東北大学
TOHOKU UNIVERSITY

Press Release

2025 年 12 月 25 日

報道機関　各位

国立大学法人東北大学

ダイナミックレンジ 120dB と 光量適応信号選択機能を有する 3 次元積層型 CMOS イメージセンサを開発

―機械の「目」の高性能化・低消費電力化に貢献―

【発表のポイント】

- 2 段 LOFIC(注 1)を採用した画素単位の三次元積層型 CMOS イメージセンサにおいて、ダイナミックレンジ(注 2)120dB を実現しました。
- 光量に応じた適切な信号のみを選択的に読み出す光量適応信号選択機能を実現し、ダイナミックレンジと読みだし信号数のトレードオフ解消を実証しました。
- 開発した 3 次元積層 CMOS イメージセンサは前例のない単位面積当たりの飽和電子数（276.8 $ke^-/\mu m^2$）を達成しました。

【概要】

CMOS イメージセンサは車載やマシンビジョン分野のセンシング用途において、機械の「目」としての役割を持ち、さらなる高性能化への要求は高まり続けています。

東北大学大学院工学研究科電子工学専攻の瀧澤康平大学院生と未来科学技術共同研究センター・大学院工学研究科の黒田理人教授らの研究チームは、露光期間中にフォトダイオード（PD）から溢れた光電荷を蓄積する横型オーバーフロー蓄積容量（LOFIC）を、画素毎に 2 段設けてダイナミックレンジを拡大するとともに、光量に応じて適切な信号を読み出す光量適応信号選択機能を実現しました。さらにイメージセンサチップに 3 次元積層技術を適用し、前例のない単位面積当たりの飽和電子数（276.8 $ke^-/\mu m^2$）を達成しました。飽和電子数は広ダイナミックレンジ化や高い信号対雑音比（SNR）に結びつく指標であり、これらの技術を用いてダイナミックレンジ 120dB の CMOS イメージセンサを開発しました。

本成果は CMOS イメージセンサの高性能化および、小型化や低消費電力化へ寄与することが期待されます。

開発技術の詳細は米国サンフランシスコで開催された国際会議 International Electron Devices Meeting（IEDM2025） において、2025 年 12 月 10 日に発表されました。

【詳細な説明】

研究の背景

近年、車載やマシンビジョンなどのセンシング用途では明暗差のある環境でも白飛び、黒潰れせずに撮像できる広いダイナミックレンジの CMOS イメージセンサが求められています。特に単一露光・線形応答により、モーションアーティファクトを抑えつつ、後段の処理を簡略化できる構成は多くのアプリケーションで高い有用性を持ちます。LOFIC 方式の CMOS イメージセンサは、高い SNR と広いダイナミックレンジを単一露光・単一 PD・線形応答で実現することが可能であり、複数段 LOFIC による広ダイナミックレンジ化が報告されています。一方で、1 フレーム内に複数信号を出力する必要があり、読み出し信号数の増加によりデータレート(注 3)や消費電力が増加するという課題がありました。

今回の取り組み

東北大学の瀧澤康平大学院生、平井嘉人大学院生（当時）、吉田将也大学院生、間脇武蔵助教、宮内健リサーチフェロー、黒田理人教授（大学院工学研究科電子工学専攻、未来科学技術共同研究センター）は、CMOS イメージセンサにおいて PD のオーバーフロー信号を用いて、光量に応じて適切な信号を読み出す光量適応信号選択機能を実現しました。さらにイメージセンサチップに 5.6μm ピッチ画素単位の 3 次元積層技術を適用し、積層チップに高容量密度のシリコントレンチ容量を搭載することで、276.8 $ke^-/\mu m^2$ という単位面積当たりの飽和電子数を達成しました。

これによりイメージセンサの重要な性能指標である広ダイナミックレンジ・高 SNR 性能を損なわないままに、信号判定による読み出し信号数の削減と 3 次元積層容量による画素サイズ縮小を達成し、光量適応信号選択機能を有すダイナミックレンジ 120dB・最高 SNR 67.5 dB の 2 段 LOFIC・3 次元積層型 CMOS イメージセンサを開発しました。

図 1 に開発した CMOS イメージセンサのチップ写真と画素断面図を示します。図 2 は開発センサの光電変換特性および 1bit の判定信号を用いた光量適応信号選択の結果です。第 2 縦軸は高照度に判定された画素の割合であり、光量に応じた信号選択機能を実証しました。図 3 は開発センサの読み出し信号数とダイナミックレンジ性能における性能指数です。本研究は CMOS イメージセンサにおける、ダイナミックレンジと読みだし信号数に存在するトレードオフを解消し、データレート低減や低消費電力化に有効な手段であることを実証しました。

今後の展開

本技術は単一 PD・単一露光・線形応答 CMOS イメージセンサにおいて高性能化と小型化や省電力化の同時実現が可能であることを示唆しています。今後は 2bit 以上の判定信号を用いて、複数信号から 1 信号を選択する機能を実現します。また列 ADC や画素制御回路との連携によるさらなる高速化やシステム全体の省電力化を目指します。

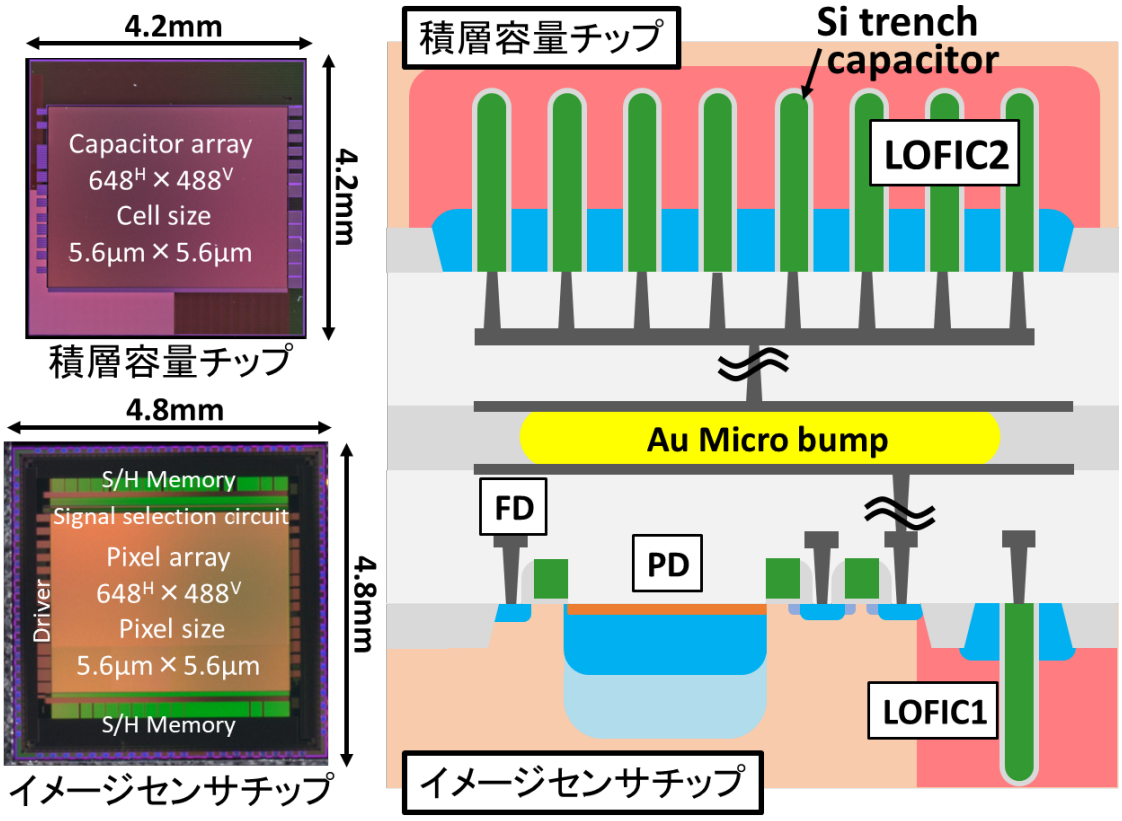

図 1.　開発した CMOS イメージセンサのチップ写真と画素断面図

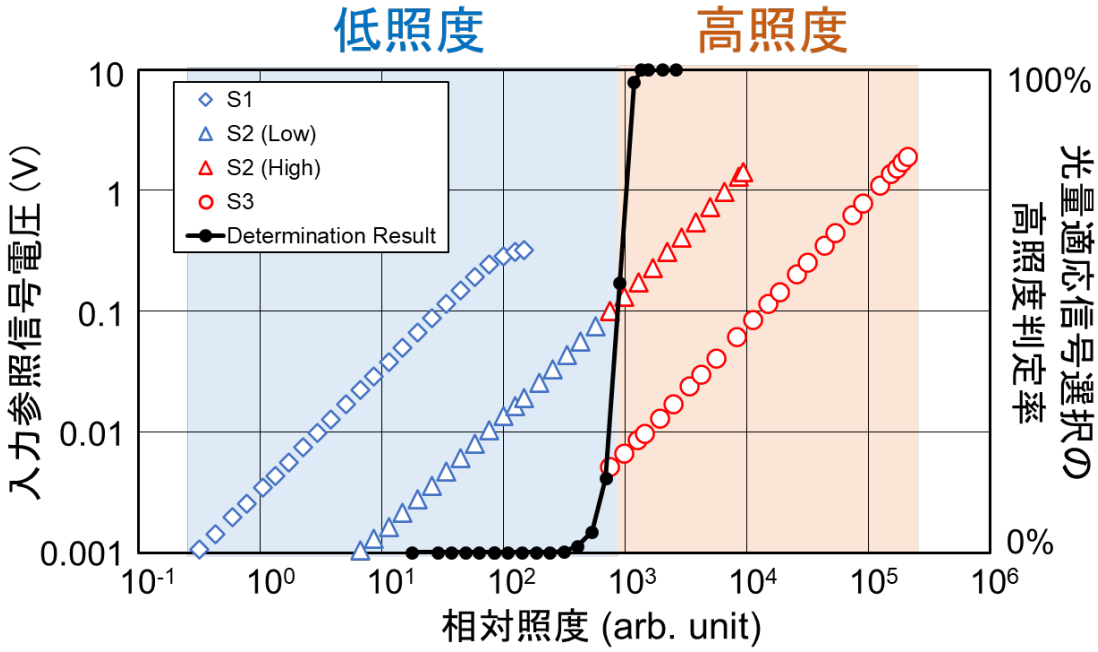

図 2.　光電変換特性および光量適応信号選択機能の実証

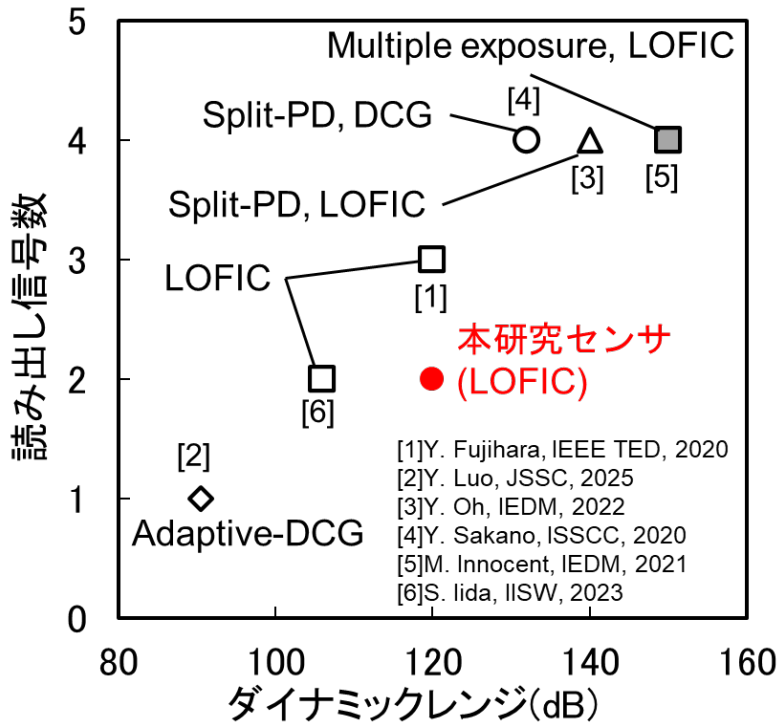

図 3.　読み出し信号数とダイナミックレンジの性能指数

【用語説明】

注1.　LOFIC：横型オーバーフロー蓄積容量のこと。高照度時などイメージセンサに入射する光量が大きい場合には、光電変換で発生する電荷数が多くなり PD に蓄積し切れずにオーバーフローして捨てらる。このオーバーフロー電荷を大きな画素内容量に蓄積して信号電荷として使用することで、より広いダイナミックレンジが実現できる。

注2.　ダイナミックレンジ：イメージセンサで検出できる最も明るい光と最も暗い光の範囲を指す。明暗差が大きい被写体を撮影する際は、ダイナミックレンジが広いほど白飛びや黒つぶれを防ぐことができる。

注3.　データレート：1 秒間に送受信できるデータ量を示す指標で、通信速度を表し、bps（ビット毎秒）で表す。

【論文情報】

タイトル：A 120 dB Dynamic Range 3D Stacked 2-Stage LOFIC CMOS Image Sensor with Illuminance-Adaptive Signal Selection Function

著者：Kohei Takizawa, Yoshihito Hirai, Masaya Yoshida, Takezo Mawaki, Ken Miyauchi, Rihito Kuroda*

*責任著者：東北大学 未来科学技術共同研究センター　教授　黒田理人

国際会議：71st Annual IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM 2025)

URL：https://iedm25.mapyourshow.com/8_0/sessions/session-details.cfm?ScheduleID=330&

【問い合わせ先】

（研究に関すること）

東北大学 未来科学技術共同研究センター

教授　黒田 理人

TEL: 022-795-3977

Email: rihito.kuroda.e3@tohoku.ac.jp

（報道に関すること）

東北大学未来科学技術共同研究センター広報

TEL: 022-795-4004

Email: niche-pr@grp.tohoku.ac.jp