

撮像技術 DX 新時代, スマホが一眼カメラに勝つ? 第三世代の撮像技術はデジタルと融合して進化する

名雲技術士事務所
名雲文男 Nagumo, Fumio

撮像技術が劇的に進化中だ。第三世代の進化で、仮に《DX》と《3D-CIS》と呼ぶ技術をその基盤に持つ。ちなみに撮像技術第一世代の CCD はビデオカメラやコンパクトデジタルカメラを世に出した。第二世代の CMOS イメージセンサ (以降 CIS ; 脚注 1) はスマホカメラを生み、コンパクトデジタルカメラを駆逐した。スタート間もない第三世代だが、新しい動向が目立つ。“スマホ対一眼カメラ戦争勃発”とか“異能異次元の DPS の実用化”がその一例だ。なお DPS とは Digital Pixel Sensor の略で、画素出力がデジタル値という特異な CIS だ。本稿はこれら動向のうち前者の《スマホ戦役》を講釈する。講釈師は半世紀を超えて撮像技術の世界を見守る技術者だ。なお、後者は本誌 2024 年 2 月号で紹介させて頂く。

講釈《スマホ戦役》の筋書はスマホの武器 (図 1), 戦法 (図 2) そしてスマホの戦果の解説だ (図 10)。我が講釈に独断偏見無しとは言わないが、画質評価で世界的に高名な DXO Mark 社に“スマホの画質が一眼カメラに接近中”という論評があり (@2020, 参考資料 1), センサの巨人ソニーの“2024 年にはスマホが一眼カメラに勝つ”との予言もあるから (@2022, 参考資料 2), 当たらずとも遠からずだ。ちなみにこの講釈では DXOMark 社の論評をフォローする。また、スマホ戦役の画質審判役には同社の評価データを頂いて解説する。なお、この講釈では門外の読者を想定して、図表をご覧いただくだけでもお判りいただけるよう工夫する。なお、ちょっとした技術論は参考資料として末尾に付録するのでご興味があればご覧いただきたい。

(脚注 1 : CIS とは CMOS イメージセンサの略称である。欧米では一般的な略称だ。)

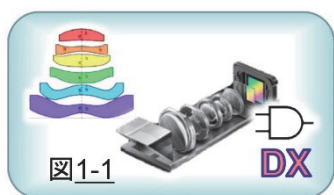


図 1-1 新型扁平光学系
非球面レンズ
ペリスコープ型望遠レンズ

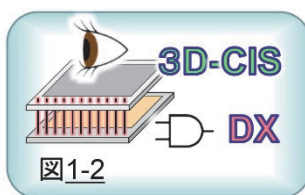


図 1-2 裏面照射 3 次元積層型
CMOS イメージセンサ
(3D-CIS)



図 1-3 スマホ用プロセッサ
System on Chip (SoC)

図 1 スマホカメラの武器, 扁平光学系, 3D-CIS そして DX 支援

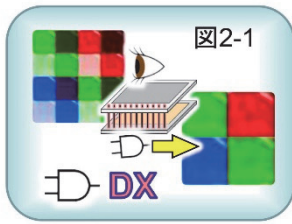


図 2-1 マルチ画素 (QBC) 型 CIS
高 D レンジ/高解像度

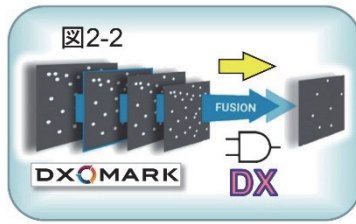


図 2-2 マルチフレーム撮像
高感度

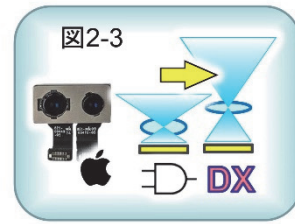


図 2-3 マルチカメラシステム
ズーム機能

図 2 スマホカメラの戦いは集団戦，称して《マルチ》戦法

【最新事情】 ここで《DX》とはデジタル変革/進化，そしてその担い手をいう。主な担い手はスマホならではの超高性能プロセッサ SoC (System on Chip) だ (図 1-3)。最新の iPhone15 Pro の SoC なら驚愕の 240 億トランジスタにもなる。《3D-CIS》とは 3 次元積層型 CMOS イメージセンサをいう。2 階建て 3 階建て構造で画素層の下にロジック層《DX 機能》を直結積層し，画素層からの撮像信号出力をロジック層で直ちに処理して高性能撮像を実現する優れたものだ。

【スマホ戦力分析，弱点】 (図 3) さて，まずはスマホの戦力分析，武器の弱点を調べておこう。

スマホカメラの宿命は低背である。低背レンズは口径が制限されるし，長光路の望遠やズームレンズの実現が困難だ。口径で制限される CIS サイズは 35mmFF センサとの面積比が数十分の 1 だから，画素の受光面積で決まる受光量/感度 (脚注 2) や，画素のいわば体積で制限されるダイナミックレンジ (以降 D レンジ：脚注 3) は圧倒的に不利だ。さらに小口径の深すぎる被写界深度も嫌われるデメリットだ。

(脚注 2：ここでいう感度とは低照度撮像時のノイズ量が小さいこと，すなわち信号対ノイズ (S/N) 比で評価される性能である。)

(脚注 3：D レンジとは暗部と高輝度部を同時に扱える能力。フィルムのラチチュード相当の指標。D レンジは光電子の蓄積容量で決まる。低 D レンジで生じる白飛びは光電子の飽和時に見られる現象。)

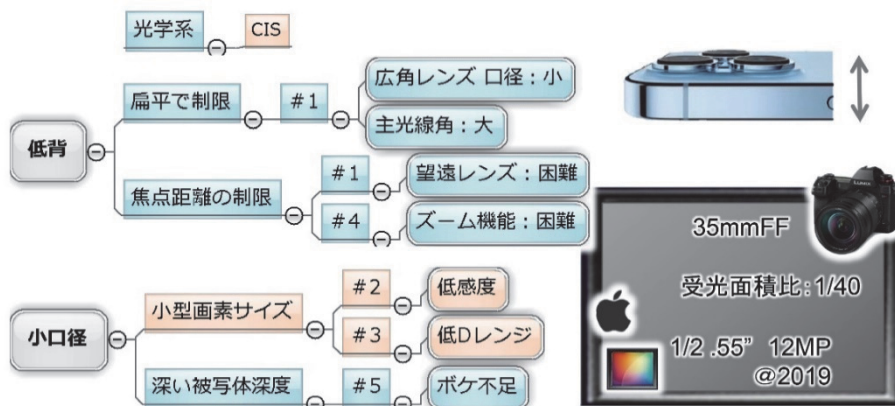


図 3 スマホカメラの弱点は低背，小口径/小型画素

【スマホの弱点对策，武器と戦法】 (図 1) 35mmFF 一眼カメラに挑戦するスマホの武器は 3 つ，新型扁平光学系，3D-CIS そして両者を支援する DX だ。その戦法だが (図 2)，こびとスマホの巨人一眼カメラへの挑戦だから一騎打ちでは勝ち目がなく，集団で役割分担して攻撃する。この集団戦を仮に《マルチ戦法》と呼ぶ。これには 3 つの陣形がある。センサの《マルチ画素》，カメラの《マルチフレーム撮像法》そしてシステムでの《マルチカメラ》だ。そして集団のまとめ役=司令塔として DX = デジタル処理機能が構える。以下，それら弱点への具体的対策の概要を弱点図 3 の # 順に紹介する。なお詳細にご関心があれば末尾の付録をご覧くださいと思う。

【#1：光学系の低背対策：新型光学系+DX】（図4）スマホの挑戦は主カメラ用広角レンズの口径拡大から始まった。低背という制限に対抗する救世主はモールド製法容易なプラスチック製の非球面レンズだ。異様な形状からカモメレンズと呼ばれたりしてレンズ枚数削減に絶大的な役割を果たす。とどめは高屈折率，低複屈折率，良加工性の高機能プラスチックだ。更に残存する光学歪（歪曲収差，色収差，シェーディング）はDX：デジタル処理が補正してカバーする。こうした技術でセンサ面積拡大はiPhone14 Plus 対 初代比で7.4倍にまで拡大し，そのまま感度とDレンジの向上に寄与している（図5）。

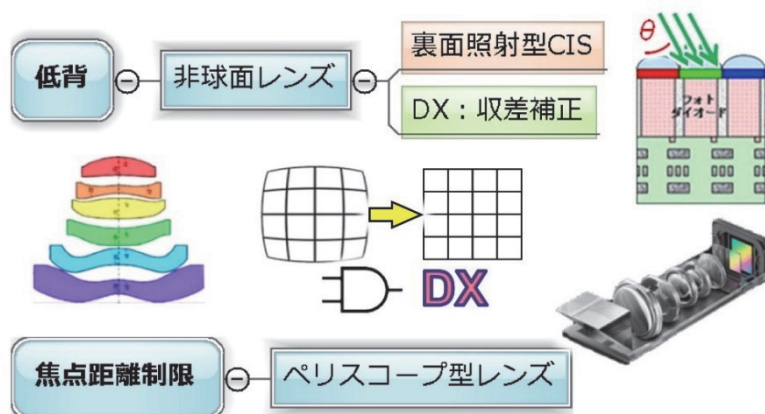


図4 光学系の低背対策：新型光学系とDX



図5 iPhone 主カメラ広角非球面レンズと CIS サイズの変遷

低背広角レンズの口径拡大の救世主はモールド製法可能なプラスチック製非球面レンズだ。とどめは高屈折率，低複屈折率，良加工性の高機能プラスチックが更なる進化を可能にした（★）。

なお，扁平な光学系にはそれを利用可能にした陰の主役がある。裏面照射型 CIS と，そのマイクロレンズシフト配置技術がそれだ（参考図 A）。これが扁平光学系のきつい斜め入射の主光線の受け入れを可能にした。実は旧型の表面照射型 CIS では配線層が邪魔してそうはいかなかったのだ。

一方，絶望的だった長焦点の望遠レンズだが，これは発想を変えて解決した。横置き光学系の潜望鏡型＝ペリスコープレンズの採用である（図4，参考図 B）。直近では連続可動の“真”のズームレンズさえも商用化されるなど，進化は現在強力に進行中である。

【#2：感度改善：DX で対策】 広角レンズの口径と CIS サイズ拡大がそのまま感度と D レンジの向上に大きな効果をもたらした。しかし，それでもスマホの感度不足には焼石に水だった。そこに援軍

として、逆境＝低照度下で絶対的な役割を果たすふたつの DX 関連技術が登場した (図 6)。

ひとつは純粋な DX：ソフトウェアによる画質改善処理だ。これが単純だが効果は極めて高い。DXOMark 社曰く、2004 年から 10 年間の DX (ソフトウェア処理) の画質改善効果 (参考図 C) が 3 絞り相当、これの改善を支えるのがスマホ SoC の DX 処理能力、その 100 倍の進化のおかげだ、と。DX のもの凄い効果を語る一節だ。

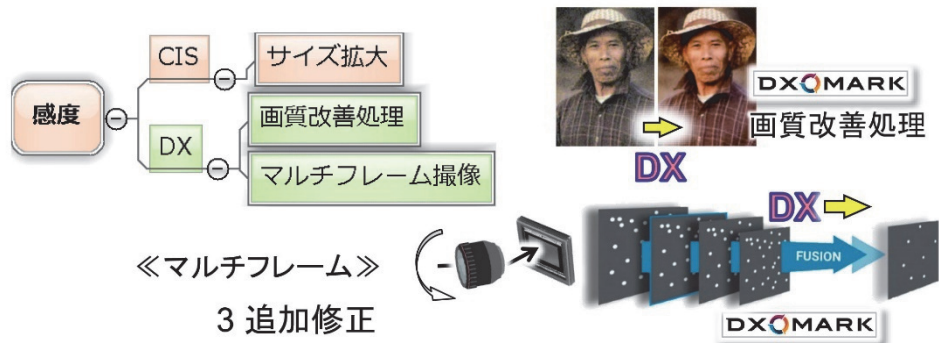


図 6 CIS の感度対策は DX とマルチフレーム撮像

もうひとつの対策が集団攻撃の DX：《マルチフレーム撮像法》だ。これが低照度下撮像での最上の武器となる。高速撮像した多数のフレームをデジタル加算することで感度を稼ぐ。長時間撮像での手振れは光学補正で、被写体動きはとデジタル補正でカバーする。この撮像法の進化も DXOMark の評価が示すとおり圧倒的だ (参考図 D)。なお、これら感度向上の背景にあるのが驚愕の DX=iPhone SoC の処理能力進化だ (図 11.2)。

【#3：D レンジ対策：マルチ画素、DX そして 3D-CIS】

小型画素の致命傷、D レンジ不足への対策は CIS 画素群の集団戦法：仮称《マルチ画素》(図 7、参考図 E) だ。画素群が露光時間を長中短 (LMS) と分担して低中高各照度部を撮像し、その出力を合成 (DX) することで高 D レンジ画像を実現する。そのために、CIS の画素数を本来なら必要十分な数 (12M 画素) から数倍化して画素群の分担を実現する。代表例が QBC (Quad Bayer Coding) 型撮像法だ (Sony 社呼称) (参考図 E-1)。これは RGBG 各色 1 画素を 4 倍に増やして 4 つの役割を課す。その第一の効果が高 D レンジ撮像であり、残り 3 つが高感度化、2 倍の高解像度化 (後述のロスレスズーム用) そして 3D 測距する像面位相差 AF 信号出力だ。ここで《3D-CIS》が重要な役割をする (参考図 E-2)。裏面照射型 CIS に直接積層した DX：ロジック層でリアルタイム画像合成し、高 D レンジの実時間処理＝動画撮像さえも実現する。

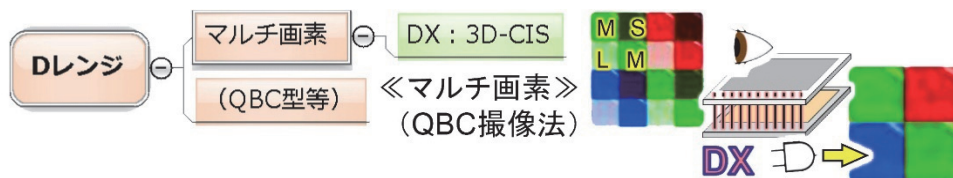


図 7 CIS の D レンジ対策はマルチ画素と DX, 例に QBC

【#4：ズーム機能：マルチカメラ+DX】(図 8) スマホ光学系の泣き所がズーム機能だが、これが目下、進化の真っ最中だ。初期はデジタルズーム、次いで焦点距離の異なるマルチカメラ出力信号の合成 (DX) でズーム効果実現へと続いた。ただし、前者はズーム拡大分だけ解像度が低下する。後者は俗に光学ズームと呼ばれるが、中間焦点距離の画像はデジタル合成だから本物ズームとは言い難い。現在こうしたデジタルズームの難点を埋めるべく進化中なのが AI を用いた超解像ズームやマルチ画素センサ QBC のロスレスズーム (高解像度出力) 利用だ (参考図 E-1)。なお、前述の通り本

物の“連続可動”の光学ズームも倍率小さめながら商用が始まっている（参考図 B-3）。等々、今後のスマホズーム新機能の更なる進化を期待したい。

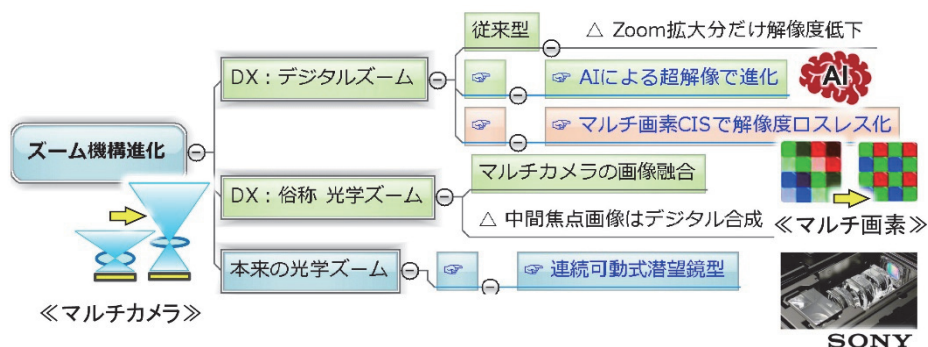


図8 ズーム機能はマルチカメラ，AI，マルチ画素

【#5：ボケ加工：DX+3D 測距/AI】（図9）小口径カメラでの深すぎる焦点深度はともすると嫌われる。その対策にデジタル画像処理が威力を発揮する。基本は被写体を切り出してその他の部分をデジタル処理でぼかす。切り出しには3D撮像での距離測定やAIによる人物抽出などが用いられる（参考図F）。3D画像測距はステレオカメラから始まったが、現在はLiDAR（光レーダー）型のCISの採用が進んでいる。

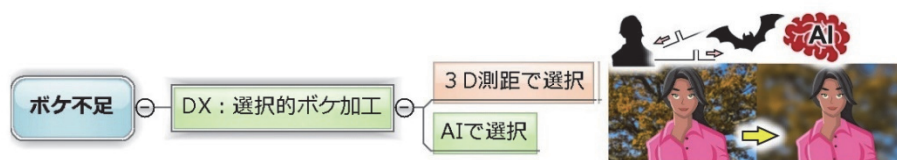


図9 ボケ対策はシステムとDX

【iPhone 戦果】 こうしてスマホカメラは弱点を克服して進化し、その画質は劇的に向上する。その進化をDXOMark社画質評価データで辿る。評価比較対象のカメラはiPhone 11/15 Pro Max（以降iPhone11/15PMと略記）と35mmFF一眼カメラLumix S1R（脚注4）だ。各iPhonePMカメラの詳細は参考図Gご覧いただきたい。いずれも焦点距離の異なるマルチカメラ構成で俗にいう光学ズーム機能を担う。一方Lumix S1Rは固定焦点レンズを装着しての評価である。従ってデジタルズームだ。さて、図10をご覧頂きたい。DXOMark社のデータによる画質評価のレーダー図だ。図10-1は2019年時点のiPhone11PMとLumixS1Rの比較で、スマホが一眼カメラに迫ると評した同社の2020年論評からの抜粋である。なお後日DXOMark社の評価尺度が変更されたので、比較のため旧評価を実線、新評価を二重線と区別して併記している。図10-2はiPhonePMの2019年から2023年への進化を新評価尺度で表している。この比較でiPhone15PMの大幅な進化が見て取れる。iPhone15PMと旧評価のLumix S1Rとは直接比較はできないが、iPhone11PM新旧評価を介して推測していただきたい。

さて、結論に近づいてきたが、その前に少し気になるズーム評価について考える。LumixのCISは47M画素、レンズは固定焦点だから、ズーム機能は純デジタル式だが、その割には評価が比較的高い。一方のiPhone15PMは同様の48M画素の広角カメラに、ペリスコープ型望遠レンズを装備した俗称光学ズーム5倍で、iPhone11PMの2倍から大進化を果たしている。しかしそのズーム評価はデジタルズームのLumixと同程度で十分とは高いとは言いがたい。という訳で新旧評価の違いがあるにせよ両者のズーム評価比較は少々気になるところがある。

ズーム評価はさておいて、図10-2でiPhone15 Pro Maxは新旧評価の差を勘案してもほぼすべての項目で35mmFFカメラに追いつき追い越し状態と見て取れる。HuaweiやSamsung等の上位スマホカメラもDXOMark最新評価データで同様な勢いで進化中だ。DXOMark社の評価法の適否について

は異論もあるようだが、スマホが《追いつき追い越し状態》にあるらしいことは確かなようだ。ただし、スマホに残された課題はズーム機能で、今後の進化に期待したいと付け加えておく。

(脚注4：Lumix S1R は2019年カメラグランプリ2019大賞機)

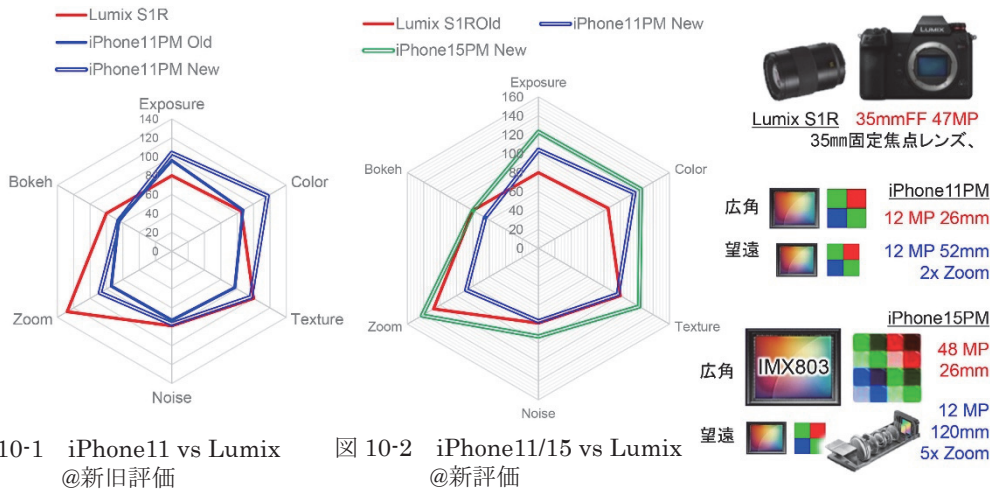


図 10-1 iPhone11 vs Lumix @新旧評価

図 10-2 iPhone11/15 vs Lumix @新評価

図 10 iPhone11/15 Pro Max vs 35mm一眼カメラ (Lumix) のDXOMark画質評価

単線：旧評価基準 二重線：新評価基準

iPhone 15 Pro Max のカメラ構成は広角，望遠，超広角の3カメラ構成 (参考図 G)。

Lumix はレンズ交換無し評価のため，そのズーム評価はデジタルズーム相当。

【焦点：撮像技術第三世代，撮像とデジタルの融合】 iPhone の10年間の進化をDXOMark社の総合評価データ (Photo) でグラフ化してみた (図 11-1)。10年で約3倍という驚異的進化だ。35mmFF一眼カメラ (某社) の進化とは恐ろしいほどの違いである。ただし，両者の尺度が異なるのであくまでのご参考だが。ところで右図は同時期の iPhone の SoC (System on Chip) の総トランジスタ数の推移だ (図 11-2)。10年間で約100倍の増加である。この SoC (DX機能) とスマホ画質評価との推移に強い相関が見て取れる。DX支援が土台にあってのスマホ画像進化。当《焦点》のテーマ，第三世代の撮像技術，DXとの融合による撮像の進化の証に見える。なお，これはスマホという巨大需要を背負っての SoC 開発投資の結果だから，一眼カメラにおいてそれと太刀打ちできるものではない。

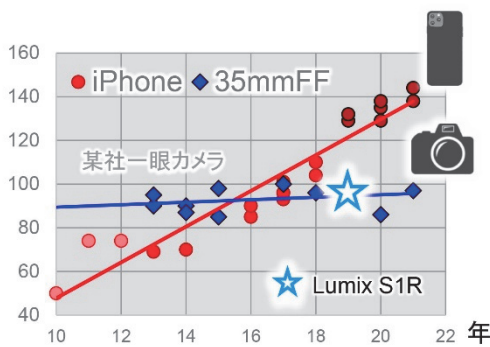


図 11-1 スマホと一眼カメラ 画質総合評価の推移 DXOMARK Score (相対値比較)

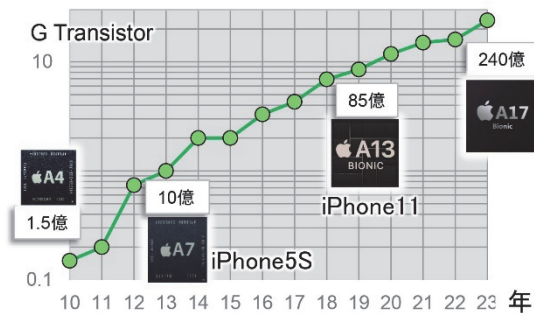


図 11-2 iPhone SoC 総 Transistor 数の推移 10年で100倍の増加率

図 11 スマホカメラ飛躍の鍵は撮像とデジタルの融合

【おまけ】 最後に申し上げる。一眼カメラは死なず，と。背後に巨大な交換レンズ群がある。至高の人間工学的使い勝手がある。これらに手の平スマホが叶うはずがない。DXOMark曰く，一眼カメラは構えて“ストーリーを伝える”。スマホは自動で“記録を撮る”，と。両者の間の機能と役割は次元をこととする。一眼カメラに栄光あれ。

【謝辞】 DXOMark 社の論表（参考文献 1）にはその論旨，図表，評価データともに大いに参考にさせていただいた。また三菱ガス化学社の茂木篤志氏には非球面レンズの写真と貴重なアドバイスとを頂戴した。両者に心よりの深謝を申し上げます。

参照資料 1：DXOMark 社：smartphones-vs-cameras-closing-the-gap-on-image-quality
 (https://www.dxomark.com/smartphones-vs-cameras-closing-the-gap-on-image-quality/)

参照資料 2：日経XTEC：スマホの画質は2024年に一眼カメラ超え，ソニーGが見通し示す；
 (ソニー（SSS）CEOの清水照士氏 2022年Sony（G）2022年度事業説明会から)
 (https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/news/18/12937/)

~~~~~

《参考図》

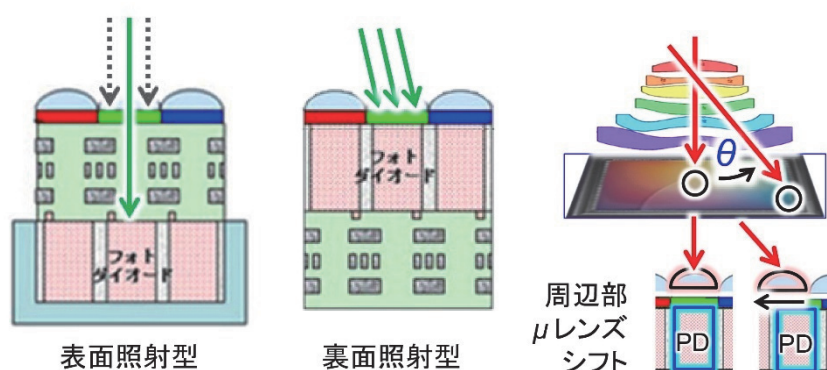


図 A 裏面照射型 CIS と周辺部  $\mu$  レンズシフト

CIS の表面照射型から裏面照射型への進化は入射光線の受け入れ効率（開口率→感度）を大きく向上させた。扁平光学系では周辺部の強い斜め入射光に対して裏面照射型は更に有効だ。なおその際、主光線の入射角度に応じて  $\mu$  レンズの位置シフトさせる工夫で、実効開口率の低下を防ぐ処置もなされている。



図 B-1 ペリスコープ型 図 B-2 第二の反射鏡付き 図 B-3 《真のズームレンズ》

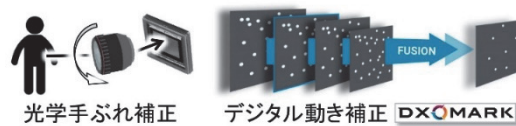
図 B ペリスコープ型望遠レンズ 連続可動ズームレンズ

扁平長焦点レンズは横置き光学系の潜望鏡型＝ペリスコープレンズで実現した。最新の iPhone 15 Pro Max は 4 回反射のテトラプリズムという奇手使い。これなら CIS は水平配置ゆえにそのサイズはいずれ大型化するかもしれない。一方、連続可動の“真”の光学ズームレンズさえも商用化されている。等々現在光学ズームの進化は強力に進行中である。



図 C 画像改善処理効果の進化

保存 RAW データを 10 年後に再処理して得た低照度下画像の優れた改善効果を示す。DXOMark 社曰く、進化した現像処理ソフトの威力は 3 絞り相当。10 年間の DX=プロセッサ SoC の処理能力 100 倍の進化の効果だという。処理ソフトは DxO Optics Pro 9 (@2013)



図D-1



図D-2

図D-3

図 D マルチフレーム撮像法による感度改善効果の進化

マルチフレーム撮像法は低照度下撮像でのスマホ最上の武器である。高速撮像した多数のフレームをデジタル加算することで感度を稼ぐ。長時間撮像での手振れは光学補正し、被写体動きはデジタル補正で封じる。これは DX:デジタル処理を最高度に活かす《マルチ;集団攻撃法》の代表例といえる。なお新型のセンサ手振れ補正(右図)は上下左右回転誕生で更なる感度向上が叶うかもしれない。

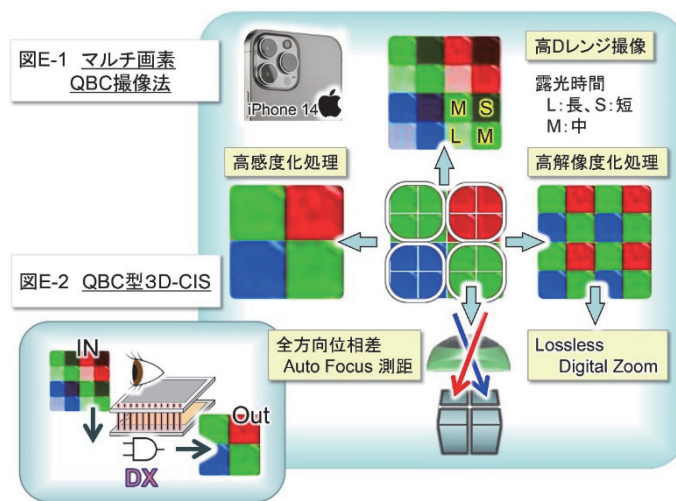


図 E マルチ画素: QBC (Quad Bayer Coding) 撮像法



《マルチ画素撮像法》(本稿での仮称)の代表例が QBC (Quad Bayer Coding) 型撮像法だ (Sony 社呼称)。これは RGBG 各色 1 画素を 4 倍に増やして (図中央, 4つの役割を担う (上下左右)。その第一の効果が高 D レンジ撮像である (上)。これは露光時間を長中短 (LMS) と分担して低中高各照度部を撮像し, その出力を合成することで実現する。高感度化 (左) は 4 画素加算, 2 倍の高解像度化 (右) は高度な画像処理。後者の出力は後述のロスレスズームに利用する。3D 測距 (下) の出力は像面位相差 AF 信号になる。ここで《3D-CIS》が重要な役割をする (右下図)。裏面照射型 CIS に直接積層した DX: ロジック層でリアルタイム画像合成し, 高 D レンジの動画撮像さえも実現する。

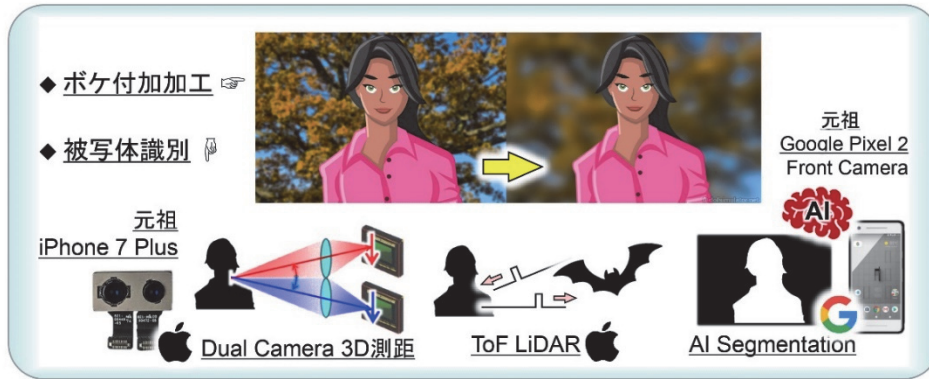


図 F DX: デジタル処理で背景ボケ加工

ボケ加工の基本は被写体を切り出してその他の部分をデジタル処理でぼかすことにある。切り出しには 3D 撮像での距離測定や AI による人物抽出などが用いる。3D 画像測距はステレオカメラから始まったが, 現在は LiDAR (光レーダー) 型の CIS の採用が進んでいる。

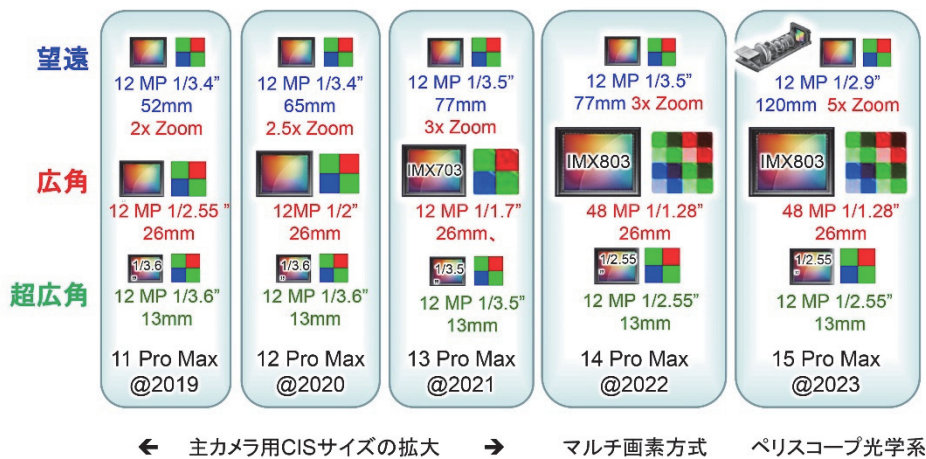


図 G: iPhone Pro Max マルチカメラ構成の進化@2019~

これは DXOMark の論評 (2019 年) 以降の iPhones Pro Max (最上位機種) のマルチカメラ構成である。進化の注目点は広角カメラの CIS のサイズ向上と, 撮像方式 (ベイヤー型から QBC 型) の進化, そして望遠カメラのペリスコープ型への進化が重要である。