情報センシングの研究開発動向

浜本隆之[†1], 大高俊徳[†2], 池辺将之[†3], 樽木久征[†4], 小林昌弘[†5], 黒田理人[†6], 小室　孝[†7], 德田　崇[†8], 船津良平[†9], 近藤　亨[†10], 廣瀬　裕[†11], 藤澤大介[†12], 山本洋夫[†13]

1．まえがき

映像情報メディアのさまざまなシステムにおいて，その入力部にあたるカメラはシステム全体の品質を大きく左右する重要な技術である．カメラを構成する部品の中でも，像情報を時空間サンプリングし電気信号に変換するイメージセンサは，最も重要なデバイスである．現在，イメージセンサは，スマートフォンやディジタルカメラなどの電子機器に広く搭載されているが，車載やセキュリティ，IoTなどへの活用により，その活躍の場がさらに広がりつつある．

本稿は，2016年4月以降の約2年間におけるイメージセンサやカメラ等の画像情報のセンシング分野における技術進展を，情報センシング研究委員会の構成員が分担して記述したものである．以降，2章では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，特殊機能について，3章では放送用カメラ・高精細カメラ，携帯電話用カメラ・ディジタルカメラ・ビデオカメラ，車載用カメラ・セキュリティ用カメラ・産業用カメラについて，4章では不可視光撮像技術として赤外線，X線について，それぞれ説明する．

†1 東京理科大学 工学部 電気工学科
†2 ブリルニクスジャパン株式会社
†3 北海道大学 大学院情報科学研究科
†4 東芝デバイス＆ストレージ株式会社
†5 キヤノン株式会社
†6 東北大学 大学院工学研究科
†7 埼玉大学 大学院理工学研究科
†8 奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科
†9 NHK 放送技術研究所
†10 オリンパス株式会社
†11 パナソニック株式会社
†12 三菱電機株式会社
†13 浜松ホトニクス株式会社
"Image Electronics Information Sensing" by Takayuki Hamamoto (Faculty of Engineering, Tokyo University of Science, Tokyo), Toshinori Ohtaka (Brillnics Japan Inc, Tokyo), Masayuki Ikebe (Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University, Hokkaido), Hisayuki Taruki (Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation, Kanagawa), Masahiro Kobayashi (Canon Inc., Kanagawa), Rihito Kuroda (Graduate School of Engineering, Tohoku University, Miyagi), Takashi Komuro (Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, Saitama), Takashi Tokuda (Graduate School of Science and Technology, Nara Institute of Science and Technology, Nara), Ryohei Funatsu, (Science and Technology Research Laboratories, NHK, Tokyo), Toru Kondo (Olympus Corporation, Tokyo), Yutaka Hirose (Panasonic Corporation, Kyoto), Daisuke Fujisawa (Mitsubishi Electric Corporation, Hyogo), Hiroo Yamamoto (Hamamatsu Photonics K.K., Shizuoka)

2．イメージセンサ

2.1　センサ構造・材料

ここ2年間を振り返ると，積層技術に関する目覚ましい進歩に伴い，3次元積層型イメージセンサの研究開発が活発に行われてきたことが特徴的であった．特に，Wafer-to-Wafer積層技術，多層ハイブリット積層技術，Chip-on-Chip積層技術と，現時点で考えられる全種類の積層技術を用いたイメージセンサの開発報告がなされ，かつ構造を上手く利用した新しいAD変換器アーキテクチャの発表が印象深い．さらに，シリコン下地技術においては，近赤外波長帯域の感度を飛躍的に向上させる，いわゆるピラミッド構造の実用化を示唆する報告などもあり，センサ構造・材料技術の観点からは特筆すべき項目が多い期間であったと言えるが，ここでは代表的な報告に限って紹介する．

Wafer-to-Wafer接続技術には，Through Silicon Via（TSV）を用いたダイ間の電気的な接続技術から，より微細なCu-Cu電極を用いた，いわゆるダイレクト・ハイブリットボンディング技術へと進化してきている．22.5M画素で1μm画素ピッチのイメージセンサに，Cu-Cuハイブリットボンディングが適応され，良好な結果を得ている[1)2)]．また，画素/DRAM/ロジックチップの3層を積層したイメージセンサの開発が報告された[3)]．DRAMを積層することにより，イメージセンサからの出力帯域を従来のシリアルI/F技術より向上させることができ，高速ローリングシャッタによってローリングシャッタ歪みを抑え，多画素でのスローモーション撮像を実現した．一方，Wafer-to-Wafer接続技術はイメージセンサと同じチップ面積を下層のチップが持つ必要があるため，チップ面積を使い切るという実用的な課題があったが，必要な回路部分である列並列ADC回路だけを38k個40μmピッチのマイクロバンプで積層するChip-on-Chip接続が報告された[4)]．

3次元積層型イメージセンサのAD変換器構造では，画素

アレイ並列でAD変換器を下層チップに実装した4.1-Mpixel 280 fpsのイメージセンサが報告された[5]．領域ごとに空間解像度を可変することなどで，顔などアプリケーション上で重要な部分だけを高解像度で高速に読出し，それ以外は低解像度で低速に読み出すなど，自由度の高いROI読出しを実現することで，センサ出力帯域幅と消費電力を抑えたインテリジェントな撮像ができることを示した．さらに，2018年のInternational Solid-State Circuits Conference（ISSCC）では，画素毎にAD変換器を搭載し，フォトダイオード画素と画素レベルAD変換器をCu-Cuハイブリットボンディングで接続した，1.46-Mpixel 14bのDigital Pixel Sensor（DPS）が報告された[6]．1画素内に複数のCu-Cuボンディングが使用できるレベルにまで電極ピッチが下がることで実現する新しいAD変換器構造であり，積層技術の向上に伴い従来の性能を超えるグローバルシャッタイメージセンサが期待できる．

また，シリコン下地技術としては，近赤外波長帯域の感度を飛躍的に向上させる，いわゆるInverted Pyramid Array（IPA）構造によって，波長850 nmで30%以上の光吸収率を実現した[7,8]．1.2 μm画素ピッチで400 nm IPAピッチの画素の場合，波長帯域700～1200 nmにおいて75%の感度向上を達成した．この構造は，Pyramid Surface for Diffraction（PSD）とも呼ばれ，適切な処理を行った後は，暗電流が従来と同等レベル，Deep Trench Isolation（DTI）と組み合わせることにより，空間解像度も従来と同等レベルにまで保てることを示した．3 μm画素においてフォトダイオードの中央に分離レイヤを，表面と裏面のp+層から離れたところに作り込むことにより，線形飽和電子数40 kelと高感度（QEGreen=78.8%）を実現した[9,10]．DTIに電極を埋め込み，キャパシタとして利用するCapacitive DTI（CDTI）によって，3.2 μm BSI画素で73fFの画素内容量を実現し，912 k個の正孔を保持できる画素構造により，ダイナミックレンジ115 dBを実現した[11]．

最後に光学技術としては，表面照射型グローバルシャッタイメージセンサに最適な光導波路構造により，3.4 μm画素で28 kel/lxsの感度と−89 dBのParasitic Light Sensitivity（PLS）を達成した[12]．2.8 μm画素の表面照射型グローバルシャッタイメージセンサにおいて，インナーレンズの最適化により，62%のQEと7700の1/PLS値を実現した[13]．Lateral Overflow Integration Capacitor（LOFIC）画素のグローバルシャッタイメージセンサにおいて，ライトシールドパターンを工夫することで，−83/−79 dB（F10/F1.8）のPLSを実現した[14]．

ここでは，主に構造と材料の観点から特筆すべき報告を紹介した．今後も積層技術がこれまで成し得なかった新しいイメージセンサアーキテクチャの実現を後押しし，イメージセンサをより高次元なセンサへと昇華させることが期待される．（大高）

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A/D変換技術の研究開発も継続されている．近年，カラムA/D変換技術に次ぐ技術として，積層構造を利用したブロック型回路構成に注目が集まっている．積層型センサでは，ピクセル部と裏面照射型センサの支持基板であるロジック部にそれぞれ適切なプロセスを割り当てることができる．ブロック型A/Dの構成は，センサ要素をブロックごとに区切り，そのブロックの下層を貫通電極（TSV）で接続し，A/D変換器を積層する．本構成の具体的な報告は2010年代からなされており，この方式に対する9bit逐次比較型A/D変換器（100 μm × 95 μm）の適用についての議論・報告もなされている[15]．利点は，ピクセルとA/D変換器の距離を短くすることで，① 外乱による影響を抑制する，② 寄生成分を減らし変換速度を向上させる，ことが挙げられる．また，ピクセルアレイ全体のタイミングを揃うことで，グローバルシャッタ動作を回路構成の面から実現することも挙げられる．ブロック型A/Dにより，擬似的なグローバルシャッタを実現するものとして，4×4の高ダイナミックレンジ拡張用画素（ソースフォロアを含む）に対し，シングルスロープ方式に向けた比較器（pMOS入力，7 Tr.）と12bit DRAMセル4系統（CDS（Correlated Double Sampling）への対応：ノイズ出力2種，信号出力2種）を積層する報告がなされている[16]．読み出し・書き込み共通ラインにより12bitデータを扱う．4×4ブロックにおいてグローバルシャッタ動作，ブロック内ではスキャン動作となる．

ブロック型構成では，最終的にピクセルとA/D変換器の1対1接続が目標となる．そこで，完全空乏型SOIプロセスを用いて，ピクセルと周波数変調型A/D変換器を積層する報告がされている[17]．リニアな入出力特性と96 dBもの高ダイナミックレンジを実現している．本方式は基本的に連続サンプリングを行うため，理論的には平均化によるノイズ低減を見込める．周波数変調方式は，従来と同様の電荷差分型のCDSを用いることはできない．そのため，出力パルスをトリガとして，内部タイミングパルスを生成し，オートゼロ機構によりピクセルのリセットレベルと回路上の参照電圧レベルを合わせこみ，そこに信号値を加算することでCDSを実現している．今後は画素回路の小面積化が課題となる．

現在，ピクセルの小サイズ（6.7 μm角）化に向けた方式も実証されている[18]．ピクセル回路および，比較器（pMOS入力，14 Tr.）のnMOS要素を上層に実装し，下層にはpMOSおよび，データ保持と転送を行うD-FFチェーンを配置する．A/D変換方式は，シングルスロープ型である．ピクセル毎にアンプを配置した場合，消費電力がピクセル数倍となるため，注意が必要である．本技術では，アンプをサブスレッショルド領域で動作させる（nAの電流）．ゆえに，基本的に応答は極めて遅くなる．そのため，信号遷移がMOS閾値を超えたときに正帰還をかけ，高速な信号

遷移を実現させている．また，D-FF群として，小面積・高速動作に適したダイナミック型のTSPC: True Single Phase CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 方式を採用し，データフローではD-FFチェーン上でグレイコードを転送し，各ピクセルでのシングルスロープA/D動作でデータを退避する．そして，データ排出に合わせてCDSを行う仕組みを採用している．FDのリセット方式は，オートゼロを流用している．すべてのピクセルが同一タイミングで動くため，回路構成の面からグローバルシャッタ動作を実現している．

また近年，有機薄膜を用いた積層イメージセンサにも注目が集まっている．高効率な光電変換を実現でき，また，画素内の容量制御による高ダイナミックレンジ化，有機薄膜への印可電圧制御による可変特性が期待できる．ただし，電荷保持を行うFD部にリセットによる熱雑音が残るため，負帰還リセットにより熱雑音を抑制する必要がある．負帰還リセットでは，1カラムに対して一つのアンプ，または一つのエリアにアンプを配置する方式が提案されてきた．このとき，長い経路を持つ負帰還ループの形成から生じる寄生抵抗・容量の影響で，周波数帯域が狭窄して高速リセットが難しくなる問題があった．そこで，ピクセル内のソースフォロア用MOSの接続を切り替えることで，ソース接地アンプを形成してピクセル毎の負帰還を実現する方式が提案されている[19]．

そして，ハイブリッド型A/D変換器も着実に進化を遂げ，イメージセンサの性能向上に貢献している．3段構成に別々の方式（折り返し積分型，サイクリック型，逐次比較型）を用いて，マルチサンプリングによるS/N比の改善と高ダイナミックレンジ化，高速動作，低消費電力など複数の要求を満たす構成が提案されている[20]．また，TDC: Time to Digital Converterを用いたハイブリッド型はLIDAR: Light Detection and Rangingの高性能化を実現している[21]．（池辺）

2.3 画素微細化・多画素化

イメージセンサの画素微細化と多画素化は，携帯電話やスマートフォンの進化とともに急速に進んできた．端末の薄型化がカメラモジュールの低背化，すなわちイメージセンサの画素微細化を推し進め，ディスプレイの大画面化や高解像度化が多画素化を推し進めてきた．また，最近ではカメラ性能が端末の売りの一つとしてアピールされるなど，画素数だけでなく画質全体に対する要求もますます高まっている．

そういった中，画素ピッチが波長に近づき微細化の難易度も上がっていることに加え，画素数を抑えてピッチの広い高感度なセンサを採用する製品も出てきており，以前ほどの急速な画素微細化や多画素化は見られなくなった．2016年に1.0 μmピッチの画素を搭載した製品が登場しているが，微細化のペースは非常に緩やかとなっている．画素数に至っては2015年に2,300万画素を搭載した製品が登場し，現在も1,600万画素から2,300万画素を搭載した製品はあるものの，主流は1,200万画素から1,300万画素と停滞気味である．

一方，研究発表ではプロセスの微細化や積層型イメージセンサによる画質改善が報告されており，さらなる画素微細化への動きがうかがえる．V.C. Veneziaら（OmniVision社）は画素間分離のDTIをより細く深く作ることで，混色やブルーミングの劣化なくフォトダイオードの体積を拡大した[22]．また，カラーフィルタ間の分離をより幅の狭いメタルと酸化膜の積層構造にすることでCRA特性を改善，ゲート酸化膜と表面のパッシベーション膜の改善により読み出しノイズの低減を図った．試作した1.0 μmピッチの画素特性は従来品に比べ，飽和電荷量は20%，感度は12.5%，SNR10は10 Lux改善し，RTSノイズは半減したとした．S. Takahashiら（TSMC社）は0.9 μmピッチの画素を試作し，報告を行っている[23]．こちらもセンサ部とロジック部を別々のプロセスで作成できる積層型イメージセンサの利点を生かし，センサ部のウェハープロセスを最適化することで，暗電流は3.2e-/s（@60度），読み出しノイズは0.9e-（@18 dB），飽和電荷量は4100e-を実現したとした．これまで画素微細化による画質劣化をプロセスの微細化や裏面照射プロセスによる高感度化等で克服してきたが，今後は積層プロセス等による画質改善でいっそうの画素微細化が期待される．

また，J. Bogaertsら（CMOSIS社）は有効画素数が26112 × 15,000画素でダイナミックレンジが78 dBを超える航空写真向けのイメージセンサを報告するなど[24]，計測用，監視用，車載用，放送用などの分野では，今もなお多画素化が進んでいる．一方，多画素化を解像度向上以外の目的で行う動きもある．S. Choiら（Samsung社）は1.28 μmピッチの画素をDTIで0.64 μm × 1.28 μmの画素に分割し，PDAF (Phase Detection Auto-Focus) として利用するイメージセンサを報告している[25]．画素の分割にイオン注入ではなくDTIを用いることで画素間の混色を防ぐことができ，画素微細化によるPDAF性能の劣化を抑制できたとした．また，S. Machidaら（Panasonic社）はRGBカラーフィルタの下に可視光用の有機膜とIR用の有機膜を積層することで，R+IR，G+IR，B+IRの信号を取得できるイメージセンサを報告している[26]．RGBカラーフィルタの一部をIR用に置き換える従来の方式に比べ，高解像度なIR画像情報を取得できる．また，有機膜に印加する電圧をコントロールすることでIR感度が変わり，420 μs以下の短い時間でRGB+IR出力のモードとRGB出力のみのモードを切り替えることができるとした．

このような新たな試みによって，今後もさまざまな分野でイメージセンサの画素微細化と多画素化が進んでいくと考えられる．（樽木）

2.4　高感度化・低ノイズ化

今年はイメージセンサにおけるブレークスルー技術の一つである裏面照射型CMOSイメージセンサの開発からちょうど10年という年である[27]．当初の問題の一つであった色分離性は，カラーフィルタ領域に遮光部材を設ける構造や，DTIと呼ばれるSi内に設けた素子分離層で色分離性を改善する構造[28]などが提案され実用化がなされている．さらに，近年ではSi基板をDTIで貫通したFull-Depth DTI構造も提案されている[29]．特に画素ピッチが微細な多くのスマートフォンカメラなどで，裏面照射型CMOSイメージセンサが採用され，35 mmフルサイズなど比較的大型のイメージセンサで採用されている例もある[30]．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，高画素化・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，非可視光の検知感度を向上させたもの，SPAD（Single Photon Avalanche Diode）画素に裏面積層構造を適用したもの，有機材料や量子ドットなどの光電変換膜を用いたイメージセンサ，グローバルシャッタ機能と高感度を両立したものなど，量子効率を高めるためのさまざまな技術が引き続き積極的に提案・発表されている．特に近赤外領域の撮像は車載カメラなどセンシング用途での需要の拡大が見込まれており，多くの報告がなされている[31)～35)39)41)～43)]．光子をアバランシェ増倍しカウントするSPADは，Photon Countingセンサの実現に近い技術ではあるものの，各画素にカウンタが必要で画素ピッチを縮小することが難しく，Fill Factor（開口率）も低くなっていた．この課題に対し微細なプロセスと裏面積層構造の適用で，画素のシュリンクとFill Factorの向上による性能向上とを両立したとする報告がなされた[36)～38)]．光電変換膜を用いたイメージセンサでは，特に非可視光領域などでSiの量子効率を大幅に超える感度を得られるとする報告が相次いでなされた[39)～44)]．中でも，可視光用とIR光用の光電変換膜を積層して同時に読み出す技術[39)]や，画素内でノイズキャンセルしリセットノイズを低減するとともに，8K4Kの解像度を高飽和電子数で実現したとする報告[44)]は特に聴講者の注目を集めていた．また，画素内メモリーを用いてグローバルシャッタ機能を有しながら，裏面照射型の構成をとる報告[45)48)]や，表面照射型で導波路構造の採用により高感度化と遮光性能との両立をはかる報告[46)47)]がなされた．これらの技術開発はいずれもイメージセンサの性能向上のみならず用途拡大の意味でも非常に興味深い．

低ノイズ化に関しては，イメージセンサの画質を低下させる要因の一つである白点傷を，炭素による金属ゲッタリングを局所的に用いて低減したとする報告[49)]がなされた他，入力換算ノイズで1e-を下回るレベルの発表[50)～57)]が相次いでなされており，イメージセンサを用いたPhoton Countingの実現にまた一歩近づいたと言える．中でも，画素数1 Mピクセル（筆者らはJotと呼ぶ），フレームレート1000 fps超で，低飽和でADCの分解能は1bitながらも，ノイズ0.22e-を実現したとする報告[51)]や，リセットゲートを用いないことに加え，ブートストラッピング手法により低電圧でもフローティングディフュージョンをリセット可能なイメージセンサで，読出しノイズ0.44e-を実現したとする報告[55)]など，0.5e-をさらに下回るレベルの発表がなされた．その他にも，電荷の状態でCDSを行う報告[52)]，ADCで2段階のオーバサンプリングを行う報告[54)]や画素サイズが15 μmと大きいながらも0.5e-のノイズを実現した報告[57)]など，0.5 e-レベルのノイズに抑えた報告がなされた．

近年のイメージセンサにおいて最大の需要の担い手であるスマートフォンとディジタルカメラ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．今後はさらに，車載向け，監視カメラ，マシンビジョンや可視光以外のセンシング用途など，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

前回の年報執筆時からの2年間で，高速化・広ダイナミックレンジ化（DR）・広波長化において，特に3次元集積技術と3次元的な機能素子の導入が性能・機能を向上させている．

画素，DRAM，Logicの3層基板を積層させた画素サイズ1.22 μm角，画素数5520 H × 3840 VのCMOSイメージセンサが報告された[58)]．容量1 GbitのDRAMにTSV接続によるWide I/O2相当のピン並列数である512bit Bus線を用いて周波数200 MHz，データレート12.8 Gbpsで画像データを一時記録し，2.5 Gpixel/sの画素読出しレートを達成している．本センサは連続撮像型のチップ出力レートの課題を解決する，ディジタルバースト型のイメージセンサの提案ともいえる．一方，多画素数・高出力レートの連続撮像型のイメージセンサとしても，3段パイプラインADCを活用した複数モードのうち，階調10bitの高速モードにおいて画素数33 Mで480 fps，15.9 Gpixel/sの画素読出しレートを達成している[59)]．

バースト撮像型のイメージセンサでは，マルチコレクションゲートを用いた画素数600 KのCCDイメージセンサにおいて，最高100 M fps，記録コマ数6の撮像性能が報告された[60)]．また，複数のフレーム分のアナログ信号を一時保持するCMOSイメージセンサでは，容量密度30fF/μm^{2}のトレンチキャパシタを導入し[61)]，10 M fpsで連続960コマの撮像性能が報告された[62)]．また，記録コマ分のメモリーを画素内[63)]ないし画素隣接[64)]に搭載したプロトタイプチップの報告があり，最高71.4 M fpsの動作が報告された[64)]．

いずれのタイプの高速イメージセンサも3次元積層技術によってさらなる性能向上が見込める．

広DRイメージセンサにおいては，まずグローバルシャッタ機能を兼ね揃えた技術の進展が特筆される．画素サイズ5.86 μm，画素数3840 H × 2160 Vの画素内電荷保持型のCMOSイメージセンサでは，二つの信号処理チップを画素アレイの上下にマイクロバンプ接続を用いて積層し，画素毎に信号量に応じて2種類のスロープを有するランプ波を切り替えるシングルスロープ型ADCを搭載することで，76.4 dBのDRと撮像速度480 fps，画素読出しレート3.98 Gpixel/sを両立している[65]．また，画素サイズ3.4 μm，画素数2592 H × 2054 Vのグローバルシャッタ CMOSイメージセンサでは，画素内に配置した容量密度の高い電荷保持層に複数回の完全電荷転送を行うことで，飽和側を拡大させ，111 dBのダイナミックレンジ性能を得ている[66]．また，画素内電荷保持型のグローバルシャッタ機能と横型オーバフロー蓄積容量（LOFIC）技術とを融合させた画素サイズ3.875 μm，画素数1.3 MのCMOSイメージセンサでは飽和電子数224Ke-が達成されている[67]．さらに，画素サイズ5.6 μm，画素数1200 H × 900 Vのグローバルシャッタ CMOSイメージセンサでは，185 μV/e-のコンバージョンゲインとFolding Integrationサイクリック型ADCを用いることで，0.61e-rmsの暗時ランダムノイズと81 dBのDRを得ている[68]．

他のDR拡大技術としては，画素サイズ3.0 μm，画素数2 MのCMOSイメージセンサにおいて，3段階のコンバージョンゲインの切り替えを行い，露光期間を分割することなく87 dBのDRが得られている[69]．この方式ではPDの飽和を高める必要があるが，裏面照射型の縦型のPN接合容量を積極的に活用して暗電流を増加させることなく飽和を高める提案がなされた[70]．また，Si層を完全にトレンチで分離した画素サイズ3.2 μmのCMOSイメージセンサでは，容量性のトレンチを蓄積機能に適用して電子とホールの両方を蓄積し，116 dBのDRを得ている[71]．

車載，認識，セキュリティ，分析等の応用に向け，近赤外光帯域の高感度化技術の進展が顕著である．画素サイズ1.12 μmの裏面照射型CMOSイメージセンサにおいて，光照射面にピラミッド型の光回折パターンを形成するとともにディープトレンチ分離を適用することで，Si中の侵入長が長い近赤外光帯域の高感度化を図り，3 μm厚のSiフォトダイオードの画素間クロストークを悪化させることなく，850 nmにおいて30%の量子効率が得られている[72]．また，画素サイズ2.8 μmの裏面照射，露光期間分割型の広DRなCMOSイメージセンサでは，実効的な光の侵入長を増加させる工夫により850 nmにおいて58%の量子効率が得られている[73]．また，高抵抗Si基板を用いて近赤外光帯域の高感度化を図った画素サイズ16 μmのCMOSイメージセンサでは，搭載したLOFIC容量を1pFに高めて飽和電荷量を増加させ，71 dBの最大S/N比，200～1100 nmの分光感度帯域，900 nmにおける60%の量子効率を得て，吸光イメージングによって5 mg/dlのグルコースが生理食塩水中に拡散する様子を捉えることに成功している[74]．また，本報告では干渉フィルタと液晶セルを組み合わせた電圧切換方式のフィルタを合わせて提案している[74]．また，有機光電薄膜を用いたイメージセンサにおいても，近赤外光，紫外光に感度を高めた報告がなされている[75][76]．

今後とも光学方式，受光部，回路，信号読出し方式等の技術の進化によるイメージンセンサの高性能化と高機能化が期待される．（黒田）

2.6　画像処理

通常と異なる特殊なイメージセンサやカメラを用いて撮影した映像に対して画像処理を行うことで，新しい機能を実現する研究が行われている．

複数画素からなるブロック単位で露光制御が可能なイメージセンサを用いて，高品質な高ダイナミックレンジ（HDR）画像を生成するための撮像・処理方式の検討が行われた[77]．一定画素間隔で異なる時間解像度で撮像することにより，動きぼけを低減した短露光画像，空間解像度の高い中露光画像，およびノイズを低減した長露光画像を同時に取得し，取得した画像に対して再構成処理を施すことにより，動きぼけとノイズを低減したHDR画像を生成する．また，同イメージセンサを用いて，撮像しているシーンの状況の理解に有用な画像を取得するための撮像方式が提案された[78]．被写体の明るさと動きに基づいて2 × 2ブロック単位で露光制御することにより，露光量や時間解像度の異なる画像を同時に取得し，黒潰れや白飛び，動きぼけのない画像を再構成する．

8 × 8画素のブロック内で画素毎に異なる露光時間を設定できるイメージセンサを用いて擬似ランダム露光を実現し，得られた符号化画像を大量の動画から学習した辞書を用いたパッチベースのスパース最適化により，高時空間解像度の動画として再構成する手法が提案されている[79]．1フレームの間に16回の時間露光パターン切り替えによって得られた静止画から16フレームの動画像が復元されている．

フォトダイオードによって光から変換された電荷をピクセル内に蓄積しておくフローティングディフュージョンを複数備えたマルチタップCMOSイメージセンサを用いて，動的シーンでも照度差ステレオ法により法線ベクトルが推定できる手法が提案されている[80]．露光を分割して繰り返すことで1回の露光時間を短くでき，撮影される複数の画像はほぼ同時に撮影したとみなすことができる．イメージセンサの露光を異なる光源の発光タイミングと同期させることで，異なる方向から被写体に光を照射した複数枚の画像をほぼ同時に撮影することができ，動的物体に対しても照度差ステレオ法によって法線を推定することが可能である．

単一のイメージセンサの上にアパーチャ数分のレンズを配置したマルチアパーチャカメラを用いて撮像した複数の

画像から視差マップを推定し，視差補正を行ったのちに合成することでノイズを低減する手法が提案されている[81]．マルコフ確率場を用いた事後確率最大化問題をBelief Propagationを用いて解くことで，SNRが低い画像でも安定した視差推定が実現されている．

像面上で画像処理を行うイメージセンサ，いわゆるビジョンチップの開発も行われている．

1.27 Mpixel，500 fpsで動作する積層型・裏面照射CMOSイメージセンサに2種類の列並列演算器を搭載することで画素間およびフレーム間の高速演算を実現するビジョンチップが開発された[82]．これにより，人の目では識別できない1 ms単位の速度で制御機器への視覚フィードバックを可能としている．（小室）

2.7　特殊機能

光の波長よりピッチの小さいグリッドや格子等，ナノフォトニック構造を利用することで，画素レベルでの偏光計測機能や，カラーフィルタを用いた場合に比べてより細かいフィルタ機能制御を実現することが期待されている．イメージセンサにナノフォトニック構造を組み合わせた計測技術は進歩を続けており，完成度・性能が高くなっている．例えば，2016のIEDMではソニーから90 nmCMOSプロセスによる2065 × 1565画素の偏光イメージセンサ（裏面照射型）が発表された[83]．またカラーフィルタ構造では，Hongらのグループが，3次元井桁状のナノフォトニックフィルタ構造によるオンチップ蛍光イメージセンサで励起光抑圧比（Extinction ratio）60 dB超を達成している[84]．ただし，個々の研究の完成度が上がる一方で研究アクティビティはやや下がっているとみられ，IISW2017ではナノフォトニック構造に関連した報告は少数であった．

一方で，高速イメージング，特に3次元距離測定や蛍光寿命計測をターゲットアプリケーションとする超高速イメージセンサの研究は活況を呈している．大別して，単一光子アバランシェフォトダイオード（SPAD）を用いる方式と，画素フォトダイオードに複数の転送ゲートを搭載して光電子の振り分けや転送経路のポテンシャルプロファイルを制御して時間分解能を実現する方式が代表的である．後者については，パルス励起/照明光のタイミングとセンサ画素の動作タイミングを制御することによって時間分解能を達成している．そのほか，距離計測等具体的な方式や性能について，別項に述べる．

イメージセンサを，接触型，あるいは生体に埋め込んで利用するバイオイメージングセンサ技術・デバイス技術についても着実な進歩がみられる．pHイメージングが可能なISFET画素搭載イメージセンサをベースに，メディエータ膜を形成することで，細胞活動によって生じるATP（アデノシン三リン酸）をリアルタイムで検出するオンチップイメージセンサが実現された[85]．一方，通常の光を検出対象とするCMOSイメージセンサベースのオンチップバイオイメージングでは，蛍光イメージングのために必要なオンチップ励起光除去フィルタの性能が大きく向上したほか[86]，グルコース濃度を蛍光強度に変換するゲルを組み合わせた生体内グルコースセンサなどのが報告された[87]．

イメージセンサの機構やパッケージングの機能性により特殊バイオイメージングシステムを実現するほかにも，メーカ製の小型CMOSイメージセンサチップをコアとする*in vivo*（＝生きた状態での）生体イメージングを行うシステムの完成度が向上している．特に齧歯類の脳に搭載して自由行動下で利用可能なデバイスは脳科学研究分野でのニーズが強く，利用が広がっている[88]．寡占状態であるため高価であるが，イメージセンサ以外の部分については通常の加工技術とマイコンやPCで実現できることもあり，一部にはオープンソースで脳イメージングデバイスの設計情報提供と研究利用を行う動きも見られる[89]．特殊撮像システムとしての技術的側面からだけでなく，情報センシングシステムの市場形成・マーケティングの観点からも，当該分野の今後の動向に興味が持たれる．（徳田）

3．カメラ

3.1　放送用カメラ・高精細カメラ

2018年12月1日に放送衛星での4K/8K本放送の開始が予定されており[90]，いよいよ本格的な超高精細・高臨場感放送の時代を迎える．近年は，業務用カメラのみならず，家庭用ビデオカメラやスマートフォンのカメラの多くで4K対応が進み，個人でも手軽にハイビジョンを超える高精細映像を撮影できる環境が整ってきた．8Kカメラは，製品化については一部のメーカにとどまるものの，今後の8Kの普及を見据えて，より実用的なカメラやイメージセンサの研究開発が進められている．

放送用4Kカメラは，従来の放送用カメラと同じ光学サイズである2/3インチ系のカメラ[91]～[93]が複数のメーカから発表された．文献[91]では，2/3インチのHDTV用イメージセンサ4枚（RGGB）を用いたデュアルグリーン画素ずらし方式により，4K相当の解像度を実現した．文献[92]では，2/3インチ・800万画素CMOSイメージセンサを用いた3板式によるフル解像度4Kを実現し，画素サイズは2.5 μmながら，従来のHDTVカメラとほぼ同等の感度F10（照度2000 lx）を実現した．文献[93]では，単板式の1インチ・1,100万画素CMOSイメージセンサと拡大光学系の組み合わせにより2/3インチレンズに対応し，感度F10，SN比60 dB以上を確保した．4K解像度に対応した2/3インチレンズのラインナップも充実してきており，今後は2/3インチ系4Kカメラの番組制作現場への導入が進んでいくことが予想される．

ディジタルシネマと兼用の光学サイズがSuper35に対応した単板式4Kカメラは，技術的にも成熟してきており，多くのメーカが参入している．その中で，8倍速（フレーム

周波数480 Hz）のスローモーション映像を連続撮影できる4Kカメラ[94]が登場するなど，より付加価値の高いカメラ開発にシフトが進んでいる．

8Kに対応したカメラは，単板式と3板式に大別されるが，2015年頃より，複数のメーカが単板式による8Kカメラの製品化を実現している[95)～97)]．文献[95)～96)]では3,300万画素，文献[97)]では3,540万画素のCMOSイメージセンサをそれぞれ用いており，フレーム周波数60 Hz，デュアルグリーン（RGGB）相当の解像度を持つ8K映像の撮影が可能である．

8Kカメラとレコーダが一体となった8Kカムコーダの開発も進められている．文献[98)]では，単板式で撮影された8K・60 Hzの映像を約1/4にイントラフレーム圧縮し，2 TBのSSDメモリーに最大40分記録できる．文献[99)]では，同じく単板式で撮影された8K・60 Hzの映像をAVC/H.264エンコーダで約1/80に圧縮し，128 GBのSDメモリーカード4枚に100分以上記録できる．いずれも，記録した映像を市販の映像編集ソフトウェアでの編集ができ，8K映像制作にかかるコストや時間の削減が期待される．

ITU-R BT.2020およびBT.2100で勧告化された8K映像の最上位フォーマットである，フレーム周波数120 Hz，広色域，高ダイナミックレンジ（HDR）に対応した，フルスペック8Kカメラの開発も進められている．文献[100)]では，1.7インチ・3,300万画素イメージセンサと広色域対応色分解プリズムを用いて初めてフルスペックに対応した3板式8Kカメラを実現した．また，1.25インチ光学系を採用して本体重量7 kgまで小型化した3板式8Kカメラも報告されている[101)]．単板式では，8Kの4倍に相当する1億3,300万画素CMOSイメージセンサを用いた8Kカメラシステムが試作されており[102)]，順次走査による60 Hzとインタライン走査による120 Hzの二つのフレーム周波数に対応している．

高い実用性を見据えた付加価値の高い8Kイメージセンサの報告も行われている[103)～104)]．文献[103)]では，有機光電変換薄膜を用いて，画素サイズ3.0 μmでグローバルシャッタと450 ke-の高い飽和電荷量を実現している．文献[104)]では，3段パイプラインADCを用いて，フレーム周波数480 Hzのハイスピード撮影モードと，120 Hzでランダムノイズ3.2e-の低ノイズモードを備える．

8Kを超える高精細映像は，近年，医療[105)]やヴァーチャルリアリティ（VR）[106)]など，放送以外の分野への応用も進んでおり，これからも産業・セキュリティ分野での更なる用途の拡大が見込まれる．今後，高精細映像の利用の裾野が広がることで，研究開発がさらに活性化し，カメラやイメージセンサの画質・性能の改善につながっていくことが期待される．（船津）

3.2 携帯電話用カメラ・ディジタルカメラ・ビデオカメラ

スマートフォンなどの携帯電話用カメラでは，イメージセンサの画素セルサイズを縮小し，小型化を維持しつつ多画素化する傾向が続いている．2015年から1.0 μmの画素セルサイズのイメージセンサが製品搭載され始め，最近では0.9 μmの画素セルサイズも製品に採用された．また，携帯電話用カメラ向けの微細画素でも，位相差AF用の画素を搭載し，AF性能を向上させる取り組みが普及した[107)]．特に，画素欠陥にならずに全画素に配置可能な画素分離方式の位相差画素は，1.28 μmの画素セルサイズまで微細化され[108)]，今後多くの製品に採用されることが予想される．携帯電話用カメラ向けの新技術としては，従来の積層型イメージセンサに対し，さらにDRAMを積層した3層積層のイメージセンサの技術が開発された[109)]．画素からの読み出し信号を高速でDRAMメモリーに転送することで，960 fpsの読み出しができ，スロー再生などの機能を実現することができる．SamsungもDRAMを積層したイメージセンサの量産化を発表しており[110)]，今後もDRAM積層センサの製品搭載化が進むことが予想され，また，DRAMを活用した新しい撮像機能の搭載も期待される．携帯電話用カメラを含めた撮像システムでは，各社から背面カメラを二つ備えた構成や，距離センサや近赤外センサなどを搭載することで，奥行き情報を付加し，焦点距離の切り替えやAFの高速化，3次元映像などを取得する技術などが多くの製品で採用された．これらの機能はDSPやGPUなどの高性能化による演算処理の高速化も含めて実現している．今後も，DSPやGPUの高性能化により，複数のセンサ情報や，距離情報などを扱うことで，ARなどの機能が，多くの製品に盛り込まれていくことが予想される．

ディジタル一眼カメラでは，従来AFセンサを備えた一眼レフカメラが実現していた高いAF性能を，ミラーレス一眼に像面位相差AF機能を備えたイメージセンサを搭載することで実現させている．オリンパスのEM-1 MK Ⅱ[111)]ではAF/AE追従で最高18コマ/秒，Sonyのα 9[112)]では最高20コマ/秒の連写性能を実現するなど，一般的なディジタル一眼レフカメラを上回る撮像性能を達成している．また，従来コンパクトカメラや携帯電話用カメラなどの画素セルサイズが小さく小型のイメージセンサで使われていた裏面照射型イメージセンサや積層型イメージセンサが一眼カメラにも搭載され始めた．ソニーはα 7R Ⅱ[113)]に4,240万画素の35 mmフルサイズ裏面照射型イメージセンサを世界で初めて採用し，ニコンもD850[114)]に4,575万画素，35 mmフルサイズ（FXフォーマット）の裏面照射型イメージセンサを搭載した．裏面照射型のイメージセンサは低背化により光の斜入射特性の改善が可能であるため，入射角が厳しくなる周辺部での高画質化が可能になる．また，ソニーはα 9に世界で初めて35 mmフルサイズの積層型イメージセンサを搭載した．この積層型イメージセンサには高速信号処理回路と内蔵メモリーを搭載しており，出力信号を内蔵メモリーに一時保管し，信号を滞らせずに高速処理するこ

とで，AF/AEの検出・処理の向上などを実現している．今後も裏面照射型イメージセンサや，積層型イメージセンサのディジタル一眼カメラへの搭載が進むことが予想され，更なる撮像性能の向上が期待される．

ビデオカメラでは，アクションカメラとして360度撮影が可能なものや，防水・防塵・耐寒・耐衝撃を兼ね備えたものなどが各社から発売されている．また，4K撮影機能がこれらのアクションカメラにも広く普及した．2020年には東京オリンピックが開催されるため，それに向けて8K対応のビデオカメラの商品化が進められていくことが予想さる．（近藤）

3.3 車載用カメラ・セキュリティ用カメラ・産業用カメラ

車載システムの開発は，レベル4以上の完全自動運転を目標として着実に進行している．特に夜間遠方障害物検知を目的としたLiDARシステムは，従来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ていたが[115]，アバランシェフォトダイオードアレイを用いたTime-of-Flight（TOF）測距システムの高画素化と測距可能距離の長距離化，背景光除去性能の向上に重点の置かれた報告が相次いでいる．パナソニックは6 μm□，688 × 384画素縦型SPADと高速画素内積算回路を有するCMOSセンサを用いた直接TOF方式の，距離画像撮像システムを報告している[116]．上記画素内回路は，6 kHzの光パルス信号に同期した高速グローバル検出＋積算動作を行い，220 m遠方にいる人を10 cmの解像レベルで距離画像として撮像できるとしている．光源波長は人の目に不可視かつ太陽光スペクトルの窓内に位置する940 nmを用い，非走査型（メカレス）の一括露光方式である．Delft大，EPFL，TSMCは19.6 μm□，256 × 256画素の3Dスタック構造のSPAD-2Dアレイを用いた測定可能な最長距離430 m，距離分解能15 cmのTOF撮像システムを報告した[117]．光源は可視光帯域（532 nm）ではあるものの，位相シフトキーイング（PSK）に基づく変調により，最高18.6 dBの背景光抑圧に成功した．このような高画素数TOFセンサシステムの開発に呼応した信号処理ICの開発も並行して報告されている．東芝は，20チャネルの時間－距離変換（TDC）方式のTOF計測回路からなるSoCを報告している[118]．スキャン光学系と上記チャネルと同数のSiフォトマルチプライアを用いて，240 × 96画素の測距システムで200 mレンジの測距を0.125%の精度で実現した．

測定可能距離は短いものの，単眼の前方監視カメラとの兼用および産業用ロボットの3D検出能を有するRGB-D（RGBZの略称も使われる）カメラ用として期待される，間接TOF方式に基づく測距システムの開発も活発である．ソニーとSoftKineticはCurrent Assisted Photonic Demodulator（CAPD）を用いた間接TOF方式の10 μm□，320 × 240画素裏面照射CMOSセンサに基づく測距システムを報告した[119]．光源波長850 nm，変調周波数50 MHzを用いて1 m前方被写体の測距を精度5.9 mmで実現した．また，仏リヨン・ナノ技術研究所，グルノーブルアルペス大，STマイクロ社の共同チームは，3タップ位相変調方式の6.2 μm□，464 × 197画素CMOSイメージセンサを開発し，光源波長930 nm，変調周波数50 MHzを用いて2 m前方被写体の測距（変調度75%）を報告している[120]．

一方，静岡大，浜松医科大のチームは，4タップ横方向電界制御変調方式（Lateral Electric Field Charge Modulation: LEFM）の22.4 μm□，128 × 128画素CMOSイメージセンサを動物脳内血液の時間分解近赤外分光に適用し，脳内ヘモグロビン濃度の変動の測定が可能であることを報告している[121]．

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，超高速度撮像が可能なビデオカメラの開発を推進している東北大は，撮像速度5,000万コマ/秒を有するグローバルシャッタ，画素サイズ69 μm × 34 μm，画素数25 × 100の撮像素子を報告している[122]．従来品よりいっそうの高速化を実現するために，10 nsでの読み出し動作が可能な画素内アナログメモリーを搭載した．

最後に，可視光外の紫外光，赤外光を撮像するカメラの産業応用例として，東北大が，液晶フィルタによる複数透過域を撮像するマルチバンド・スペクトラルイメージングシステム，生理食塩水の分光画像撮像例を報告しており[122]，また，パナソニックは有機薄膜センサの紫外光に対する高感度特性を利用して，紫外線を主成分とする水素炎をリアルタイムで可視化するプラント監視用カメラを報告している[123]．（廣瀬）

4．不可視光撮像技術

4.1 赤外線

赤外線イメージセンサは，物体から放射される赤外線を画像化するため，暗闇の中でも物体を検知することができる．本節では，赤外線のセンサ技術の最新動向として，米国で2017年4月に開催されたSPIE（国際光工学会）主催の国際シンポジウム「Defense + Commercial Sensing」での報告を中心に，技術動向について述べる．

(1) 量子型遠赤外線センサ

量子型遠赤外線センサは，赤外線をフォトンとして扱い，半導体におけるフォトンと電子の相互作用を利用するため，高い感度を持ち，応答速度が速いという利点を有している．量子型には幾つかの方式があるが，米国を中心に開発が加速されている量子型の方式として，Type-II超格子センサがある．SPIEでは，軍研究所NVESD（Night Vision and Electronic Sensors Directorate）主導で進められたVISTA（Vital Infrared Sensor Technology Acceleration）プログラムの開発成果が報告された．まず，HRL Laboratoriesからは，開発成果の一例として12 μmピッチ

1280×720画素Type-II超格子デュアルバンドMWIR（Middle Wavelength InfraRed）/LWIR（Long Wavelength InfraRed）センサの撮像画像が示された[124]．温度分解能NETDは，<30 mK@光学系F値4.21，80K動作であった．カリフォルニア工科大学ジェット推進研究所（JPL）からは，MWIR，HOT（High Operating Temperature）-MWIR，LWIR，VLWIR，デュアルバンドMWIR/LWIR，LWIR/LWIRの赤外線センサ開発が報告された[125]．1280×720画素CBIRD（Complementary Barrier Infrared Detector）による撮像画像が紹介され，78Kでのカットオフ波長11 μm，オペラビリティ99.4%が示された．VISTAプログラム以外からの報告では，米国Northwestern大からは，Ga含まないInAs/InAs1-xSbx/AlAs1-xSbx構造のType-II超格子遠赤外線センサの報告があった[126]．本センサは，伝導帯にキャリヤブロック層を形成するバリア型で，吸収層の厚さを2 μmに薄膜化しつつ，77K，波長7 μmで量子効率40%を達成している．

日本からは，JAXA（Japan Aerospace Exploration Agency）からInAs/GaInSbのType-II超格子遠赤外線センサの報告があった[127]．30 μmピッチ320×256画素Type-II超格子遠赤外線センサにおいて，温度分解能NETDは150 mK@光学系F値1.4，77K動作，カットオフ波長15 μmであった．

次に，Type-II超格子センサとは別の量子型の方式としては，真性方式であるHgCdTeセンサがある．フランスSofradir社は，自社のHgCdTeセンサと，SCD社のType-II超格子センサを取り上げ，性能の比較を行った[128]．その中で，HgCdTeセンサ性能改善の一例として，n-on-pダイオードからp-on-nダイオードにすることによるRTS（Random Telegraph Signal）欠陥の低減について報告された．

ポーランドの軍事技術大からは，TE（Thermo-electric）cooler高動作温度のHgCdTeセンサの報告があった[129]．230Kで動作可能で，報告ではバイアス，温度，吸収層厚さ，ドーピングなどの条件に対する応答時間の振る舞いについて報告された．また，超低コスト化を実現する取り組みとしては，CQD（Colloidal Quantum Dots：コロイド状量子ドット）の報告が行われた[130]．カットオフ波長は，HgTeのCQD直径によりチューナブルで，TE coolerで動作する．このほか，QWIP（Quantum Well Infrared Photodetector）についても進化しており，10.6 μmでNarrowband detection用途向けなどの開発が報告された[131]．

(2) 熱型遠赤外線センサ

熱型赤外線センサは，Si基板上に断熱構造を有する画素を2次元アレイとして形成したものである．赤外線を吸収する赤外線吸収体と温度センサから構成された画素の検知部において，赤外線の入射により発生する微小な温度変化を検知する．温度センサの機構としては，ボロメータ，ダイオード，強誘電体等，さまざまなものが用いられている．

カナダINOからの報告では，35 μmピッチ384×288画素熱型赤外線センサにおいて，画素部に吸収体であるGold Blackを形成することにより，3～14 μmの広い波長域で，高い吸収率を実現し，8 μm以下の波長では，感度の5倍化を実現している[132]．トルコMikroSens社は，0.18 μmCMOSボロメータ技術，MEMS（Micro Electro Mechanical System）技術，ウエハレベルパッケージングによる低コスト化について報告した[133]．35 μmピッチ80×80画素熱型赤外線センサにおいて，NETDは71 mK@光学系F値1.0，4Hzであった．

米国ハワイ大からはHSI（Hyperspectral Imaging）向けの応用では重要なセンサ応答の波長依存性が報告された[134]．今回，米国FLIR社，フランスSofradir社の熱型赤外線センサ応答の波長依存性が評価され，報告された．結果としては，FLIR社の熱型赤外線センサの方が，より広い波長域でのセンサ応答が観測されている．この結果は，温度センサの違い（VOx or a-Si）や，画素の構造などに起因すると考えられる．

赤外線センサの新しい取り組みとしては，中国昆明物理研究所から，グラフェン合成技術，量子ドット，ドーピング制御などが紹介され，グラフェンを用いた320×256画素センサが示された[135]．

また，熱型赤外線センサの開発動向の新しい流れである“新機能付加”に関しては，三菱電機から，熱型赤外線センサへ偏光検知機能を付加するためのプラズモニック吸収体の吸収特性の広帯域化について報告された[136]．

熱型赤外線センサの応用では，韓国嶺南大からLWIRカメラからのデータをコントラストフィルタリングおよびCNN（Convolutional Neural Network）を用いた50 mを超える距離の歩行者検知方法が報告され，トルコ中東技術大学からは地雷検知について報告された[137][138]．

以上のように，赤外線センサは，量子型，熱型，ともに，引き続き旺盛な研究開発が繰り広げられている．画素微細化の取組みを中心に，多画素化，高感度化および低コスト化が追求されており，確実な技術の進展がうかがえる．（藤澤）

4.2 X線

イメージセンサを用いてX線撮像を行うデジタルラジオグラフィは，低照射撮影，動画撮像，リアルタイム性，データ取り扱いの利便性，など多くの特長を持つことから，近年急速に普及している．

使用される検出器は，主としてSi単結晶を材料とし，最新の半導体製造技術を使って専用のCCD/CMOSイメージセンサが開発されており，多くの種類が存在している．

X線撮像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．一般に，硬X線と呼ばれる20 keV以上のエネルギーのX線を用い，物質に対する高い透過性を利用して，被写体を透視撮像する．撮像方式には，シンチレータを用いてX線を可視光に変換

し，イメージセンサで可視光を電荷（電子）信号に変換して読み出す間接変換型と呼ばれる手法と，信号処理回路上にa-Se，CdTe，PbI2，HgI2などの膜を積層して，X線フォトンを直接電荷信号に変換して読み出す直接変換型と呼ばれる手法がある．

以下，研究開発動向ついて紹介する．

(1) X線変換部の改良

画素間クロストークを抑制する隔壁を設けたシンチレータパネルが開発されている．隔壁の間隔と，a-Si製TFTセンサパネルの画素ピッチを合わせることで，隔壁内に充填されたシンチレータで変換された可視光が直下の画素に入射しやすくなる[139]．X線直接変換材料として，MAPbI3ペロブスカイト結晶をシンタリングにより高密度で厚膜化する製造手法が提案されている[140]．Horizon 2020 DiCoMo（Direct Conversion Hybrid-organic X-ray Detectors on Metal Oxide Backplane）プロジェクトにおいて，検出器の解像度と感度を上げるため，光吸収ポリマにシンチレータ・マイクロ粒子を埋め込んだシンチレータが提案されている．

(2) 信号処理回路の改良

大きな被写体を撮像するための大面積化について，a-SiとTFTセンサパネルを組み合わせた，画素ピッチ100 μmのイメージセンサが開発されている．従来問題とされていた残像を，補正技術により1%未満に低減している[141]．高ダイナミックレンジ撮像と低消費電力を両立するため，補正電荷の注入によりくり返し積分を行い，注入回数に基づきX線強度を計測する読出回路が提案されている．計量ステップの精度は100 ± 10e-，消費電力を2uW/画素に下げた[142]．シンクロトロンから生じる短パルスの放射X線を直接検出するため，PADと呼ばれる厚いSi製の検出器と信号処理回路を組み合せた手法が提案されている．改良型のPADにおいて，各画素内にサンプルホールド容量素子を複数備えることで，変換速度の遅いAD変換回路でも，間隔の短い出力を処理することができた[143]．

(3) 応用用途

NEDOプロジェクトにおいて，インフラ維持管理を目的とした，小型X線源とCdTe検出器を組み合せた非破壊検査装置が開発されている．プラント配管の断面積を自動・非破壊で調べるロボットに搭載する[144]．腸管を高感度・低被爆でスクリーニング検査するため，X線源と放射線検出器を組み込んだカプセル内視鏡が提案されている．回転しながら放射線を発生させる線源部と，6個のCdTe検出器を筒状に並べた受光部を備え，外部のレコーダに無線通信で位置情報と検査情報を伝える[145]．

最後に，本稿の主題からは外れるが，X線を用いないマンモグラフィ手法を紹介する．近赤外線LD光源と増幅CCDを用い，照射赤外線の吸収率分布から，赤血球の密度分布，すなわち血流量が多い箇所を示す（ガン細胞は他の細胞に比べて活発に血管新生する），スクリーニング用の診断装置が提案されている．波長情報を付加することで，腫瘍が悪性か良性かを判断できる[146]．また，レーザ光を照射し，受けた生体組織が膨張することで発生する振動（音波）をイメージングするフォトアコースティック撮像法が提案されている．ここでは，観察対象である血管によく吸収される波長（1064 nm）を利用する[147]．（山本）

5．むすび

画像情報のセンシング分野における最近2年間の技術進展についてまとめた．特に注目すべき点として，イメージセンサLSIの積層化技術の実用化が進み，撮像性能の改善が図られていることが挙げられる．今後は，このようなセンサ構造による高速並列読み出しをうまく活用することで，これまでにない機能を有する新しいイメージセンサの実現が期待される．

（2018年4月14日受付）

〔文　献〕

1) Y. Kagawa, et al.: "An Advanced CuCu Hybrid Bonding for Novel Stacked CMOS Image Sensor", IISW（June 2017）
2) Y. Kagawa, et al.: "Novel Stacked CMOS Image Sensor with Advanced Cu2Cu Hybrid Bonding", IEEE IEDM, pp.8.4.1-8.4.4（Dec. 2016）
3) H. Tsugawa, et al.: "Pixel/DRAM/logic 3-layer stacked CMOS image sensor technology", IEEE IEDM, pp.3.2.1-3.2.4（Dec. 2017）
4) Y. Oike, et al.: "8.3 M-Pixel 480-fps Global-Shutter CMOS Image Sensor with Gain-Adaptive Column ADCs and Chip-on-Chip Stacked Integration", IEEE J. Solid-State Circuits, **52**, 4, pp.985-993（Apr. 2017）
5) T. Takahashi, et al.: "A 4.1Mpix 280 fps Stacked CMOS Image Sensor with Array-Parallel ADC Architecture for Region Control", 2017 Symposium on VLSI Circuits, C19-1, pp. C244-245（2017）
6) M. Sakakibara, et al.: "A Back-Illuminated Global-Shutter CMOS Image Sensor with Pixel-Parallel 14b Subthreshold ADC", IEEE ISSCC Digest of Technical Papers, 5.1, pp.80-82（Feb. 2018）
7) S. Yokogawa, et al.: "IR sensitivity enhancement of CMOS Image Sensor with diffractive light trapping pixels", Scientific Report, 7, p.3832（2017）
8) I. Oshiyama, et al.: "Near-infrared Sensitivity Enhancement of a Back-illuminated Complementary Metal Oxide Semiconductor Image Sensor with a Pyramid Surface for Diffraction Structure", IEEE IEDM, pp.16.4.1-16.4.4（Dec. 2017）
9) I. Takayanagi, et al.: "An 87dB Single Exposure Dynamic Range CMOS Image Sensor with a 3.0 μm Triple Conversion Gain Pixel", IISW（June 2017）
10) K. Mori, et al.: "Back Side Illuminated High Dynamic Range 3.0 μm Pixel Featuring Vertical p-n Junction Capacitance in a Deep Pinned Photodiode", IISW（June 2017）
11) F. Lalanne, et al.: "A native HDR 115dB 3.2 μm BSI pixel using electron and hole collection", IISW（June 2017）
12) M. Kobayashi, et al.: "A 1.8e-rms Temporal Noise Over 110-dB-Dynamic Range 3.4 μm Pixel Pitch Global-Shutter CMOS Image Sensor with Dual-Gain Amplifiers SS-ADC, Light Guide Structure and Multiple-Accumulation Shutter", IEEE J. Solid-State Circuits, **53**, 1, pp.219-228（Jan. 2018）
13) T. Yokoyama, et al.: "Design of Double micro lens structure for 2.8 μm Global Shutter Pixel", IISW（June 2017）
14) Y. Sakano, et al.: "224-ke Saturation Signal Global Shutter CMOS Image Sensor with In-pixel Pinned Storage and Lateral Overflow Integration Capacitor", 2017 Symposium on VLSI Circuits, C19-4, pp.

C250-251（2017）
15）K. Kiyoyama, et al.: "A Block-Parallel Signal Processing System for CMOS Image Sensor with Three-Dimensional Structure", Proc. 3DIC, pp 1-4（Nov. 2010）
16）H. Sugo, et al.: "A Dead-time Free Global Shutter CMOS Image Sensor with in-pixel LOFIC and ADC using Pixel-wise Connections", VLSI Circuit Dig. Tech. Papers（June 2016）
17）M. Goto et al.: "Event-Driven Correlated Double Sampling for Pulse-Frequency-Modulation A/D Converters Integrated in Pixel-Parallel Image Sensors", Proc. 2017 IISW, p.149（2017）
18）M. Sakakibara, et al.: "A Back-Illuminated Global-Shutter CMOS Image Sensor with Pixel-Parallel 14b Subthreshold ADC", ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.80-81（Feb. 2018）
19）K. Nishimura, et al.: "An 8K4K-Resolution 60 fps 450ke--Saturation-Signal Organic-Photoconductive-Film Global-Shutter CMOS Image Sensor with In-Pixel Noise Canceller", ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.82-83（Feb. 2018）
20）T. Yasue, et al.: "A 2.1 μm 33Mpixel CMOS Imager with Multi-Functional 3-Stage Pipeline ADC for 480 fps High-Speed Mode and 120 fps Low-Noise Mode", ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.90-91（Feb. 2018）
21）K. Yoshioka, et al.: "A 20ch TDC/ADC Hybrid SoC for 240x96-pixel 10%-Reflection <0.125%-Precision 200m-Range-Imaging LiDAR with Smart Accumulation Technique", ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.92-93（Feb. 2018）
22）V.C. Venezia, et al.: "1.0um Pixel Improvements with Hybrid Bond Stacking Technology", Proc. 2017 IISW, pp.8-11（May 2017）
23）S. Takahashi, et al.: "Low Dark Current and Low Noise 0.9 μm Pixel in a 45 nm Stacked CMOS Image Sensor Process Technology", Proc. 2017 IISW, pp.16-19（May 2017）
24）J. Bogaerts, et al.: "105x65mm2 391Mpixel CMOS Image Sensor with >78dB Dynamic Range for Airborne Mapping Applications", 2016 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.114-115（Feb. 2016）
25）S. Choi, et al.: "An All Pixel PDAF CMOS Image Sensor with 0.64 μm × 1.28 μm Photodiode Separated by Self-aligned In-pixel Deep Trench Isolation for High AF Performance", 2017 Symp. VLSI Technology, Dig. Tech. Papers, pp.T104-T105（June 2017）
26）S. Machida, et al.: "A 2.1Mpixel Organic-Film Stacked RGB-IR Image Sensor with Electrically Controllable IR sensitivity", 2017 ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.78-79（Feb. 2017）
27）“従来比約2倍の感度および低ノイズで高画質を実現した，裏面照射型CMOSイメージセンサ新開発”，http://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/200806/08-069/
28）V.C. Venezia et al.: "Stack Chip Technology: A New Direction for CMOS Imagers", Proc.（2015）International Image Sensor Workshop, pp.36-39（June 2015）
29）Y. Kim et al.: "A 1/2.8-inch 24Mpixel CMOS Image Sensor with 0.9 μm Unit Pixels Separated by Full-Depth Deep-Trench Isolation", ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.84-85（Feb. 2018）
30）“「光を捉え続ける」革新的なシステムにより新次元の高速性能を実現”，https://www.sony.jp/CorporateCruise/Press/201704/17-0421/
31）H. Takahashi et al.: "Novel Pixel Structure with Stacked Deep Photodiode to Achieve High NIR Sensitivity and High MTF", VLSI Symposium Technology Dig. Tech. Papers, pp.240-241（June 2016）
32）Y. Fujihara et al.: "A Spectral Imaging System with an Over 70dB SNR CMOS Image Sensor and Electrically Tunable 10nm FWHM Multi-Bandpass Filter", Proc. 2017 IISW, pp.47-50（June 2017）
33）A. Lahav et al.: "Cross Talk, Quantum Efficiency and Parasitic Light Sensitivity Comparison for Different Near Infra-Red Enhanced sub 3um Global Shutter Pixel Architectures", Proc. 2017 IISW, pp.390-393（June 2017）
34）H. Oka et al.: "Back-side Illuminated GeSn Photodiode Array on Quartz Substrate Fabricated by Laser-induced Liquid-phase Crystallization for Monolithically-integrated NIR Imager Chip", IEDM Dig. Tech. Papers, pp.393-396（Dec. 2017）
35）I. Oshiyama et al.: "Near-infrared Sensitivity Enhancement of a Back-illuminated Complementary Metal Oxide Semiconductor Image Sensor with a Pyramid Surface for Diffraction Structure", IEDM Dig. Tech. Papers, pp.397-400（Dec. 2017）
36）T.A. Abbas et al.: "Backside Illuminated SPAD Image Sensor with 7.83 μm Pitch in 3D-Stacked CMOS Technology", IEDM Dig. Tech. Papers, pp.196-199（Dec. 2016）
37）M.-J. Lee et al.: "A Back-Illuminated 3D-Stacked Single-Photon Avalanche Diode in 45nm CMOS Technology", IEDM Dig. Tech. Papers, pp.397-400（Dec. 2017）
38）A.R. Ximenes et al.: "A 256 × 256 45/65nm 3D-Stacked SPAD-Based Direct TOF Image Sensor for LiDAR Applications with Optical Polar Modulation for up to 18.6dB Interference Suppression", ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.96-97（Feb. 2018）
39）S. Machida et al.: "A 2.1-Mpixel Organic Film-Stacked RGB-IR Image Sensor with Electrically Controllable IR Sensitivity", ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.78-79（Feb. 2017）
40）T. Okino et al.: "Ultraviolet and Visible Spectral Imaging of Hydrogen Flames Using an Organic Photoconductive Film CMOS Imager", Proc. 2017 IISW, pp.188-191（June 2017）
41）T. Watabe et al.: "Three-Transistor-Pixel CMOS Image Sensor for 8K Super Hi-Vision Stacked Sensor with Highly Sensitive Photoconversion Layer", Proc. 2017 IISW, pp.218-221（June 2017）
42）L. Barrow et al.: "A QuantumFilm Based QuadVGA 1.5 μm Pixel Image Sensor with Over 40% QE at 940 nm for Actively Illuminated Applications", Proc. 2017 IISW, pp.378-381（June 2017）
43）P.E. Malinowski et al.: "Monolithic Near Infrared Image Sensors Enabled by Quantum Dot Photodetector", Proc. 2017 IISW, pp.382-385（June 2017）
44）K. Nishimura et al.: "An 8K4K-Resolution 60 fps 450ke–Saturation-Signal Organic-Photoconductive-Film Global Shutter CMOS Image Sensor with In-Pixel Noise Canceller", ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.82-83（Feb. 2018）
45）L. Stark et al.: "Back-illuminated voltage-domain global shutter CMOS image sensor with 3.75 μm pixels and dual in-pixel storage nodes", VLSI Symposium Technology Dig. Tech. Papers, pp.242-243（June 2016）
46）M. Kobayashi et al.: "A 1.8e-rms Temporal Noise Over 110dB Dynamic Range 3.4 μm Pixel Pitch Global-Shutter CMOS Image Sensor with Dual-Gain Amplifiers SS-ADC and Multiple-Accumulation Shutter", ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.74-75（Feb. 2017）
47）H. Sekine et al.: "A High Optical Performance 3.4 μm Pixel Pitch Global Shutter CMOS Image Sensor with Light Guide Structure", Proc. 2017 IISW, pp.394-397（June 2017）
48）C.S. Bamji et al.: "1Mpixel 65nm BSI 320MHz Demodulated TOF Image Sensor with 3.5 μm Global Shutter Pixels and Analog Binning", ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.94-95（Feb. 2018）
49）T. Yamaguchi et al.: "White Spots Reduction by Ultimate Proximity Metal Gettering at Carbon Complexes Formed underneath Contact Area in CMOS Image Sensors", VLSI Symposium Technology Dig. Tech. Papers, pp.234-235（June 2016）
50）S. Takahashi et al.: "Low Dark Current and Low Noise 0.9 μm Pixel in a 45 nm Stacked CMOS Image Sensor Process Technology", Proc. 2017 IISW, pp.16-19（June 2017）
51）S. Masoodian et al.: "A 1Mjot 1040 fps 0.22e-rms Stacked BSI Quanta Image Sensor with Cluster-Parallel Readout", Proc. 2017 IISW, pp.230-233（June 2017）
52）X. Ge et al.: "A 0.5e-rms Temporal-Noise CMOS Image Sensor with Charge-Domain CDS and Period-Controlled Variable Conversion-Gain", Proc. 2017 IISW, pp.290-293（June 2017）
53）S. Velichko et al.: "140dB Dynamic Range Sub-electron Noise Floor Image Sensor", Proc. 2017 IISW, pp.294-297（June 2017）
54）J.A. Segovia et al.: "A 5-Megapixel 100-Frames-per-second 0.5erms Low Noise CMOS Image Sensor with Column-Parallel Two-Stage Oversampled Analog-to-Digital Converter", Proc. 2017 IISW, pp.340-343（June 2017）
55）M.W. Seo et al.: "A 0.44e-rms Read-Noise 32 fps 0.5Mpixel High-Sensitivity RG-Less-Pixel CMOS Image Sensor using Bootstrapping

Reset", ISSCC Dig. Tech. Papers, pp.80-81（Feb. 2017）
56）K. Yasutomi et al.: "A 0.61 e- Noise Global Shutter CMOS Image Sensor with Two-Stage Charge Transfer Pixels", VLSI Symposium Circuits Dig. Tech. Papers, pp.248-249（June 2017）
57）T. Nishihara et al.: "An Experimental CMOS Photon Detector with 0.5e- RMS Temporal Noise and 15 μm Pitch Active Sensor Pixels", IEDM Dig. Tech. Papers, pp.385-388（Dec. 2017）
58）T. Haruta et al.: "A 1/2.3inch 20Mpixel 3-Layer Stacked CMOS Image Sensor with DRAM", 2017 ISSCC, Dig. Tech. Papers, pp.76-77（Feb. 2017）
59）T. Yasue et al.: "A 2.1 μm 33Mpixel CMOS Imager with Multi-Functional 3-Stage Pipeline ADC for 480 fps High-Speed Mode and 120 fps Low-Noise Mode", 2018 ISSCC, Dig. Tech. Papers, pp.91-92（Feb. 2018）
60）江藤剛治ほか：“究極の時間分解能のイメージセンサを目指して－10nsから50psへ－”，映情学技報，42，10，pp.9-12（Mar. 2018）
61）M. Suzuki et al.: "An Over 1M fps Global Shutter CMOS Image Sensor with 480 Frame Storage Using Vertical Analog Memory Integration", 2016 IEDM, Tech. Dig., pp.212-215（Dec. 2016）
62）M. Suzuki et al.: "10M fps 960 Frames Video Capturing Using a UHS Global Shutter CMOS Image Sensor with High Density Analog Memories", Proc. 2017 IISW, pp.308-311（June 2017）
63）L. Wu et al.: "A 20 M fps high frame-depth CMOS burst-mode imager with low power in-pixel NMOS-only passive amplifier", Proc. The 31st Intl. Congress on High-speed Imaging and Photonics, pp.96-101（Nov. 2016）
64）鈴木学ほか：“最高撮像速度5,000万コマ/秒を有するプロトタイプグローバルシャッタ高速CMOSイメージセンサ”，映情学技報，42，10，pp.39-42（Mar. 2018）
65）Y. Oike et al.: "An 8.3M-pixel 480 fps Global-Shutter CMOS Image Sensor with Gain-Adaptive Column ADCs and 2-on-1 Stacked Device Structure", 2016 Symp. VLSI Circuits, Dig. Tech. Papers, pp.222-223（June 2016）
66）M. Kobayashi et al.: "A 1.8e-rms Temporal Noise Over 110dB Dynamic Range 3.4 μm Pixel Pitch Global Shutter CMOS Image Sensor with Dual-Gain Amplifiers, SS-ADC and Multiple-Accumulation Shutter", 2017 ISSCC, Dig. Tech. Papers, pp.74-75（Feb. 2017）
67）Y. Sakano et al.: "224-ke Saturation Signal Global Shutter CMOS Image Sensor with In-pixel Pinned Storage and Lateral Overflow Integration Capacitor", 2017 Symp. VLSI Circuits, Dig. Tech. Papers, pp.C250-C251（June 2017）
68）K. Yasutomi et al.: "A 0.61 e- Noise Global Shutter CMOS Image Sensor with Two-Stage Charge Transfer Pixels", 2017 Symp. VLSI Circuits, Dig. Tech. Papers, pp.C248-C249（June 2017）
69）I. Takayanagi et al.: "An 87dB Single Exposure Dynamic Range CMOS Image Sensor with a 3.0 μm Triple Conversion Gain Pixel", Proc. 2017 IISW, pp.274-277（June 2017）
70）K. Mori et al.: "Back Side Illuminated High Dynamic Range 3.0 μm Pixel Featuring Vertical p-n Junction Capacitance in a Deep Pinned Photodiode", Proc. 2017 International Image Sensor Workshop, pp.169-172（June 2017）
71）F. Lalanne et al.: "A 750 K Photocharge Linear Full Well in a 3.2 μm HDR Pixel with Complementary Carrier Collection", Sensors, 18, 1, pp.1-13（Jan. 2018）
72）I. Oshiyama et al.: "Near-infrared Sensitivity Enhancement of a Back-illuminated Complementary Metal Oxide Semiconductor Image Sensor with a Pyramid Surface for Diffraction Structure", IEDM Tech. Dig., pp.397-400（Dec. 2017）
73）J. Solhusvik et al.: "A 1392x976 2.8 μm 120dB CIS with Per-Pixel Controlled Conversion Gain", 2017 International Image Sensor Workshop, Presentation Slide（June 2017），http://imagesensors.org/2017-papers/
74）Y. Fujihara et al.: "Spectral Imaging System with an Over 70dB SNR CMOS Image Sensor and Electrically Tunable 10nm F WHM Multi-Bandpass Filter", Proc. 2017 IISW, pp.47-50（June 2017）
75）S. Machida et al.: "A 2.1Mpixel Organic-Film Stacked RGB-IR Image Sensor with Electrically Controllable IR Sensitivity", 2017 ISSCC, Dig. Tech. Papers, pp.78-79（Feb. 2017）
76）T. Okino et al.: "Ultraviolet and visible spectral imaging of hydrogen flames using an organic photoconductive film CMOS imager", Proc. 2017 International Image Sensor Workshop, pp.188-191（June 2017）
77）古坂拓朗，浜本隆之：“動きぼけとノイズを低減したHDR画像生成のための多重時間解像度撮像・処理方式”，映情学技報，41，19，pp.5-8（2017）
78）荒谷智広，浜本隆之：“被写体の明るさと動きに基づくブロック単位露光制御によるシーン理解に適した画像の取得”，映情学技報，41，19，pp.13-16（2017）
79）T. Sonoda, H. Nagahara, K. Endo, Y. Sugiyama, R. Taniguchi: "High-Speed Imaging using CMOS Image Sensor with Quasi Pixel-Wise Exposure", 映情学技報，40，40，pp.9-10（2016）
80）T. Yoda, H. Nagahara, R. Taniguchi, K. Kagawa, K. Yasutomi, S. Kawahito: "Dynamic Photometric Stereo Method using Multi-Tap CMOS Image Sensor", 映情学技報，40，40，pp.1-2（2016）
81）K. Kugenuma, T. Komuro, B. Zhang, K. Kagawa, S. Kawahito: "Depth Map Estimation and Restoration of an Improved-quality Image from Multi-aperture Images", 映情学技報，40，40，pp.3-4（2016）
82）小林正嗣，山崎智裕，片山博誠，上原修二，能勢敦，志田さやか，小田原正起，高宮健一，久松康秋，松本静徳，宮下令央，渡辺義浩，伊澤崇，村松良徳，石川正俊：“時空間処理のための140GOPS列並列演算器を有する積層型1ms-高速ビジョンチップ”，映情学技報，41，10，pp.3-6（2017）
83）T. Yamazaki, Y. Maruyama, Y. Uesaka, M. Nakamura, Y. Matoba, T. Terada, K. Komori, Y. Ohba, S. Arakawa, Y. Hirasawa, Y. Kondo, J. Murayama, K. Akiyama, Y. Oike, S. Sato and T. Ezaki: "Four-Directional Pixel-Wise Polarization CMOS Image Sensor Using Air-Gap Wire Grid", IEEE International Electron Devices Meeting, IEDM16-220（2016）
84）L. Hong, H. Li, H. Yang and K. Sengupta: "Fully Integrated Fluorescence Biosensors On-Chip Employing Multi-Functional Nanoplasmonic Optical Structures in CMOS", IEEE J. Solid-State Circuits, 52, pp.2388-2406（2017）
85）Y.N. Lee, K. Okumura, T. Iwata, K. Takahashi, T. Hattori, M. Ishida and K. Sawada: "Development of an ATP and hydrogen ion image sensor using a patterned apyrase-immobilized membrane", Talanta, 161, pp.419-424（2016）
86）H. Takehara, K. Osawa, M. Haruta, T. Noda, K. Sasagawa, T. Tokuda and Jun Ohta: "On-chip cell analysis platform: implementation of contactfluorescence microscopy in microfluidic chips", AIP Advances 7, 095213（2017）
87）T. Tokuda, T. Kawamura, K. Masuda, T. Hirai, Hironari Takehara, Y. Ohta, M. Motoyoama, Hiroaki Takehara, T. Noda, K. Sasagawa, T. Okitsu and S. Tekuchi and J. Ohta: "In Vitro Long-Term Performance Evaluation and Improvement in the Response Time of CMOS-Based Implantable Glucose Sensors", in IEEE Design & Test 33, pp.37-48（Aug. 2016）
88）https://support.inscopix.com/products/nVista
89）http://miniscope.org/index.php/Main_Page
90）http://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/housou_suishin/4k8k_suishin.html
91）http://www.hitachi-kokusai.co.jp/products/broadcast/camera/sk-uhd4000/sk-uhd4000_t.html
92）https://www.ikegami.co.jp/archives/menu1/uhk430
93）https://panasonic.biz/cns/sav/products/ak-uc3000/
94）https://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/201604/16-036/
95）https://www.astrodesign.co.jp/product/ah-4801-b
96）https://www.ikegami.co.jp/archives/menu1/shk-810
97）http://www.red.com/products/weapon
98）http://www.sharp.co.jp/business/8k-camera/products/8k-camcorder/spec.html
99）R. Funatsu et al.: "Experimental Prototype of SD Memory Card Recordable 8K/60P Camcorder", Proc. of 2018 ICCE, pp.553-554（2018）
100）K. Kitamura et al.: "Full-specification 8K Camera System", 2016

NAB BEC Proceedings, pp.266-271（2016）
101）https://www.sony.co.jp/SonyInfo/News/Press/201709/17-086/
102）T. Nakamura et al.: "An 8K full-resolution 60-Hz/120-Hz multi-format portable camera system", SMPTE 2017 Annual Technical Conference & Exhibition
103）K. Nishimura et al.: "An 8K4K-Resolution 60 fps 450ke–Saturation-Signal Organic-Photoconductive Film Global-Shutter CMOS Image Sensor with In-Pixel Noise Canceller", 2018 ISSCC Dig. Tech. Papers 5.2, pp.82-83（2018）
104）T. Yasue et al.: "A 33Mpixel CMOS imager with multi-functional 3-stage pipeline ADC for 480 fps high-speed mode and 120 fps low-noise mode", 2018 ISSCC Dig. Tech. Papers 5.6, pp.90-91（2018）
105）Y. Aoki et al.: "Effect of an 8K ultra-high-definition television system in a case of laparoscopic gynecologic surgery", Videosurgery and other Miniinvasive Techniques, **12**, 3, pp.315_319（2017）
106）https://www.insta360.com/product/insta360-pro
107）R. Fontaine: "A Survey of Enabling Technologies in Successful Consumer Digital Imaging Products", Proc. 2017 IISW, pp.22-23（2017）
108）S. Choi, et al.: "An All Pixel PDAF CMOS Image Sensor with 0.64 µm × 1.28 µm Photodiode Separated by Self-Aligned In-Pixel Deep Trench Isolation for High AF Performance", 2017 Symposium on VLSI technology Dig. Tech Papers, pp.T104-T105（2017）
109）春田 勉ほか：“A 1/2.3in 20Mpixel 3-Layer Stacked CMOS Image Sensor with DRAM”，映情学技報，**41**，10，IST2017-13，pp.19-22（2017）
110）https://news.samsung.com/us/samsungs-isocell-image-sensor-3-stack-isocell-fast-2L3/（2018）
111）https://olympus-imaging.jp/product/dslr/em1mk2/（2017）
112）https://www.sony.jp/ichigan/products/ILCE-9/feature_1.html（2017）
113）https://www.sony.jp/ichigan/products/ILCE-7RM2/（2016）
114）http://www.nikon-image.com/products/slr/lineup/d850/（2017）
115）C. Niclass et. al.: "A 0.18 µm CMOS SoC for a 100-m-Range 10-Frame/s 200x96-Pixel Time-of-Flight Depth Sensor", IEEE Journal of Solid-State Circuits, **49**, 1, pp.315-330（2014）
116）S. Koyama, et. al.: "A 220 m-Range Direct Time-of-Flight 688 × 384CMOS Image Sensor with Sub-Photon Signal Extraction（SPSE）Pixels Using Vertical Avalanche Photo-Diodes and 6 kHz Light Pulse Counters", Symposia on VLSI Circuits 2018（TBD）
117）A.R. Ximenes et. al.: "A 256 × 256 45/65nm 3D-Stacked SPAD Based Direct TOF Image Sensor for LiDAR Applications with Optical Polar Modulation for up to 18.6dB Interference Suppression", ISSCC 2018, 5.9（2018）
118）K. Yoshioka et. al.: "A 20ch TDC/ADC Hybrid SoC for 240 × 96-Pixel 10%-Reflection <0.125%-Precision 200m-Range Imaging LiDAR with Smart Accumulation Technique", ISSCC 2018, 5.7
119）Y. Kato, et. al.: "320x240 Back-Illuminated 10 µm CAPD Pixels for High Speed Modulation Time-of-Flight CMOS Image Sensor", Symposium of VLSI Circuits 2017, C22-1（2017）
120）B. Rodrigues, et. al.: "Indirect ToF Pixel integrating fast buried-channel transfer gates and gradual epitaxy and enabling CDS", IISW 2017, R27（2017）
121）劉 忠慧ほか：“高時間分解型CMOSイメージセンサを用いた時間分解近赤外分光法に関する研究”，映情学技報，**42**，10，p.1（2018）
122）Y. Fujihara, et. al.: "A Spectral Imaging System with an Over 70dB SNR CMOS Image Sensor and Electrically Tunable 10nm FWHM Multi-Band-pass Filter", Proc. 2017 IISW, R13（2017）
123）T. Okino, et. al.: "Ultraviolet and visible spectral imaging of hydrogen flames using an organic photoconductive film CMOS imager", IISW 2017, p.34（2017）
124）P. Delaunay, et al.: "Advances in III-V based dual-band MWIR/LWIR FPAs at HRL", Proc. SPIE **10177**, 101770T（2017）
125）D. Ting, et al.: "Antimonide type-II superlattice barrier infrared detectors", Proc. SPIE **10177**, 101770N（2017）
126）M. Razeghi, et al.: "Recent advances in InAs/InAs1-xSbx/AlAs1-xSbx gap-engineered type-II superlattice-based photodetectors", Proc. SPIE **10177**, 1017705（2017）
127）M. Sakai, et al.: "Development of Type-II superlattice VLWIR detectors in JAXA", Proc. SPIE **10177**, 1017714（2017）
128）L. Rubaldo, et al.: "Latest improvements on long wave p on n HgCdTe technology at Sofradir", Proc. SPIE **10177**, 101771E（2017）
129）P. Madejczyk, et al.: "Response time improvement of LWIR HOT MCT detectors", Proc. SPIE **10177**, 1017719（2017）
130）R. Pimpinella, et al.: "Advances in low-cost infrared imaging using II-VI colloidal quantum dots", Proc. SPIE Vol.10177, 1017728（2017）
131）K. Choi, et al.: "Resonator-QWIPs for 10.6 micron detection", Proc. SPIE **10177**, 101772A（2017）
132）B. Fisette, et al.: "Novel vacuum packaged 384 × 288 broadband bolometer FPA with enhanced absorption in the 3-14 µm wavelength range", Proc. SPIE **10177**, 101771R（2017）
133）F. Tankut, et al.: "An 80 × 80 microbolometer type thermal imaging sensor using the LWIR-band CMOS infrared（CIR）technology", Proc. SPIE **10177**, 101771X（2017）
134）C. Honniball, et al.: "Spectral response of microbolometers for hyperspectral imaging", Proc. SPIE **10177**, 101771W（2017）
135）L. Tang, et al.: "Functionalization of graphene by size and doping control and its optoelectronic applications", Proc. SPIE **10177**, 101770B（2017）
136）S, Ogawa, et al.: "High-performance mushroom plasmonic metamaterial absorbers for infrared polarimetric imaging", Proc. SPIE **10177**, 101771S（2017）
137）T. Kim, et al.: "Remote pedestrians detection at night time in FIR Image using contrast filtering and locally projected region based CNN", Proc. SPIE **10177**, 101772G（2017）
138）A. Bayram, et al.: "Forward-Looking Infrared Imagery for Landmine Detection", Proc. SPIE **10177**, 101772I（2017）
139）K. Shigeta et al.: "High spatial resolution performance of pixelated scintillators", Proc. SPIE **10132**, 101323Y（2017）
140）S. Shrestha et al.: "High-performance direct conversion X-ray detectors based on sintered hybrid lead triiodide perovskite wafers", Nature Photonics, **11**, 436-440（2017）
141）糠信武志ほか：“第三世代ワイヤレスタイプ可搬型DR（AeroDR3）の開発”，コニカミノルタテクノロジーレポート，**14**（2017）
142）A. Habib et al.: "High accuracy（100 electrons）, low power, integrated circuit for X-ray medical imaging in spectrometric and integration modes", Leti Annual Research Report（2015）
143）Laser Focus World 05/24/2016
144）産業技術総合研究所ほか：“超小型X線および中性子センサを用いたインフラ維持管理用非破壊検査装置開発”，平成28年度中間年報（2016）
145）Y. Kimchy et al.: "Radiographic capsule-based system for non-cathartic colorectal cancer screening", Abdominal Radiology, **42**, 5, 1291-1297（Jan. 2017）
146）A. Godavarty et al.: "Noninvasive surface imaging of breast cancer in humans using a hand-held optical imager", Biomedical Physics & Engineering Express, **1**, 4（Dec. 2015）
147）S. Manohar et al.: "Photoacoustic image patterns of breast carcinoma and comparisons with Magnetic Resonance Imaging and vascular stained histopathology", Scientific Reports, **5**, 11778（2015）

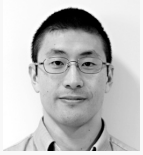
浜本　隆之（はまもと　たかゆき）　1992年，東京理科大学工学部電気工学科卒業．1997年，東京大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了．現在，東京理科大学工学部電気工学科教授．画像情報処理，コンピュテーショナルセンサ等の研究に従事．博士（工学）．正会員．

大高　俊徳（おおたか　としのり）　2013年，東京理科大学大学院工学研究科博士課程修了．2002年，マイクロンジャパン（株）に入社．以来，CMOSイメージセンサの研究開発に従事．2016年，ブリルニクスジャパン（株）に入社．現在，同社にて，先端技術研究開発に従事．博士（工学）．正会員．

池辺　将之（いけべ　まさゆき）　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）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）．

樽木　久征（たるき　ひさゆき）　2007年，東京理科大学大学院工学研究科修士課程修了．同年，（株）東芝入社．以来，CMOSイメージセンサ，CCDイメージセンサの設計，開発に従事．

小林　昌弘（こばやし　まさひろ）　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製品開発センター主任研究員．正会員．



黒田　理人（くろだ　りひと）　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，同大学准教授．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．

小室　孝（こむろ　たかし）　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，同大学講師．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（とくだ　たかし）　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，特にバイオイメージングデバイス，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．

船津　良平（ふなつ　りょうへい）　2002年，東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了．同年，NHK入局．北九州放送局を経て，2004年より，放送技術研究所にて，超高精細撮像技術の研究に従事．正会員．

近藤　亨（こんどう　とおる）　2003年，東京都立科学技術大学大学院工学研究科博士前期課程修了．同年，オリンパス（株）入社．2017年，東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了．CMOSイメージセンサの設計，研究開発に従事．博士（工学）．正会員．

廣瀬　裕（ひろせ　ゆたか）　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（株）（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．

藤澤　大介（ふじさわ　だいすけ）　2002年，豊橋技術科学大学大学院工学研究科電気電子工学専攻修士課程修了．2005年，同大学院工学研究科電子情報工学専攻博士後期課程修了．同年，三菱電機（株）に入社．同年より，赤外線固体撮像素子の研究開発に従事し，現在に至る．博士（工学）．

山本　洋夫（やまもと　ひろお）　1994年，千葉大学工学部電気電子工学科卒業．同年，浜松ホトニクス（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．