

最終講義

# イメージセンサ技術を究める

## Thorough Investigation of Image Sensor Technologies

須川 成利

Shigetoshi SUGAWA



本稿に、2022年3月4日に執り行った最終講義「イメージセンサ技術を究める」の内容をまとめさせていただきます。

### 1. 謝辞

まず初めに、皆さまにお礼を申し上げます。



図1 OB, 学生, スタッフの方々との記念の写真

\* 東北大学未来科学技術共同研究センター (NICHe) 教授プロジェクトリーダー  
東北大学リサーチプロフェッサー名誉教授

図1は、仙台及び東京で開催したOB会の際の皆さんの集合写真です。ここに参加されていなかった方々もおられますので、ちょっと小さい写真になりますが、2002年度から2020年度まで指導させていただいた学部卒業生12名、修士修了生56名、博士の修了生120名の皆さまへも感謝を表すために、顔写真を並べさせていただきました。また、東北大学に移籍後に学会や企業等の方々と交換した名刺の数は延べ1万枚を超えました。こうして教育研究・共同開発活動を進めてこられたのも皆さまのご協力・ご支援のおかげでございます。あらためて皆さまに心より感謝申し上げます。

## 2. 現在 2022年

NICHe 未来情報産業研究館では20年以上にわたり産学連携を基軸とした複数のプロジェクトを継続的に推進してきました。これらのプロジェクトは、図2に示すように、NICHe が設立した1998年、大見忠弘先生が先駆的に始められたものを、2011年から私がリーダーを引き継ぎ、脈々と多くの実用化・社会実装の成果を休むことなく生み出しつつ今日に至っています。世界最高レベルのクリーンルーム拠点を維持し続け、常に大学という中立な立場で、厳格なプロジェクト期間の設定をして、ゴールは実用化・事業貢献であるという精神でやってまいりました。

2020年度には、クリーンルームが建設されてから20年を経て老朽化が進んだおもな附帯設備を更新しました。この更新整備によりクリーンルームはこの先15年以上世界トップレベルの先端半導体研究開発施設として皆さまにご利用いただけるでしょう。

また、昨年度、本研究館が東北大学半導体テクノロジー共創体の拠点として位置づけられ、国の半導体・デジタル産業戦略とリンクしたあらたな活動が開始されました。ここでは長年培ってきたウルトラクリーン技術と超高性能イメージセンサ技術を融合して、最先端の半導体製造中の極小

パーティクル計測やガスフロー可視化、部素材の超クリーン化、究極性能イメージセンサなどの開発・試作実証を行い、わが国の強みである半導体製造装置・部素材技術およびイメージセンサ技術の一層の競争力強化と新たな分野開拓に向けた技術開発を推進していきます。半導体装置、部素材、イメージセンサは、いずれも日本が大変強い分野です。アカデミアの立場からこの強い分野の競争力を維持しより一層高めていくことに尽力することも我々の使命であると考えています。

また、ご承知のように、集積回路のチップを設計・試作するには多大な費用がかかります。なかでも特殊な製造プロセスを必要とするイメージセンサの設計・試作においては大学人には試作できる場もないという状況でした。そこで、我々が自ら先んじて立ち上げてきたイメージセンサの設計・試作環境を、わが国のアカデミア限定にしていますが、8年前ほど前から積極的に開放し利用していただく学学連携のプロジェクト(Sプロと呼んでいます)を進めています。現在10の大学研究室が参加しここからも優れた成果が発信されるようになってまいりました。

この40年間、イメージセンサの開発を中心に、ひとつの土台を築いては、その隣へ一歩踏み出した。また次の土台を築くといったことを繰り返して、イメージセンサの究極の性能を追究してきました。本講でその内容をご紹介します。

## 3. 学生の頃 1982年まで

イメージセンサは光と電子という2つの素粒子のふるまいが、人間が体験できる性能、画質に直接的に現れるデバイスです。

光の本質を意識し始めたのは高校時代でした。同級生の友達から君は相対論を勉強したかと言われたのがきっかけです。大学では、そんなことがあったからかもしれませんもともと興味を持っていた物理学を専攻し、4年生からは素粒子宇宙物理実験の講座の研究室に入り、高エネルギーの宇宙線が地球大気に突入したときに発するチェレンコフ光を観測する研究に従事しました。観測実験は山梨県明野村の東大宇宙線研究所で、毎年冬になると空気が冷えて安定し揺らがない4か月間ぐらいの間夜に山に籠もり、3年にわたり零下の気温の中で夜空を見上げて行いました。おもな観測対象は超新星爆発により銀河中心あたりで発生し光速に近い速度で地球大気に突入する $10^{15}$ か

プロジェクト名	リーダー	未来情報産業研究館竣工	年度(西暦)
知的機能を備えたネットワーク対応電子システム の創出	大見忠弘	98 99 00 01 02 03 04	
引領記念館第一工機 神製品化対応新生産方式 の創出	大見忠弘 須川成利 (11年)	05 06 07 08 09 10 11	
新半導体生産方式の開発	須川成利		12 13 14
先端半導体センサ・デバイス開発	須川成利		15 16 17 18 19 クリーンルーム 付帯設備更新
クリーンルーム整備共用 化の推進と半導体製造 技術・センサ技術の開発	須川成利		20 21 22 23 24

図2 未来情報産業研究館におけるプロジェクト

ら $10^{20}$ eV くらいのエネギーのプロトンから発せられるチェレンコフ光です。これを地上に置いた直径約30cmの複数のフォトマルと手作りの検出回路を用いて1フォトン検出感度で観察するというようなことをやっていました。このチェレンコフ光と周り大体4～5キロメートル四方に設置された電子とミュオンを観測棟のデータを同期して、プロトンの飛来方向やいろいろな素核反応を解析していました。物理学専攻だったのでそんなことをやっていたということです。この辺から光と検出器との本格的な出会いがあったということになります。

ちょうどこの学生のころに量子電磁力学の正しさが実験的にも証明され、光と電子の実態(観測されるもの)の中にひそむ確率振幅ベクトルというもののお考え方を学びました。

当時はすでに光の速度が一定であるということも皆が認識していたわけですが、思い出しますと、あるとき指導教授から、光の速度よりも速い粒子がこの $10^{15}$ eVを超える高いエネルギー帯の中にはあるかもしれないから測定した全部のデータの前後関係の同期を取って調べ直してみようという話ができました。当時まだパソコンもデジカメもない時代でしたので、ストレージオシロの画面に現れたフォトマルの出力信号波形をフィルムカメラで撮影し(いつ飛来するかわからないランダムな事象でしたのでこれはさすがに夜通しの手作業はムリでした。そこでイベントドリブンのトリガ信号をカメラ撮影と同期させる仕組みをつくりました)、現像したネガフィルムを方眼紙の上に投影して手でトレースして波形を写し取り(お金がなかったので印画できませんでした)、それと周りの観測棟の測定データの時間的な関係を統計的に解析するというのを何か月やった記憶があります。結局、光速よりも早い粒子を見つけることはできませんでした。科学は疑うことから始まるかもしれないということの現場をこのとき実体験したわけですが、疑わなくてもいいこともあるということも同時に勉強しました。

#### 4. 会社時代 1982-1999年

学生時代に実験に没頭していたこともあり就職活動が遅れ、先輩のお陰もあってなんとかキャノンに就職が決まったのは、卒業直前でした。1982年に入社したキャノンで配属されたのは「わが社でもシリコンを始めよう」というような部署でし

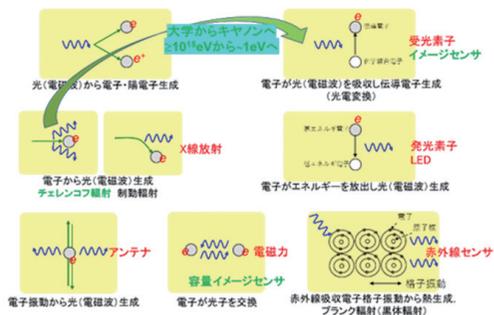


図3 光と電子の相互作用

た。私も含めて4人しか部屋にはいなかったところで新規にシリコン技術に挑戦しようということだったので、私も含めみなシリコン技術は初めてでして、私に至っては $10^{15}$ eV以上から～1eVへの15桁以上の世界感の変化に襲われ(図3)、もう全く違う惑星にきたような感じでした。当時は S. M. Sze の Physics of Semiconductor という教科書の第2版が出たときでしたが、そこでそれを買って1年間ぐら勉強し、ほぼ全ページどこの場所にもどのグラフと式が出ているかというのほぼ全部頭にたたき込んで、なんとかこの15桁以上のエネルギー差を埋めました。

#### 4.1 位相差検出オートフォーカスセンサ

キャノンにおいては、最初から CMOS イメージセンサをやろうとしたわけではありません。ただ、箱屋のメーカーであっても、自前で独自のキーパーツは作っていかねばいけないという機運が沸き上がってきたときで、中でもまず、フィルムカメラの撮影で多くの人がストレスを感じていたピント合わせを自動化するオートフォーカス(AF)センサの開発に着手しようということになりました。1983年の話です。

当時キャノンには CMOS の製造技術はなく  $5\mu\text{m}$  デザインルールの Bipolar しか作ることができませんでした。そのような制約条件の中で考え出したのが BASIS という Bipolar 型のイメージセンサ技術です。これは、Bipolar トランジスタのベース領域のリセット電圧を画素内のエミッタフォロアで列容量に読み出し(容量負荷読み出して低消費電力化しました)、続いて受光後に光電変換され蓄積された光正孔電圧を同じエミッタフォロアからもう一つの列容量に読み出すという方式のイメージセンサ技術です。今の CMOS というと、Bipolar を MOS に置き換えれば 3 Tr 型の列 CDS 方式に該当します。

この画素を1次元に並べてリニアイメージセンサのAFセンサとし、1眼レフカメラのハーフミラーの直下に、2つ玉レンズ(通称メガネレンズ)を介して、2次結像面上に設置します。シャッターボタンを半押しすると、非破壊読み出しでAFセンサからピーク信号レベルを出力してそのときの光量に適したAF露光時間を自動設定し、なんと10 $\mu$ sオーダで画面中央部にフォーカスを合わせることができるAFセンサを完成させました。このAFセンサ技術は1987年にスタートした1眼レフフィルムカメラEOSシリーズの最初の製品から標準搭載される技術となりました。

このAFセンサに導入した技術で常識を覆すという意味で画期的だったことは、10 $\mu$ m超の画素ピッチの1/256の0.1 $\mu$ m以下の画像位相ずれを検知していたことだったと思います。これは、ある画素で発生した光電荷が、光入射空間位置に依存した割合で、隣接する画素にも拡散させてわざと漏れこむようなゆるい電氣的素子分離構造を導入したことによります。これにより大きな画素でもその中のどこの位置に光が入射したかをサブピクセルの解像度で検知していました。今日の微細画素でもピッチは0.6 $\mu$ m程度ですから、35年前にこれよりもはるかに高い精度でAFを実現していたこととなります。

#### 4.2 研究部で充電

その後、数年間は研究側の部署に移り、いろいろな試みをさせてもらいました。ポリやアモルファス、化合物などの半導体材料のイメージセンサへの適用の可能性を探ってみたいでしたが、最後まで結晶シリコンを置き換えるものにめぐり会うことはできませんでした。回路やプロセスの知識を吸収したのもこの頃です。この間に、今から考えるととてもプリミティブなものです。プロセスシミュレータと光入射ができるデバイスシミュレータをPC FORTRANで自作してデバイス構造設計の勘所を磨いたりもしました。また、学会にも通い、他社の技術者の方々との親交を深め出したのもこの頃からです。キヤノンにいた17年半は会社の方針で学会発表や論文投稿はほぼできませんでしたが、足繁く通って人脈形成だけは積極的にやっていたので、業界では知られた存在になっていました。メモリやCPUなどの主流の半導体分野とは異なる片隅の亜流の分野であったイメージセンサの技術者は競合会社のライバル同士でありながらも会社の垣根を越えて慰めあった

り認め合ったりして皆仲良くなっていました。そこで知り合いになった方々はこの国の今日のイメージセンサ産業発展の礎を築かれてきた方々です。今でも親しく交流させていただけることは大変ありがたいことだと思います。この研究部時代には海外での研究活動もさせてもらい時間をかけて多くのことを充電することができました。

#### 4.3 高画質4Tr型CMOSイメージセンサ

1994年に本社部門の開発センター内にイメージセンシング部門が発足し、私はそこの責任者に指名されました。そのときのセンターはBipolar AFの成功体験を長く引きずって世代の遅れた半導体製造ラインを使いながら社内向けの半導体を細々と開発・製造するような環境でした。自分たちのセンターの存続も先が見えない上に、キヤノンの看板のカメラ事業も売り上げが落ち込み厳しい状況が続いておりました。

そのような状況の中で、あらたなイメージセンシング技術を考えて事業拡大に貢献せよというような責務を任された訳です。なにもベースがなく先も見えない中で全権委任するから何か新しいものを考え出せよというような命題が託されたこととなります。

そのような中で、将来のカメラのデジタル化の時代を予見し、いろいろと思考を巡らせた結果、考え出したのが、高画質4Tr型CMOSイメージセンサ技術です。

図4に示した1枚の図は、結果的には全社の取

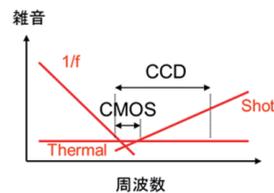


図4 イメージセンサのおもなノイズの周波数依存性

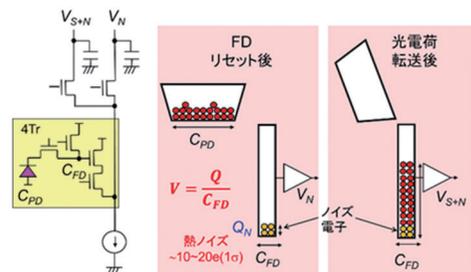


図5 高画質CMOSイメージセンサのノイズ除去動作

締役に答申して、大きい投資を得て、この開発をプロジェクトとしてスタートしたきっかけになったものです。当時はCCDイメージセンサが全盛の時代でしたが、CCDでデジカメ用のイメージセンサを作ると原理的にさらなるノイズ低減化には限界があり、また、消費電力が大きくて電池の消費量が激しく、モバイル機器には向かないという課題がありました。図4では、1MHzオーダ付近の帯域で熱ノイズをキャンセルできれば、低周波の $1/f$ ノイズ、高周波の電流ショットノイズ、これが谷底になって、帯域が広いCCDよりもはるかにいい低ノイズの高画質イメージセンサをつくれるという概念を示しています。

図5は、新しく開発した後に4Tr型と呼ばれるCMOSイメージセンサの画素のポンチ絵と動作方法です。動作はまずシリコンの中につくったフォトダイオード(PD)で光電変換された電子が一定時間蓄積した後、フローティングディフュージョン(FD)と呼ばれる容量の小さい端子に電荷を転送して光電変化をします。ただ、FDは前の情報が入っているといけないのでリセットスイッチを使って毎フレーム毎に一定電圧にリセットしますが、このときにFDに毎回ランダムに熱ノイズが取り込まれます。熱ノイズは電子の個数でいうとガウス分布の1シグマで大体20~30個ぐらいのノイズに相当します。そこでまずこのノイズ信号を電圧に変換してソースフォロア(SF)で $V_N$ として読み出して、列のところにある容量に電圧信号として蓄えおき、次に、このFD上に光電変換されて発生して蓄積された電子を転送して重ね合わせて、同一のSFで $V_{S+N}$ という形で、もう一つ別の列容量に読み出します。この2つの信号を1MHz帯域のあたりで引き算する。これで熱ノイズをキャンセルして、谷底のノイズレベルにしようというものです。

■ ロジックアナログ混載45点AFセンサ



■ 超低コストリニアセンサ



■ 低消費電力高画質エリアセンサ



図6 CMOSイメージセンサの実用化の開始(キヤノン)

先のBipolar AFセンサと比べてみると、お気付きのように、完全電荷転送構造を導入したこと、エミッタフォロアをSFに変えたこと以外は同じです。

実は、Bipolar AFセンサを開発したときに、残留ノイズが、リセット時に残る熱ノイズ(過渡的リセットを使っていたのでノイズ量は $kTC$ の $1/\sqrt{2}$ )と、読み出し動作を行ったときにエミッタからベースに注入される電子の一部(平均として $1/hFE$ の割合)がベース中の正孔、すなわち光発生し蓄積していた正孔が再結合し、その再結合量が確率的にゆらぐことが原因となっていることを突きとめていました。CMOSにすれば完全電荷転送構造とSFを導入することで、ノイズレベルをBipolarのときの20~30電子から2電子程度に低減できることを予測していました。

この高画質CMOSイメージセンサ技術は、新しい着想というものが、突然生まれるものではなく、目の前にある課題の本質、原理原則をしっかりと見抜くことから生まれることを証明したひとつのよい事例ではないかと思えます。

図6に、CMOSイメージセンサの実用化の開始時期の製品を紹介します。高画質CMOSイメージセンサ技術は、まず1996年に45点AFセンサ、スキャナ用リニアセンサとして実用化しました。

一方、エリアセンサを開発するには桁違いの技術力と投資が必要でしたので、あらためて経営陣および事業部を説得し、プロジェクトを起こし、大手半導体メーカ(三菱電機さんです)も味方につけて、新しい半導体量産製造ラインを立ち上げ、2000年には、最初の300万画素の4Tr型高画質CMOSイメージセンサを開発し、世界に先駆けてデジタル一眼レフEOSカメラに搭載することができました。

ただ、当時はCMOSというすでに米国式の3Tr型が市販されており、CCDに比べて画質が悪いというレッテルが張られていた時代です。今度のは決してそんなことはないということなのですが、結局、画質の良いCMOSイメージセンサだと認められたのは2004年のアテネオリンピックからです。このオリンピックでキヤノンのデジタルカメラがプロの報道カメラマンの方々に広く採用され、ようやく世界がその画質を認めました。この頃に大容量の映像の記録と送信が行えるインフラが整ってきたことも追い風になったかと思えます。

この高画質CMOSイメージセンサ技術は、そ

後のカメラ事業部の売り上げを1兆円超に躍進させる原動力となっただけでなく、現在スマホ・デジカメ・監視・車載等で使われているCMOSイメージセンサの基本技術となりました。日本ゼオンの荒川公平氏が「常識を塗り替える強い意志を持って行動する人物とそれをサポートする経営陣が揃った時イノベーションが起きる」と述べておられるがまさにその通りのことが起きたこととなります。

後日談になりますが、30代半ばの私に対して巨額な投資を決断した理由を経営者に聞いたところ「これが失敗しても社内には先端の半導体工場が残るから大丈夫」という答えでした。開発の成功は半信半疑、失敗しても使えるものが残ればよい、まあ、経営者の英断の根拠というものはいつもこんなものかもしれません。

#### 4. イメージセンサ技術の発展 2000年以降

時代を振り返ってみますと、1980年代から2000年にかけてほぼCCDしかなかった時代から、このCMOSセンサが画質に対する要求が大変厳しい1眼レフカメラで成功したことがきっかけとなり、その後続々とCCDからCMOSへのシフトが進み、現在では99%以上がCMOSセンサになるということになりました。

イメージセンサは現在世界中で当たり前のように使われるようになっていますが、これがイメージセンサのすべてではありません。スマホ、デジカメ、PC、家電等で使われているのは、いわゆる人間がその画像を観賞するもので、今ではこれをイメージング用のイメージセンサというものに分類されます。この中で特に時代を変えたCMOSイメージセンサとしては、前述したキヤノンのCMOSイメージセンサを始めとして、iPhoneに搭載されたオムニビジョンさんのワンチップカメラ、それからソニーさんの裏面照射型CMOSイメージセンサ、および積層型CMOSイメージセンサなどがあげられます。

最近ではスマートフォン1台に複数のイメージセンサが載るようになって、2016年の市場予想カーブを大きく超えさらに市場拡大が続いています。

イメージセンサというものは、狭義には、もともとは光の信号を電子の信号に変えるこの画素アレイが並んだものだったわけですが、そのうちにマイクロレンズ、カラーフィルタ、アンプ、AD

変換器を搭載したものになり、現在ではイメージセンサモジュールとして、レンズ、DSP、メモリ、I/Oなども全部入れたものを広義のイメージセンサというふうに称するようになりました。

画像処理をどんどんやることも当たり前のようになっています。画像処理もデジカメの初期の頃の処理は薄化粧だったのですが、それから目立たぬ厚化粧になり、最近ではアプリによる盛り盛りの画像加工が普通に使われるようになりました。皆さんもweb会議で自顔を配信するときに背景を変えたりしている方がおられるかもしれません。写真というのは「真を写す」と書くのですが、イメージセンサ・カメラの高性能化が進んだ結果、もはや写真、とは言いがたい画像が出回ってきているということで、ちょっと嘆かわしいところもあります。

嘆かわしいついでに、この40年間におけるお父さんの権威とカメラ技術の関係をまとめてみるとつぎのようなことがいるかと思えます。

フィルムカメラの時代：コンパクト、写るんです、プリクラ、・・・、そして1眼レフ。よい写真といえばお父さんの出番。さすがお父さんが撮る写真はきれいといことで父親の権威が保たれていました。フィルム写真は1枚1枚が有料で現像までに時間がかかる分、シャッターを押すまでの準備、その瞬間・歴史を切り取る思いなどが、仕上がりまでのわくわく感に結びついていました。世界の10%程度の人が「写真」を文化として楽しんでいた時代です。

デジカメ普及の時代：その後、デジカメが普及し性能・機能も高まり、誰でも気軽にきれいな写真を撮れるようになりました。その後携帯にもカメラが標準搭載され、何枚撮っても無料で、瞬時に撮影結果を見られることで、誰もが日頃から写真を撮れるようになりました。その結果、写真撮影の際に、徐々に、お父さんの出番が少なくなってきました。

スマホの時代：カメラは年々ますます高性能化・高機能化を続けており、世界中の90%以上の人々が写真や動画を撮影し、すぐにSNSなどに投稿して、誰もが映像情報を楽しめる時代になりました。一方で撮影はカメラ任せ、最近ではプロもカメラ任せ。写真加工アプリで、美肌に、目は大きく、鼻は小さく、体は細く、足は長く、おまけに背景はリポート、周りの人まで消去、雨の日も晴れという状況で、シャッター速度や絞り、焦点距離、被写界深度などの撮影条件を気にして

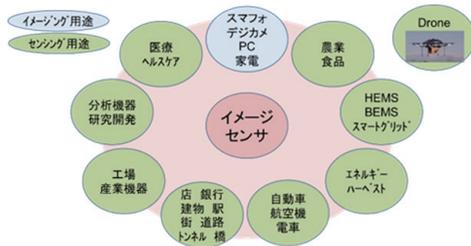


図7 イメージセンサ技術の応用拡大

撮影している人は絶滅危惧種、一眼レフはオタク扱いとなり、父親の権威はもはや完全に喪失しました。

イメージセンサ技術の発展の初期から開発に携わってきたわが身としては、これだけカメラが普及し誰もが撮影を楽しめるようになったのは実に喜ばしいことだと思いますが、たいへん複雑な気持ちであります。

一方で、イメージング用途以外に、人間ではなく機械がその映像、画像の情報を利用するセンシング用途のイメージセンサが、図7に示す緑で囲ったような分野で需要が大いに高まってきました。これらは、盛り盛りの画像処理が許されるイメージング用途ではなく、純粋に画質の高い撮影信号が必要になる分野であり、今後このセンシング用途が伸びてくる分野になると期待されています。ただ、センシング用途のところでも、海外勢が高性能なイメージセンサの開発をどんどんやってきていますので、現在、我が国にとってこれは大きな課題となってきています。

## 5. 大学時代 1999年以降

東北大学から半ば強引？なハンティング話があり、1999年秋に東北大学に移籍することになりました。当初予定ではその年の4月に着任することで大学側の人事が進められていましたが、デジタルEOSの量産計画が少し遅れたことで結局9月の着任となりました。大学では着任が遅れるということは前代未聞の事態だったようで関係された先生方にはたいへんなご迷惑をおかけいたしました。私を大学に招いてくださった大見忠弘先生には「現在 CCD という今川の大军を打ち破るべく CMOS を携えて桶狭間に向かってるところです。今しばらくの猶予を頂戴したい」というような連絡をしたところ「よしよかった。こちらは任せろ」というご返事をいただき着任遅れの調停を

していただきました。

当時の大学は企業とはまったく異なる価値観をもった世界でしたが、東北大学では1998年にNICHeも発足し、産学連携を本格的に進めようとする動きが始まろうとしていました。私にはいづれ産学連携の推進役になることを期待されていたようです。

その頃は、これからカメラのデジタル化が立ち上がってくるというようなときにコンシューマ用途のイメージセンサの高性能化開発と普及が大きな市場ターゲットとなっていました。一方でセンシング用途のイメージセンサ分野では CCD が全盛で CMOS 化がほとんど進んでいないというような時代でした。

センシング用途のイメージセンサは今まで申しましたとおりですが、特に原理的に物理限界を極めていくというところにチャレンジしないといけないとできないというものになります。そこで、やるからには王道の性能、すなわち、感度、ダイナミックレンジ、速度、光波長帯域といったイメージセンサの基本性能をすべて世界に先駆けて圧倒的にいち早く高めて実用化し産業界に提供していかどうかというのが勝負なると考えました。そのベースになるところを大学でもやろうというのが、私の決意でした。

このように、大学でやっていく仕事のビジョンとミッションを考えたわけですが、大学に移ってきてから5年間は前職との契約で機密保持をしなければいけない、沈黙の5年間と称していますが、じっと潜伏しながらアイデアを練る時期が続きました。これは大学人としては大変致命傷的なことですが、何とかここを耐えました。

最初のイメージセンサの学会・論文発表が2005年、48歳のときです。そこから皆さんに引用・利用していただけるような特許や論文、実用化の実績などをどんどん今日に至るまで継続して出してきました。

古き良き時代は、よい基本技術シーズを産めば、企業が応用技術・ビジネス戦略を考え、製品まで育ててくれましたが、大学に移籍したころからは、量産、信頼性、歩留りまで大学でも保証してほしい、また、ビジネスモデルも提示してほしい、さらに製品化するチーム、量産のプロデュースもやってほしいというような要求が頻発するようになり、大学でもここまでやらないと企業に技術を採用してもらえない、実用化に至らないのかというような感じで、開発研究の環境が大きく変

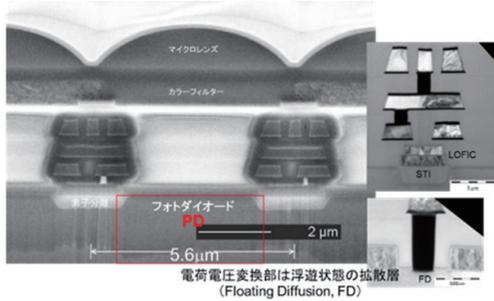


図8 CMOS イメージセンサの画素の断面の一例

わってきていると実感しました。大学ですと、まずはとんがった技術の創出をしなければいけないのですが、これだけにとどまらず、システム技術・量産技術・ビジネスモデルも一緒に提示してその実行責任も果たすところまでやらないといけません。それまで休まずせせせとやってきたおかげで、今日も多くの大学や企業の方々とお付き合いができていなくなったと思います。

さて、イメージセンサ技術は、いままでお話ししてきたことをここで改めてまとめてみますと、2次元のアレイに受光部を配置し、ここで入射光子を電荷、電子または正孔に光電変換し、その電荷を露光時間の間に蓄積して、その後転送し光電変換して電圧信号に変換した後に読み出す、つまり、受光・光電変換・蓄積・転送・読み出しをやるというものです。そして、これを作り上げるには、光学技術、集積回路製造プロセス技術、デバイス構造技術、回路設計技術、実装技術、カメラ技術、測定評価技術、信号処理技術、全ての総合技術が必要になります。量子電磁気学的な光と電子のふるまいから始まり、デバイス構造、エネルギーバンド、回路、周波数応答、撮影された画像、ばらつき、ノイズ、信頼性などが、電子一つ一つの動きとリンクして頭の中で見えてくる、ここまで到達すると職業病になるわけですが、これがイメージセンサ技術者として一人前のレベルに到達したと言えるものになります。

図8は、後述する最初の広ダイナミックレンジ LOFIC CMOS イメージセンサの5.6µm角の画素の断面 SEM 写真ですが、イメージセンサは画素中にマイクロレンズ、カラーフィルタ、絶縁膜、それからシリコンのPD、回路が入るといことがわかる一例になります。シリコン集積回路技術を使ってこれをアレイに配置し周辺回路も加えて精緻に作り込んでいくことになります。

### 5.1 ノイズ

イメージセンサでは、1電子の信号のばらつき、ゆらぎ、リークでも画像にあらわれるということから、信号の単位を電圧とか電流でなく電子数で表現することが一般的です。したがって、電子がどの構造位置でどのようにふるまうかを電子の気持ちになって全体を見渡して大変注意深く洞察しながら開発していかなければなりません。この辺が他の集積回路と大きく違うところです。

電子1個が光電変換された電圧信号レベルを1電子 (1e) 信号と呼びます。1e 信号レベルは通常電圧でいうと100から200µV、電流でいうと $10^{19}$ A から $10^{17}$ A くらいのオーダーになります。0.15e 程度のレベルまでノイズを下げるとノイズのメディアン値基準でフォトンカウンティングができるというようなレベルになります。ノイズ分布のピーク値も目立たないようなフォトンカウンティングのノイズレベルはさらに低く0.02e レベルくらいとなります。究極のセンシング性能を目指した高感度イメージセンサではこのような究極のノイズレベルが求められます。

究極性能のイメージセンサを大学でつくろうというときにまず重要だと思ったことは、どの集積回路の部位の中でどんなノイズが発生するかということ、今一度初心に戻って、きっちりと究めなければいけないということでした。そして図9に示すように、究極性能イメージセンサ開発の5軸の第0軸として位置づけました。

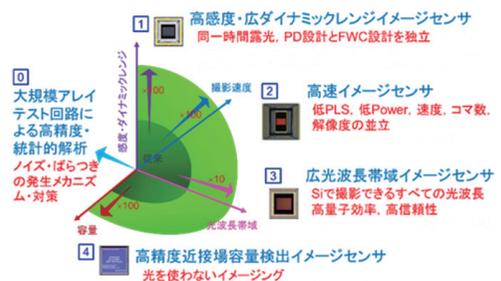


図9 究極性能 CMOS イメージセンサ開発の5軸

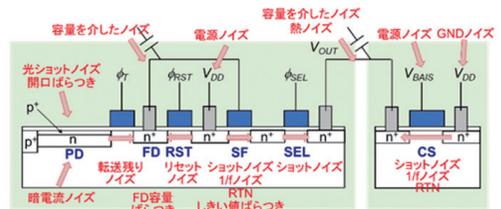


図10 CMOS イメージセンサにおけるおもなノイズ

	熱雑音	ショット雑音 キャリア注入雑音	量子雑音	1/f雑音
等価回路				
雑音源	熱雑音電圧源 $v_n = \sqrt{4kTR\gamma}$	ショット雑音電流源 $i_n = \sqrt{2qI\gamma}$	量子雑音電流源 $Q_n = \sqrt{N}$	1/f雑音電圧源 $v_n = \frac{1}{\sqrt{C}} \sqrt{\frac{f_L}{f_H}} \frac{df}{f}$
各周波数における雑音	$v_n = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{4kTR}{1 + j\omega RC}} \frac{1}{1 + j\omega RC}$	$i_n = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{2qI}{1 + j\omega RC}} \frac{1}{1 + j\omega RC}$	周波数依存性無し	$v_n = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{4kTR}{1 + j\omega RC}} \frac{1}{1 + j\omega RC}$
雑音電圧	$v_n^2 = \frac{4kTR}{1 + 4\pi^2 R^2 C^2 f^2} df$ よ $v_n = \frac{i_n R}{\sqrt{C}}$	$i_n^2 = \frac{2qI}{1 + 4\pi^2 R^2 C^2 f^2} df$ よ $i_n = \frac{I}{\sqrt{2C}}$	$Q_n = \sqrt{N}$ よ $Q_n = \sqrt{N}$	$v_n^2 = \frac{1}{C} \sqrt{\frac{4kTR}{1 + 4\pi^2 R^2 C^2 f^2}} \frac{df}{f}$ よ $v_n = \frac{1}{\sqrt{C}} \sqrt{\frac{4kTR}{1 + 4\pi^2 R^2 C^2 f^2}} \frac{1}{f}$ よ $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$

図11 容量終端におけるお主な雑音電圧

そこで初めて大規模アレイテスト回路というものをつくりまして、ノイズ・ばらつきの発生メカニズムを定量的に明らかにして対策を行うということから活動をスタートしました。5年間の潜伏期間の間にこういう最も基礎的なところから始めたということです。その後、第1の軸として高感度・広ダイナミックレンジのイメージセンサ、第2の軸として高速イメージセンサ、第3の軸として広光波長帯域イメージセンサ、それから第4の軸として光を使わない仮想光子を画像にするというイメージング、これらの開発研究を進展させていきました。これらについて簡単にですが順番にご紹介したいと思います。文献1) 2) により専門的な技術内容や文献等のリストを紹介していますので、ご興味のある方はご参考にしていただければ幸いです。

まず、第0軸のノイズ・ばらつき発生メカニズムの検討です。1個2個のデバイスも測っていてもトップデータは得ることができるかもしれませんが、集積回路の量産に使える統計的に有用なデータ(知りたいのは少数の悪いデータ)を得ることができません。そこで基本的には5σ程度の統計的ばらつきが得られるように1ショットあたり100万個のデバイス性能を測るという目標にしました。ウェーハ全面でいうと億を超える数になります。これを電圧信号としては10μVレベルの精度で1秒以内に、また電流信号としては10<sup>-17</sup>Aレベルの精度を100秒以内に測ることのできる大規模アレイテスト回路というものを作りまして、これでイメージセンサだけでなく他のいろいろな集積デバイスも含めた低ノイズ化の技術的な課題を見出すということから始めました。その結果、だいたいのノイズの発生原因と定量的な振る舞いを明らかにすることができました。

実際、CMOSイメージセンサの中で、PD、FD、リセットスイッチ、SF、画素選択スイッチ、

それから、列に設けた定電流源など、これらの一部を図10に表しましたが、赤字で書いたようなノイズがここに入り込むということを定量的に明らかにしました。

イメージセンサでは容量終端のところに現れる電圧信号値が重要です。教科書によるとノイズは電圧で書いてあったり、電流で書いてあったり、電荷で書いてあったり、はたまた周波数軸で書いてあったりと大変厄介な見かけのものになっています。お主なノイズが容量のところはどういうものになるかをまとめたのが図11です。

このようにしてイメージセンサの中で発生するノイズを全て調べ上げるということをやった結果、現在、大体のノイズは低減ないしは影響をなくすることができました。

未だ解決できていないノイズは、物理的に残る光ショットノイズ、製造技術の不熟さから発生する暗電流、ランダム・テレグラフ・ノイズ(RTN)、そして、大学時代に研究していた宇宙線が原因となる粒子の飛び込みといったものになります。

光ショットノイズについてはさまざまな文献で解説されていますのでそちらに説明を譲ります。光ショットノイズの発生は物理で決まりますので原理的に克服は難しいです。

図12は画素周りの模式的な断面構造図と暗電流発生原因を示した図です。光電変換で発生した電子を蓄積しているPDの領域に、露光時間の通常60分の1秒程度、長いときには1秒を超えるような間に、暗電流電子が1個2個と入り込みそれがノイズになります。暗電流が発生する原因は数多くあります。シリコン結晶欠陥、それからイオン

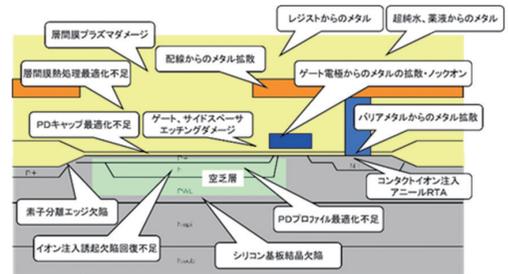


図12 暗電流発生のお主な製造プロセスの原因

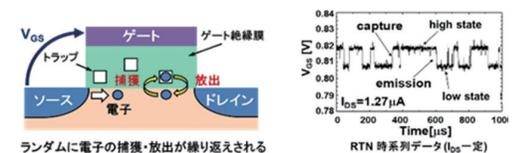


図13 ランダム・テレグラフ・ノイズ

注入、配線、プラズマプロセス、さらに超純水、薬液、レジスト等からのメタル汚染などが、おもな原因として挙げられます。

暗電流はセンシング用途のイメージセンサが要求するレベルからみると未だ改善が必要な状況が続いています。製造プロセスが微細化プロセスになればなるほど、大変きつい条件で加工などをしなければいけなくなることから、ますます暗電流が悪化するという状況になっています。イメージセンサの技術者は、微細化もほどほどにしないといけないなということを理解しています。

次に RTN は、図13に示すようにトランジスタとゲート絶縁膜の界面、または絶縁膜内の数 nm 以内のところに1電子のトラップがあることが原因となり発生します。このトラップにチャネル内を走行している電子のひとつが捕獲されたり放出されたりします。捕獲されたときにクーロン障壁ができて、チャネル内を走行する電子に影響を及ぼします。捕獲放出が時間的にランダムに繰り返されることとなりますが、たった1電子のトラップの影響で大きいときには数10mV も出力電圧が変動します。イメージセンサでは RTN はフレーム毎にランダムに現れる白キズの原因になります。RTN は完全な克服はできていませんが、ある程度軽減するプロセス技術がいくつか試みられています。

最後に問題になるのが宇宙線ですが、これは長期信頼性に影響を与える要因になります。地球に飛来する宇宙線のうちエネルギーが低いものはほとんど太陽から来るものになりますが、これらは地球磁場が結構守ってくれます。一方、銀河中心辺りで超新星が爆発したときにできる高エネルギーの粒子が地球に到達したときには、大気のプロトンと衝突を起こし地上に大量の中性子のシャワーを降らせる現象が起こります。この中中性子がデバイスの中に入って、そこでシリコン結晶や界面に欠陥を発生させたり、またはシリコン内で大量の電子正孔対を発生させたりします。

中中性子のフラックス量は、地上では場所によって変わりますが、例えば標準的な量のニューヨークでも100MeV の高エネルギー中中性子が、大体1 m<sup>2</sup>当たり、1日に1個のレベルになります。なお、上空1万メートルまで上がると地上の100倍に増えます。つまり飛行機に乗りますと大体地上の100倍ぐらい、この中中性子フラックスに照射されるということになります。イメージセンサの場合は、これが当たりますと白キズがだんだんと増えてく

るという状況になります。また、微細な集積回路ではトランジスタ論理が誤動作したりメモリした信号が反転したりするという現象が発生する原因にもなります。まさか学生時代に測っていた宇宙線が、その後自分がやってきたイメージセンサの信頼性にこれだけ悪影響を及ぼすということになるとは、さてこの問題はどのように解決すべきかと悩みは尽きません。

## 5.2 広ダイナミックレンジイメージセンサ

イメージセンサの基本性能を究極まで上げようというお話をいたしました。実は感度と飽和 (FWC)・ダイナミックレンジ (DR)、速度・フレームレートと消費電力、サイズと画素数・解像度等は、それぞれ一方を良くすると一方が悪くなるというトレードオフの関係にあります。これらのトレードオフをすべて解消することが、王道の究極性能を目指すポイントになります。

すべてのトレードオフを一気に解決することは簡単にはできませんので、今までひとつずつトレードオフの解消に取り組んで一歩ずつ高みを目指してきました。

図14に一部ですが開発したイメージセンサのチップ写真の例を示します。

1つ目の軸が、感度と FWC・DR のトレードオフの解消です。DR 拡大の境界条件、前提条件として設定したのは、DR を拡大するとき、PD は大小に複数置かず単一にすること (空間の一致性)、露光時間は長短に分割せず単一にすること (時間の同時性)、出力信号は線形応答にすること、広い DR 範囲で S/N 比を劣化させない

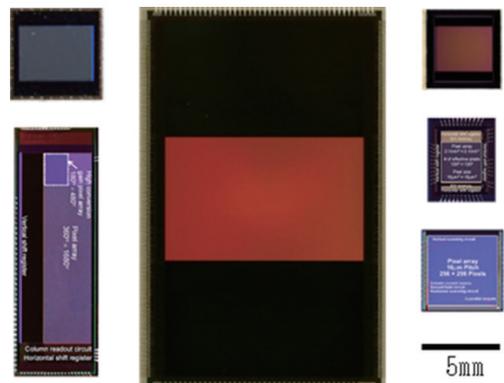


図14 開発したイメージセンサのチップ写真の例。左上から、広ダイナミックレンジ LOFIC イメージセンサ、高感度広ダイナミックレンジ LOFIC イメージセンサ、高速イメージセンサ、広光波長帯域イメージセンサ、高 S/N イメージセンサ、容量イメージセンサ



図15 DRが足りない

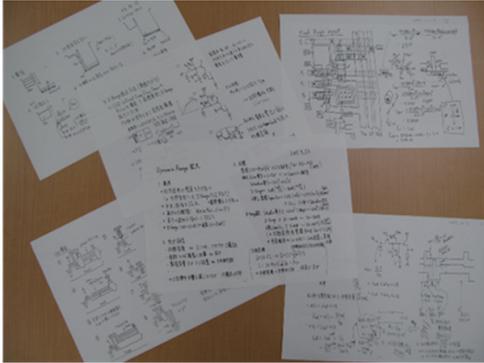


図16 LOFIC 技術のアイデアメモ

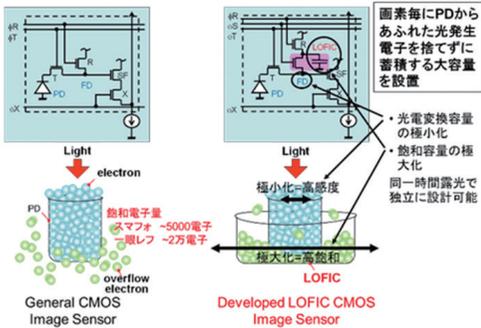


図17 LOFIC 技術の原理

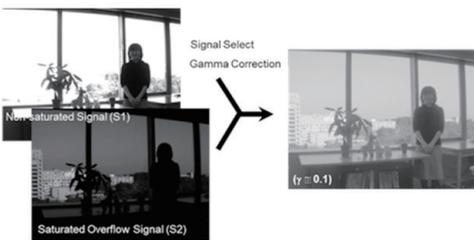


図18 LOFIC イメージセンサの最初の撮影例

こと、PD と飽和の設計を独立にして感度と DR を自由に操作できるようにすること、低照度側と高照度側の撮影データを合成するときに画素ごとの PD の FWC のばらつきの影響が出ないようにすることなどです。

DR 拡大の必要性を実感したきっかけになっ

たのが図15の写真です。これは先に開発した CMOS イメージセンサを搭載した EOS D30で撮影したものです。2003年の国際会議でインスブルックに立ち寄ったときにこのカメラを使って撮影したらこんな状況でして、明るいところが白とびして、暗いところは黒つぶれして映らない、自分でつくったカメラの DR 性能はこんなものだったのかということに改めて痛感した写真です。フィルムカメラの撮影ではこうしたシーンの明暗差もちゃんと映っていましたが、デジカメにしたらこんな状況だったのです。これは言い訳ではありませんが、75dB の DR がありまして、皆さんがふだんお使いのスマホの50～60dB に比べればはるかによいレベルです。それでもこのような状況だったということです。これは真っ先に改善しないと駄目だと思い、まず感度を落とさないで DR をどう上げるかということに取り組みました。

会議から入ってきてから4か月くらいかけて図16に示すようなアイデアメモをつくり上げました。これが、横型オーバーフロー蓄積容量 (Lateral Overflow Integration Capacitor, LOFIC) という技術です。図17に示すように、通常の CMOS イメージセンサでは、光電変換を FD の容量を小さくすると、1個の電子が発生する信号電圧が高くなりますが、PD や FD からすぐにあふれてしまい飽和が高くないというような現象が起こります。一方、LOFIC 技術は簡単にいうと PD や FD とは独立に画素の中にあふれた電子を捨てないでためる器を作ることで感度も飽和も独立に向上させることの技術になります。

ただ、大学には当時イメージセンサの開発の環境は全くありませんでした。どこかと組んで始めるしかなかったのですが、キヤノン時代に足繁く通っていた学会でできた人脈を頼りに、まず訪問したのがテキサスインスツルメンツさんです。ほぼ即決で一緒にやりましょうという話をいただきまして、開発をスタートさせることができました。

図18の画像は1年後の2004年秋に撮影したのですが、1年以内でイメージセンサチップを設計・製造しカメラまで作って、性能を実証し、2005年2月のISSCCでその成果を発表しました。この画像に示すように部屋の中から外まで全部写るといような100dB くらいの DR 性能を持つイメージセンサ技術ができました。まず防犯カメラへ搭載して実用化しました。その後今日まで多くの企業に利用していただいております。

LOFIC 技術により、感度と飽和の設計を独立に行えるようになったことから、究極の高感度(室温で1光子検出)と高飽和を両立したイメージセンサの実現に向けた開発も進められるようになりました。感度とダイナミックレンジを両立させるこの技術は今後さらにいろいろなところで使われるようになって期待されています。

### 5.3 高速イメージセンサ

次に、2つ目の軸の高速イメージセンサです。

島津製作所さんでは、2005年にCCD イメージセンサを用いた最高1/100万秒の撮影速度を有する高速度ビデオカメラを製品化していました。これは、図19に示すような、衝撃波、破壊、発光、放電などの高速な物理現象を撮影し解析するために使われるものですが、科学技術の進歩によりさらにこの撮影速度を超える高性能なカメラが必要になっていました。しかしながら、CCD イメージセンサではこれ以上撮影スピードを上げようとすると大量の熱が発生し高熱によりセンサ自体が壊れてしまうという壁にぶつかっていました。CCD イメージセンサでは電子をバケツリレーのように転送するため原理的に消費電力が大きくなってしまいます。1個の電子を転送するにもバケツリレー時に大容量のゲート電極配線の充放電で電力が費やされます。

2007年5月に、何とか撮影速度1桁上げる方策はないかということで島津さんの方が私のところに訪ねてきました。当時、私はカメラメーカーで撮像素子の開発を行っていた経歴があり、デジタル一眼レフカメラに世界で初めてCMOS イメージセンサを搭載するなど、CMOS センサの画質を高める研究領域の第一人者として認識されていたようです。

その際に、要求のあった事項は、最高動作速度

1/1000万秒の動画撮影でも画質を落とさずノイズが発生しないようにしたい、室温で最高動作速度1分以上作動させても発熱の影響が無いようにしたい、CCD が苦手としていた青い光も撮れるようにしたい、常に強い光にさらされる条件下でも画素から漏れ出た光や電荷が周辺のメモリ素子に混入しないようにしたいなどです。では考えてみましょうということになり、それから約1か月後に、実現策のアイデアをまとめた仕様書を島津さんに提供いたしました。

こうして共同開発を開始しましたが、途中2011年の震災で、量産製造したウエーハが実装前に駄目になりそうになった時期もあり、それもなんとか乗り越えて、2012年2月のISSCCでイメージセンサ技術について発表し、2012年9月には高速度ビデオカメラ HPV-X の製品化に至りました。実は、この時はまだ日本でこのセンサをつくる土壤ができておりませんで、台湾のファウンドリを使って5Vの電源でセンサを製造しました。しかしながら、震災もあって、将来を考えると安全輸出保障の政治・社会的な問題なども起きるかもしれないと思い、供給を安定化するために、かなり独断的になりましたが宮城沖電気(現ラピスセミコンダクタ)内にCMOS イメージセンサ量産プロセスを立ち上げ、製造を移しました。(この後にこの製造プロセスを発展させて学学連携のSプロで利用することになります。) そこでは画素構造やトランジスタの閾値電圧などを詳細に改良することができ、電源を3.3Vにして、感度8倍、消費電力を1/2にするというような再設計を行いました。ピン配置を同一にして、チップを置き換えるということをやったので、カメラはほとんど同じような形で短期間に次の製品販売に繋げることができました。これが HPV-X2 という現行の高速度ビデオカメラです。

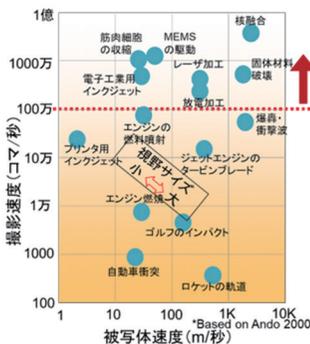


図19 高速撮影が要求される現象

CMOS イメージセンサの撮影速度すなわちフレームレートを決める要因を図20に示します。この中でフレームレートに対する影響度がもっとも大きいのは(E)列回路からチップ出力までの信号読み出し時間です。通常のイメージセンサでは撮影した画像信号は1フレーム毎にチップから出力しますが、1/1000万秒撮影ともなるとこれは極めて困難です。そこでこの高速CMOS イメージセンサではチップ内に撮影した信号を保存するメモリを設置しました。このメモリは画素領域から離れた周辺部に置き、さらに徹底的な遮光も行って常に強い光にさらされた条件下での漏れ信号の

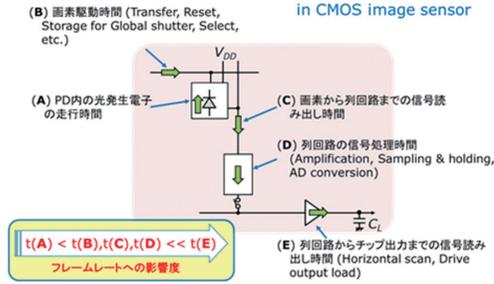


図20 CMOS イメージセンサのフレームレート決定要因

画素に入射するフォトン数  $N_{photon}$ :

$$N_{photon} = \frac{1}{683} \frac{\lambda}{hc} \frac{LA_{pixel} T_{lens} T_l}{F_\#^2} = 4.05 \times 10^{11} \frac{LA_{pixel} T_l}{F_\#^2}$$

@  $\lambda = 550\text{nm}$ ,  $T_{lens} = 100\%$

L: 照度 [Lux]                     $\lambda$ : 光波長 [nm]  
 $A_{pixel}$ : 画素面積 [cm<sup>2</sup>]         $T_{lens}$ : レンズ等の透過率  
 $T_l$ : 露光時間 [s]                 $F_\#$ : レンズのF値

例:  $L = 1000\text{Lux}$ ,  $F_\# = 2$ ,  $T_l = 100\text{ns}$  (10Mfps) のとき,  
 $A_{pixel} = 10\mu\text{m}^2$  (3.16 $\mu\text{m}$ □)  $\Rightarrow N_{photon} = 1 \text{ photon}$   
 $A_{pixel} = 1000\mu\text{m}^2$  (31.6 $\mu\text{m}$ □)  $\Rightarrow N_{photon} = 100 \text{ photons}$

図21 画素に入射するフォトン数

影響を排除しました。

図21は、画素に入射するフォトン数を表す式ですが、これから短時間の露光でも十分な感度を得ようとする最後に頼れるのは画素サイズ  $A_{pixel}$  だけになることがわかります。そこでこの高速 CMOS イメージセンサでは許される限り大きな画素サイズとして32 $\mu\text{m}$ 角を採用しました。

そうしますと問題となるのが、電子の走行時間です。電子の走行時間が遅いと残像が発生してしまいます。画素の端から端までの最長25 $\mu\text{m}$ を10ns以内に走行させるために、デバイスのレイアウト構造とイオン注入のやり方の工夫でハリネズミのようなN層領域を作り、PN接合の空乏電位の連続勾配を生じさせるという工夫を盛り込みました。図22は、デバイスシミュレーションの結果ですが、9ns以内でPDの一番端からでも電子が読み出し電極まで到達するというものをつくることができました。この高い走行速度は実験的にも確認しています。

図23に、高速 CMOS イメージセンサの1/1000万秒の速度の撮影例を示します。スライドガラスに弾丸を打ち込んだときの破壊の進行、カーボンファイバー強化プラスチックを引っ張り試験機で引っ張ったときの破断の様子、マイクロバブルに超音波を印加した際のがん細胞への薬剤注入の様子を示しています。

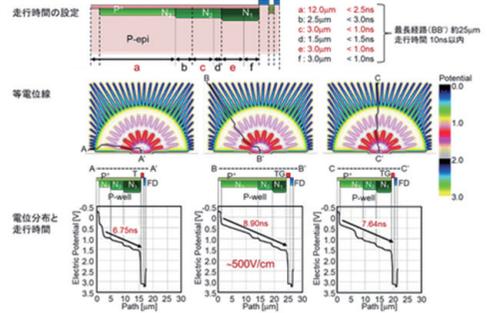


図22 画素内の電子の走行時間

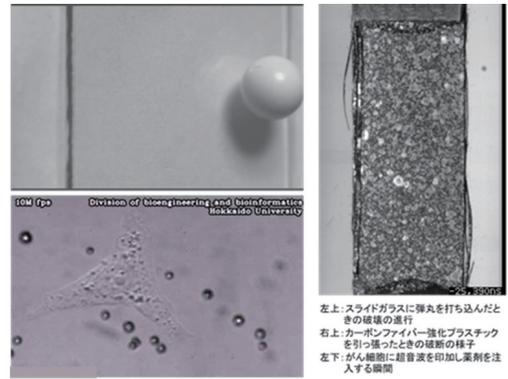


図23 高速 CMOS イメージセンサの撮影例。各種動画が高津製作所 HP で公開されています。

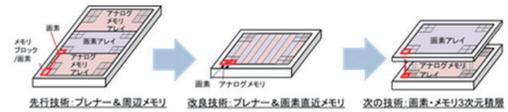


図24 高速 CMOS イメージセンサの進化の方向

この高速度ビデオカメラは、現在この分野のオンリーワン製品として、生命科学、機械、電子、航空宇宙などの研究開発の場で、今までに見ることのできなかった様々な超高速現象を可視化することにより科学技術の発展に大いに寄与しています。

フランスの作家であるブルーストさんが、随分前にこんなことを話しているのを見つけました。「真の発見の旅とは、新しい景色を探すことではない。新しい目で見ることなのだ」。私も2013年に「歴史を振り返れば、それまで見えなかったものが見えるようになったとき、科学は大きく進歩しています。顕微鏡も望遠鏡もしかりです。このカメラも大きなイノベーションを生むことになるかもしれません」というようなことを言ったことがあります。つまり新しい目をつくる、可視化することが、桁違いに科学、技術を進歩さ

せるきっかけになるということです。そんなことから研究室のキャッチコピーもこのころから「まだ見ぬイメージングの世界へ」としました。

図24に、高速 CMOS イメージセンサの進化の方向を示します。図19に示したフレームレートの律速要因の (B) (C) (D) を削減していくのが次の仕事になります。最近有用になってきた積層技術を利用することで、今後高速イメージセンサの性能をさらに向上させることができるでしょう。

#### 5.4 広波長帯域・高飽和イメージセンサ

3つ目の軸が、シリコンがもつ受光感度波長帯域をすべて活かし飽和性能もさらに高めていくという方向です。

ここでは、黒田理人先生らが取り組んだ原子レベル平坦シリコン技術が活かされています。2010年からこの原子レベル平坦シリコンをイメージセンサの画素内のPD構造に適用する取り組みを始めました。約190～1100nmの広い分光波長帯域に高い感度・量子効率を持ち、かつ長期間の紫外光照射に対する感度劣化と暗電流増加を抑制した高い信頼性を有する CMOS イメージセンサ技術を創出しました。通常のイメージセンサでは可視光よりも高いエネルギーをもつ紫外光が入射すると、PD表面に形成された絶縁膜内およびその界面に未結合手や電荷トラップが発生し、PD内部電界を歪めて、光発生した電荷を再結合したり、また暗電荷を発生したりしますが、平坦化技術と極浅高濃度ドーピング技術をPD表面に適用することで、高感度、低暗電流性能を維持することができます。

光吸収係数が小さい近赤外光側の量子効率を向上させるためには、シリコン内の近赤外光の光路長を長くする必要があり、空乏層を深くまで広げることが求められます。そのために極低酸素濃度 CZ ウェーハを用いてドーピング濃度を下げたシリコン受光部を作りました。その結果、図25に示すように、紫外光、可視光、近赤外光の広波長帯域で高い量子効率をもつ CMOS イメージセンサを開発することができました。

最近、この技術と LOFIC を 2 段にした技術を組み合わせ、2000万電子超の高飽和性能を合わせ持つ広波長帯域イメージセンサの開発を進めています。高飽和性能は、画素の中のシリコンに溝を掘って、この側壁に1電子がリークしないような高品質な30fF/ $\mu\text{m}^2$ という高密度容量で LOFIC を作りこむことで実現しています。

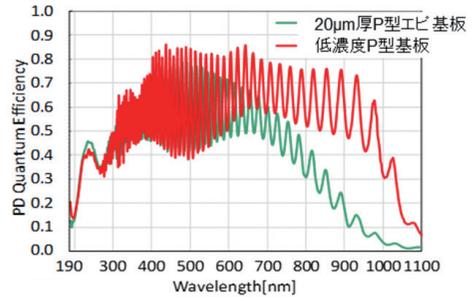


図25 広波長帯域イメージセンサの分光感度特性

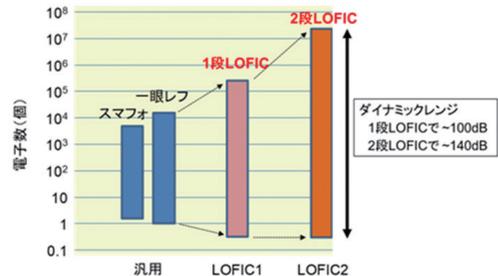


図26 ダイナミックレンジの比較

このイメージセンサは光ショットノイズに対する S/N 比を 70dB 超に高めることができることから、高精度な吸光動画撮影を行うことができます。これにより低濃度のガスや溶液の流れ、生体の観察などの技術分野において大いに注目されています。

また、直線加速器 SACLA や 3 GeV 東北放射光施設に使える軟 X 線検出イメージセンサをこの技術で作るという開発も進めています。最初は 2012年9月に高エネルギー研究所や理化学研究所の方からいい軟 X 線検出イメージセンサがつかれないかと、その後も繰り返しいいセンサがあるといいのだがというふうにつぶやくように私のところに話がありました。実はこうすればつくれるというアイデアはあったのですけれども、技術力が伴わず具体化はしていませんでした。その後に高密度容量を画素内に設置できる技術が立ち上がったことから、目標にしていた1/1000秒のフレームレートで1フォトン検出から2500万電子の飽和までを線形応答かつグローバルシャッタの性能を満たすイメージセンサの実現に目途がつかれました。この軟 X 線検出 CMOS イメージセンサは sxCMOS と呼んでいますが、これの仕様案をつくって皆さんに提示できたのは2018年2月でした。

そして同年6月に東北放射光施設を建設するというのが決定されまして、そこから一気に加速して、小エリアのプロトタイプセンサを設計試作し

て New SUBARU および Spring-8 で量子効率と X 線照射耐性の確認実験を行いました。そして、2022年の現在、実用版の軟 X 線検出 CMOS イメージセンサの設計を完了し、本格的な実験運用を始める段階に着々と近づいてまいりました。

この件でアイデアはあっても、技術力が伴わないと話が進まない、あたらしい要素技術を作るにはどうしても時間が必要になるということを改めて実感しましたが、やはり大学でないと、なかなかこういう際立ったものをつくるというのは難しいことかもしれませんので、時間はかかりましたが何とか東北放射光施設が稼働する前に結果を出せそうなところまで間に合ったということです。

図26に示したのがスマホ、一眼レフ、1段 LOFIC、2段 LOFIC のセンサの概略のノイズと飽和レベルの比較です。圧倒的な性能の軟 X 線イメージセンサを、高輝度な東北放射光施設向けの検出器として提供できることとなります。

### 5.5 容量イメージセンサ

最後は5つ目の軸で、光を使わないで容量を可視化するイメージセンサです。これは当初、フラットパネルディスプレイ、それから有機 EL ディスプレイやプリント基板の配線、これが透明電極であったり、または樹脂の中に埋め込まれている配線であったりしますが、これらの配線のオープン・ショートなどの欠陥を検出する目的で、2016年からになります。開発を始めました。これはいくら頑張っても、可視光を使ったイメージセンサですと検出できません。

そこで、測定対象物に浮き出た電子を画像にすればよいのではということで、CMOS イメージセンサの極低ノイズ画像検出技術を応用して、光を利用せずにイメージセンサ近傍に存在する測定対象物との間の容量を高精度に検出する容量検出イメージセンサの開発を進めました。このセンサは、測定対象物に印加した2つの電位に対応した2つのセンサ信号を取得して差分演算を行うことより、検出部の熱雑音や低周波雑音および出力アンプオフセット電圧などのばらつきを除去し、14ビット AD 変換器で1LSB 程度の精度、容量でいうと0.1aF (10<sup>-19</sup>F)、アナログ回路的に言うとも10<sup>-22</sup> 乗 F/√Hzという精度で毎秒60枚の2次元アレイの容量の動画撮影を可能としています。2018年12月の IEDM で発表しました。

図27に示したのが、容量イメージセンサの動作原理ですが、検出電極がイメージセンサ画素の内

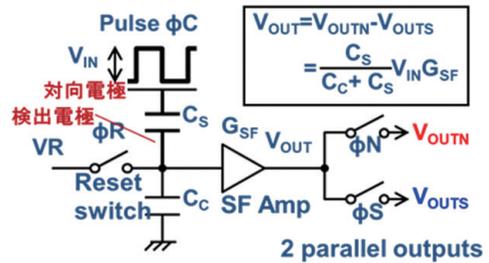


図27 容量イメージセンサの動作原理

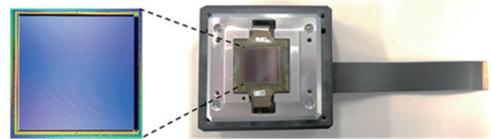


図28 容量イメージセンサとフレキシブル基板に実装したセンサヘッド

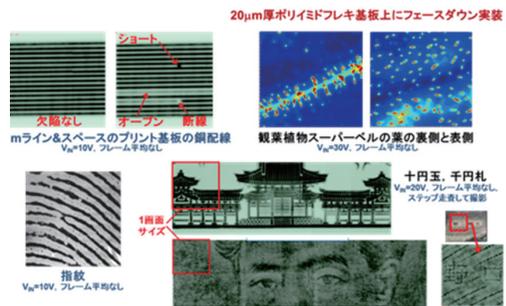


図29 容量イメージセンサによる撮影例

の最上位電極に相当しまして、この上に来た物体間の容量を可視化するというものになります。

図28は、容量イメージセンサとフレキシブル基板に実装したセンサヘッド、図29は、容量イメージセンサによる撮影例を示しています。ここではプリント基板のオープン、断線、ショートの箇所、葉の裏と表、10円玉と1000円札、指紋などの撮影例ですが、このように測定対象物に導電物があるとか、凸凹があるとか、誘電率が違うとかいうものを可視化することができます。

現在、2020年からいろいろな製品のラインナップをそろえてきてします。最近では、皮膚の発汗の様子を撮影する生体実験も開始しました。アトピーの患者さんは基礎発汗が悪いということのようで、この発汗の状態をリアルタイムに高解像度で撮影できることから診断や治療に役立てるという取り組みも進めているところです。現在、角質や汗滴の中に5電子ぐらいの変化があると画像化できるというようなところまでできており極低侵襲で使える機器として期待されています。

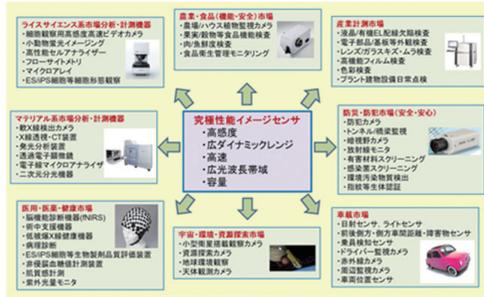


図30 究極性能 CMOS イメージセンサの応用分野

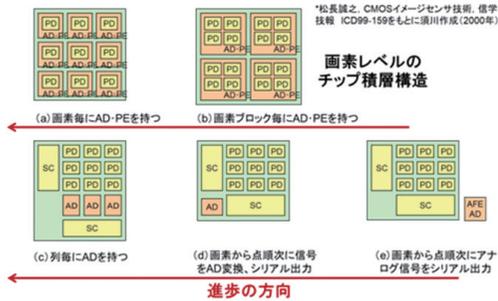


図31 CMOS イメージセンサの構成の進化の方向

## 6. 今後

イメージセンサは、今後10年間の間にますます数が増えてきて、世界中で1兆個以上のセンサが稼働しているというような時代になります。

イメージング用途のものは「実効」4,800万画素ぐらいが一つの頂点になるでしょう。広DRも含んだ高画質の流れがこれから加速されていくでしょう。

センシング分野では究極性能と多機能化が追究されます。ますます賢いスマートなイメージセンサが実現されていくことになるでしょう。

図30に示すように、開発を進めてきた究極性能イメージセンサも、ここにあるような幅広い応用分野でセンシングの世界を可視化し革新していくことになると思っています。図31は、2000年に大学の講義で使ったものですが、イメージセンサの構成の進化は当時の (e) の構成のようにセンサはPDアレイを2次元に並べて、AFE、アナログフロントエンドとAD変換器は外に設置していたという段階から、(d)のようにAD変換器がチップの中に取り込まれ、次に(c)の列のところに取り込まれ、今まさに(b)(a)の画素のレベルに取り込まれてくる時代に到達しました。



図32 画素レベルのチップ積層構造 さまざまな接続の方法

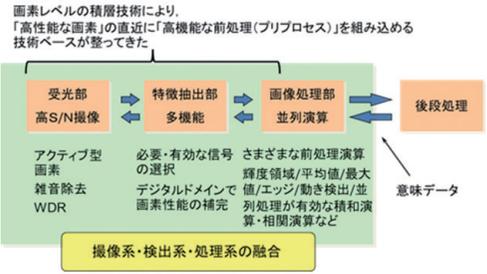


図33 次世代の CMOS イメージセンサを用いた高性能撮像システム

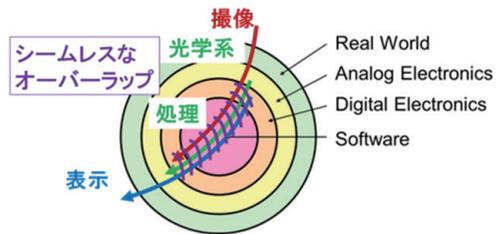


図34 今後のセンシング技術 光学系, 半導体, 情報処理のシームレスな一体化

人間の目を見ても、大変並列度が高いセンサとなっており、視細胞のところで微分、積分、平均化、それからシリアル変換、デジタル変換などを行う回路が入っております。こうしたことが実際に (b) や (a) の構成のイメージセンサの画素レベルでできるようになるということです。人間の目は信号の流れは一方通行ですが、イメージセンサですと、図32に示すように、どこの部分で第1チップと第2チップをつないで積層するかということで、信号の流れを上から下、双方向、下から上等々にいろいろ変えることができます。人間の目を圧倒的に凌駕するたいへん高機能なものがつくれることになるでしょう。

これはシリアル処理だけをやっていたイメージセンサから、イメージセンサの中、すなわちエッジに賢い性能機能を築き上げることができることを意味します。今はデータをクラウドに上げて



図35 高度ネットワーク社会において考えなければならないバランス

データセンターにどんどん蓄えようとしています。これはもうほぼ限界にきています。今後は、図33のように、意味のあるデータだけをイメージセンサから吸い上げて送ることが重要になります。

したがって、エッジ側のセンサの最前部の画素の中をもっと賢くしていかないといけないということになります。そのためにも、今後のセンシング技術は、図34に示すように、光学系、半導体、処理という、今まで交流が希薄だった学問分野をシームレスに一体化してオーバーラップした融合技術を極めていくことが不可欠になります。

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担うデバイスとなります。そしてより便利かつ安全安心な社会を築いていく原動力となるでしょう。イメージセンサの将来像を一言で言いますと、目と脳の一部が合体された賢いセンサ、スマートセンサができ、未来を切り開いていく基幹デバイスになることは間違いありません。一方で、誰もがより簡単にさまざまな情報の発信者となり得ることから犯罪、コスト、プライバシーが今まで以上に侵される危険性も否定できません。図35のように、これらの両天秤のバランスを意識しながら技術者も開発の段階から全体を俯瞰してやっていく必要があることは肝に銘じておく必要があります。

## 7. おわりに

最後にまとめさせていただきます。これは若い方たちへのメッセージです。

あるとき「須川先生は、常に新しいコンセプトを描き、そしてそれを完璧なまでに実行する。高い完成度を継続的に追及する姿勢は、刺激的でもあるが、同時に恐ろしくもある。技術者としての

重要な魂を体現している。」といわれたことがあります。でもこれは私に限ったことではなく、誰もがもつ特質です。もしも個人に差があるとすれば、実行するかしないかの差だと思えます。大切なことは、原理原則を見抜き現実解を考え抜くこと、覚悟、責任、努力、行動、そして継続です。

私自身よい技術を絶えず産み出し世の中の役に立っていくという使命を持ってずっとやってきましたが、その中で大きな事業、ビジネスに結びついたものというのは、5年から10年に1つ出ればよい方でした。ただ、それでもトライし続けないと何も起こらない、現状維持もすぐにできなくなってしまうということも実感として持っております。

研究開発・実用化の最前線に身を置いた40年以上にわたる私の経験的な帰結になりますが、

physics, principle 原理・原則的に基づいた競争力のある技術を徹底的に頭を使って見出し、

enthusiasm 熱情と

commitment 覚悟と

self-esteem おごることのない自らの意志と

conviction 確信を持って

hope for the best and prepare for the worst 良いことを考えて、悪いことには前もって準備をして

creating 世の中の役に立つ価値を創造するようになれば、イノベーションを起こせる確率は確実に上がります。

高いところぞし (dreamではなく will) をもち、明るくひたむきに前へ進みましょう。

最後に、これを私の講演のメッセージとさせていただきます。

ご聴講・ご精読どうもありがとうございました。

1) 須川成利, 黒田理人: 映像情報メディア学会誌, 75 (6), 756 (2021)

2) 業績については次などから検索できます

researchmap 須川成利

google scholar citations Shigetoshi Sugawa

