", Proc. NAB 2016 (2016)
- 110) 中條: "スマートフォンが要求する超低背カメラモジュールーカメラモジュールの超低背化を実現するための要素技術ー", 映情学技報, 37, 40, pp.49-54 (2013)
- 111) 小林: "スマートフォン向けイメージセンサに望むことー画素特性とその改善ー", 映情学技報, 39, 35, pp.21-24 (2015)
- 112) 小林ほか: "像面位相差 AF と撮像とを全画素で両立した低ノイズ・高感度 CMOS イメージセンサ", 映情学技報, 39, 35, pp.1-4 (2015)
- 113) A. Morimitsu et al.: "A 4M pixel fill-PDAF CMOS Image Sensor with 1.58 μm 2x1 On-chip Micro-split-lens Technology", 映情学技報, 39, 35, pp.5-8 (2015)
- 114) ASUS HOYA: ZenFone Zoom (Jan. 2016)
- 115) Google: Project Tango (June 2015)
- 116) P. Ondruška et al.: "Mobile Fusion Real-time Volumetric Surface Reconstruction and Dense Tracking on Mobile Phones", IEEE Trans. Vis Computer Graph., 21, 11, pp.1251-1258 (2015)
- 117) Light L16, <https://light.co/> (Oct. 2015)
- 118) 貝沼ほか: "高速・高画質・高機能を有する 1/1.7型 2,000万画素積層型 CMOS イメージセンサ", 映情学技報, 39, 16, pp.1-4 (2015)
- 119) 近藤ほか: "1,600万画素グローバルシャッターモード搭載 400万マイクロバンプ接続積層イメージセンサ", 映情学技報, 39, 35, pp.9-12 (2015)
- 120) S. Shishido et al.: "210ke- Saturation Signal 3 μm-Pixel Variable-Sensitivity Global-Shutter Organic Photoconductive Image Sensor for Motion Capture", 2016 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.112-113 (Feb. 2016)
- 121) C. Niclass, et al.: "A 0.18 μm CMOS SoC for a 100-m-Range 10-Frame/s 200 × 96-Pixel Time-of-Flight Depth Sensor", IEEE Journal of Solid-State Circuits, 49, 1, pp.315-329 (2014)
- 122) M. Perenzoni, et al.: "A 64 × 64-Pixel Digital Silicon Photomultiplier Direct ToF Sensor with 100MPhotons/s/pixel Background Rejection and Imaging/Altimeter Mode with 0.14% Precision up to 6km for Spacecraft Navigation and Landing", 2016 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.118-119 (Feb. 2016)
- 123) J. Kostamovaara, et al.: "On Laser Ranging Based on High-Speed/Energy Laser Diode Pulses and Single-Photon Detection Techniques", IEEE Photonics Journal, 7, 2, 7800215 (2015)
- 124) 日経 Automotive, 2015.12, pp.54-59 (2015)
- 125) 鈴木ほか: "常用光感度 ISO16000 に高めた最高撮像速度 1,000万コマ/秒の高速ビデオカメラシステムによる高速現象の可視化", 映情学技報, 40, 12, pp.25-28 (2016)
- 126) 竹本ほか: "3次元積層技術を用いた積層フォトダイオード CMOS イメージセンサによるマルチバンドイメージング", 映情学技報, 40, 12, pp.5-8 (2016)
- 127) H. Totsuya et al.: "An APS-H-Size 250MPixel CMOS Image Sensor Using Column Single-Slope ADC with Dual-Gain Amplifiers", 2016 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.116-117 (2016)
- 128) R. Rehm, et al.: "InAs/GaSb superlattice infrared detectors", Infrared Physics & Technology, 70, pp.87-92 (2015)
- 129) Z.Z. Bai, et al.: "320 × 256 dual-color mid-wavelength infrared InAs/GaSb superlattice focal plane arrays", Journal of Infrared and Millimeter Waves, 34, pp.716-720 (2015)
- 130) X. Chen: "Short-wavelength infrared focal plane array based on type-II InAs/GaSb superlattice", Optical and Quantum Electronics, 48, 84, pp.1-8 (2016)
- 131) S. Ogawa, et al.: "Polarization selective uncooled infrared sensor using an asymmetric two-dimensional plasmonic absorber", Proceedings of SPIE, 9070, 90701T (2014)
- 132) S. Ogawa, et al.: "Three-dimensional plasmonic metamaterial absorbers for high-performance wavelength selective uncooled infrared sensors", Proceedings of SPIE, 9070, 90701Y (2014)
- 133) S. Ogawa, et al.: "Polarization selective uncooled infrared sensor using a one-dimensional plasmonic grating absorber", Proceedings of SPIE, 9451, 94511K (2015)
- 134) Y. Li, et al.: "Plasmonic induced triple-band absorber for sensor application", Optics Express, 23, pp.17607-17612 (2015)
- 135) 大石ほか: "γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Si 基板上の結晶配向 PZT 薄膜赤外線センサと CMOS 回路インテグレーション", 映情学技報, 39, 5, pp.27-34 (2015)

- 136) M. Oussalah, et al: "Multispectral Thin Film Coating on Infrared Detector", Proceedings of SPIE, 9627, 96271W (2015)
- 137) A.K. Batra, et al: "Pyroelectric Properties of PVDF:MWCNT Nanocomposite Film for Uncooled Infrared Detectors and Medical Applications", Integrated Ferroelectrics, 158, pp.98-107 (2014)
- 138) L. Tian, et al: "The performance of the free-standing P (VDF-TrFE) infrared detector", Journal of Infrared and Millimeter Waves, 34, pp.654-657 (2015)
- 139) U. Adiyani: "A 35- $\mu\text{m}$  Pitch IR Thermo-Mechanical MEMS Sensor with AC-Coupled Optical Readout", IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 21, 2701306 (2015)
- 140) J.Q. Han, et al: "Resonant IR detectors based on microbridge resonators electrothermally excited and piezoresistively detected using polysilicon resistors of negative TCR", Journal of Infrared and Millimeter Waves, 34, pp.134-139 (2015)
- 141) K. Yamamoto, et al: "Pyroelectric aluminum nitride micro electro-mechanical systems infrared sensor with wavelength-selective infrared absorber", Applied Physics Letters, 104, p.111111 (2014)
- 142) W.C. Ang, et al: "Uncooled resonant infrared detector based on aluminum nitride piezoelectric film through charge generations and lattice absorptions", Applied Physics Letters, 104, 201110 (2014)
- 143) V.J. Gokhale, et al: "Uncooled Infrared Detectors Using Gallium Nitride on Silicon Micromechanical Resonators", Journal of Microelectromechanical Systems, 23, 803-810 (2014)
- 144) B.S. Karasik, et al: "Monolayer graphene bolometer as a sensitive far-IR detector", Proceedings of SPIE, 9153, 915309 (2014)
- 145) R. Ballabriga: "The Design and Implementation in 0.13 $\mu\text{m}$  CMOS of an Algorithm Permitting Spectroscopic Imaging with High Spatial Resolution for Hybrid Pixel Detectors, CERN-THESIS-2010-055 (2009)



**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。CMOSイメージセンサ等の開発に従事。博士(工学)。正会員。



**大竹 浩** 1982年, 東京工学院専門学校テレビ放送工学科卒業。同年, NHK入局。同年より, 放送技術研究所に勤務し, 現在に至る。固体撮像デバイスの研究に従事。正会員。



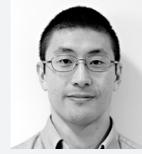
**池辺 将之** 2000年, 北海道大学大学院電子情報工学専攻博士課程修了。2000年, 大日本印刷株式会社半導体製品研究所。2004年, 北海道大学准教授。信号処理アルゴリズムとその集積回路化の研究, およびCMOSイメージセンサの高機能化の研究に従事。博士(工学)。



**佐藤 俊明** 1984年, 東京理科大学大学院理学研究科修士課程修了。同年, キヤノン(株)入社。フォトセンサ等の機能デバイスおよびアナログ信号処理回路の設計・開発に従事。2008年, Aptina Imaging (現オン・セミコンダクター)入社。CMOSイメージセンサの設計・開発に従事。



**小林 昌弘** 2004年, 東京工業大学大学院電気電子工学専攻修士課程修了。同年, キヤノン(株)入社。以来, CMOSイメージセンサの設計, 研究開発に従事。現在, 同社半導体デバイス要素開発センター主任研究員。正会員。



**黒田 理人** 2010年, 東北大学大学院工学研究科博士課程修了。2007年~2010年, 日本学術振興会特別研究員(DC1)。2010年, 東北大学大学院工学研究科助教。2014年, 同准教授。低ノイズトランジスタ技術, 高機能CMOSイメージセンサ等の研究に従事。博士(工学)。正会員。



**浜本 隆之** 1992年, 東京理科大学工学部電気工学科卒業。1997年, 東京大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了。現在, 東京理科大学工学部電気工学科教授。画像情報処理, コンピュータショナルセンサ等の研究に従事。工学博士。正会員。



**小室 孝** 2001年, 東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻博士課程修了。同年, 科学技術振興事業団研究員。2002年, 東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻助手。2005年, 同講師。2011年, 埼玉大学大学院理工学研究科数理電子情報部門准教授。高速画像処理とその応用に関する研究に従事。博士(工学)。正会員。



**徳田 崇** 1998年, 京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。1998年, 日本学術振興会特別研究員(PD)。1999年, 奈良先端科学技術大学院大学物質創成科学研究科助手。2008年, 同大学准教授。半導体フォトニクスデバイス, 特にパイオイメーキングデバイス, ニューロエレクトロニクスデバイスの研究に従事。博士(工学)。正会員。



**山下 誓行** 1995年, 京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科博士前期課程修了。同年, NHK入局。京都放送局を経て, 1999年より, 放送技術研究所にて, 高速度撮像技術, 超高精細撮像技術および立体撮像技術に関する研究に従事。現在, 同研究所テレビ方式研究部上級研究員。米SMPTE会員。正会員。



**網井 史郎** 1990年, 武蔵工業大学大学院工学研究科修士課程修了。同年, 日本電気(株)入社。以来, イメージセンサの設計開発に従事, 2008年(株)ニコン入社。イメージセンサ, カメラの開発等に従事。正会員。



**廣瀬 裕** 1987年, 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。1995年, Princeton大学大学院Ph.D.取得。1996年, 日本テキサス・インスツルメンツ(株)入社。2001年, 松下電器産業(現パナソニック)(株)入社。半導体デバイス, イメージセンサ開発に従事。正会員。



**赤井 大輔** 2001年, 豊橋技術科学大学大学院電気・電子工学専攻修士課程修了。2004年, 同大学電子・情報工学専攻博士課程修了。同年豊橋技術科学大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー(VBL)研究員, 2005年, 同大学助手。2011年より, 同大学エレクトロニクス先端融合研究所(EIIRIS)助教。シリコン基板上への酸化物・強誘電体薄膜成長およびそれらの薄膜を用いたセンサ・アクチュエータとシリコンデバイスとの融合に関する研究に従事。博士(工学)。



**山本 洋夫** 1994年, 千葉大学工学部電気電子工学科卒業。同年, 浜松トニクス(株)入社。固体事業部にて, CMOSイメージセンサ, X線フラットパネルセンサ, 近赤外InGaAsイメージセンサなどの設計, 開発に従事。