



飛翔する光の撮影を超えて

—究極の超高速イメージセンサー—

立命館大学
江藤剛治

1. はじめに

世界で初めて市販されたデジタルカメラは Dycam 社が 1990 年に発売した「Dycam Model 1」のようである¹⁾。筆者らが高速デジタルビデオカメラ「KODAK EKTAPRO HS4540/Photron FASTCAM」を開発したのは 1 年後の 1991 年であった²⁾。撮影速度は 4,500 枚/秒で連続 1,000 枚を撮影することができた。2017 年には撮影枚数は 10 枚であるものの 1 億枚/秒（時間分解能 $\Delta t = 10 \text{ ns}$ ）のマルチフレーミングカメラを開発した³⁾。26 年間で撮影速度は 22,222 倍になった。このカメラを用いてイメージセンサを使ったカメラとしては世界で初めて「飛翔する光」の撮影に成功した⁴⁾。

光の飛翔の撮影は Light-in-Flight imaging と呼ばれ、超高速撮影の成功の証として多くの科学者が先端的な技術に工夫を加えて挑戦してきた⁵⁻⁷⁾。歴史的に見て、シリコンイメージセンサがある性能、例えば感度、画素数、光の波長特性等について、その時代の先端撮像技術の性能に近づくと、それまでの技術はイメージセンサを使ったカメラに代替されてきた。この意味でイメージセンサで光の飛翔が連続撮影できたことの、超高速撮影分野における歴史的意義は大きい。

シリコンイメージセンサの撮影速度には上限はないのだろうか？感度は 1 フォトンが検出できれば良い。表 1 に示すように、すでにこの条件は達成されている。空間解像度はレーリーの条件から、通常の光学系を用いる限り数 100 nm 以下にはできない。一方最先端のイメージセンサの画素サイズは 600 nm である。従ってイメージセンサの感度と空間分解能は既にほぼ限界に達している。

シリコンイメージセンサの限界時間分解能は約 10 ps であることは筆者らが理論的に証明した⁸⁾。光の飛翔を撮影したイメージセンサの時間分解能は 10 ns であるから時間分解能については 1,000 倍の伸びしろがある。もう一つ重要な性能指標に波長がある。限界波長分解能は量子力学的に決まるだろう。知識が無いので表 1 では波長についての比較は割愛した。

ダイナミックレンジは測定可能な測定値の幅と最小値（限界分解能）の比とする。ダイナミックレンジには理論的上限がない。画素数は多い方が良いし、撮影枚数も多い方が良い。広い波長幅の光で撮影すると可視光では見えない様々の現象が見える。以上を考慮するとイメージセンサのさらなる性能向上のためには以下の課題がある。

- (1) 時間分解能の向上
- (2) 波長分解能の向上
- (3) 感度・時空間・波長のダイナミックレンジの拡大
- (4) 組み合わせ性能の向上
- (5) インテリジェント機能の充実
- (6) 撮影以外の適用分野への拡大

科学技術への適用においては(1)~(3)の基本的性能の向上と、(6)の撮影以外の先端計測分野へ適用の拡大が重要である。一般用では(3)~(6)が現在の重点開発項目である。

表 1 イメージセンサの分解能と計測範囲³⁾

	分解能			ダイナミックレンジ
	A 理論限界	B 達成	B/A	
感度	1 Photon (1e-)	1 e- (0.3 e- rms)	1	SN比
空間	0.3 μm	0.6 μm	2	$\sqrt{\text{画素数}}$
時間	11 ps	10 ns	1,000	撮影枚数