

新連載 科学技術にまつわる数字から未来を読み解く

数字に見る科学と未来 Vol.1

究極の速さを求めて「飛ぶ光」を撮る超高速カメラ

1億分の1秒の画像を撮影する超高速カメラを開発したのは、立命館大学理工学部の江藤剛治客員教授を中心とする産学連携の研究チームだ。イメージセンサーを用いたカメラとしては世界で初めて、光が飛ぶ瞬間を捉えることに成功した。



1億分の1秒

えとう たけはる
江藤 剛治

立命館大学 理工学部
客員教授

1973年 大阪大学大学院工学研究科博士課程単位取得退学。工学博士。73年近畿大学理工学部講師、83年 同教授。2012年より現職。都市の雨水問題や超高速ビデオカメラの開発に取り組む。

水の流れから電子の流れへイメージセンサーに着手

1991年に誕生した4500分の1秒の画像を撮影するデジタルビデオカメラ。当時としては世界最高速で、走行中の新幹線の車体だけでなく、乗客の姿をも鮮明に写しだした。

高性能なイメージセンサーを搭載したビデオカメラを開発し、高速化を実現したのは、当時は近畿大学教授だった江藤剛治さんだ。都市の水問題や河川の流れを研究している江藤さんが、なぜイメージセンサーの開発を手掛けるようになったのか。

「水路の流れを解析するために動画撮影しようとしたのですが、30年ほど前は磁気テープに録画するアナログビデオカメラで、正確な解析は困難でした。それなら自分で高速デジタルビデオカメラを作ろうと考えました。」

フィルムをイメージセンサーに代え、シャッターは電子式にすることで、性能は格段に向上し、市販されるまでに至った。ひとつたび世に出ると、ユーザーの要望はさらに高まり、江藤さんは水理学の研究の傍ら、イメージセンサーの研究も継続することになった。

1画素を6分割して高速化 時間分解能が2.2万倍に

イメージセンサーの性能は、光の「感度」、画像の精細さを示す「空間分解能」、そして、どれだけ短い時間を撮影できるかを示す「時間分解能」で決まる。このうち感度と空間分解能は、すでに理論的な限界値に近づいているが、時間分解能はさらなる向上の可能性が残されている。江藤さんはこれに賭けた。撮影速度を上げると逆比例して入射光量は少なくなるため、感度

と時間分解能の両立が求められる。考案したのが、特殊な裏面照射型イメージセンサーだ。通常、イメージセンサーの表面には光を捉える撮像素子の他、複雑な回路が組み込まれている。この回路が光を遮って暗くしてしまうことがあった。そこで、回路がない裏面から画素中心部へ光を集めるように設計した。

しかし、イメージセンサーが光を捉えても、その画像情報のメモリーへの転送に時間がかかることが、時間分解能の向上を難しくしていた。思い付いたのが、イメージセンサーの1画素を6分割するアイデアだ。電極を6つ作れば、画像6枚分の情報を記録できる。イメージセンサー表面の中心部に6つの電極を花びらのように広げると、入射光から変換された電子が6つの電極に順番に流入する(図1)。

「シャッター速度の速いカメラを6台並べて順番に撮影すると、通常のビデオカメラより速く連続撮影できることと似ています」と江藤さん。「撮影後、複数枚の画像情報をまとめてセンサー外部のメモリーに転送することで、時間分解能を大幅に向上させることができました」。4500分の1秒を捉えるカメラの誕生から26年間で、時間分解能は2.2万倍になった。



1億分の1秒の撮影を可能にした超高速ビデオカメラ

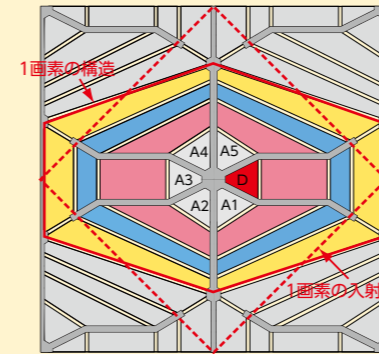


図1 イメージセンサー表面側の電極配置。画素中心周りに6つの三角形の電荷収集ゲートを花弁状に配置した。Dの電極は不要な電子の排出に使い、A1からA5の5つの電極に短い時間間隔で順番に高い電圧を加えると、5枚分の画像情報が各電極の下に集まる。

ゼロからの設計で苦勞 高い分解能も達成

江藤さんが設計したイメージセンサーをカメラに仕上げたのが、アストロデザイン社(東京都大田区)だ。映像や放送機器の開発を手掛け、その高度な技術力には定評がある。

7年前、同社常務取締役の三原勉さんは次なる技術シーズを探していた。江藤さんにアドバイスを求めたところ、「飛ぶ光を撮影してみませんか」と、思いがけない提案を受けた。三原さんは未知の可能性を感じた。同社事業開発部の井口昭彦さんは「尖った技術にあえて挑戦したかった」と振り返る。アストロデザイン社の熱意に背中を押され、JSTの技術移転支援プログラムであるA-STEPの支援の下、開発に乗り出した。

早速、同社事業開発部の林直樹さんが江藤さんの研究室に1年間派遣された。イメージセンサーの設計は初めてで、試行錯誤の連続だったと林さんは語る。「入射光から変換された電子をセンサーの電極に誘導しようとしても思い通りにいかず、設計ではシミュレーションで動作確認をすることの繰り返しでしたが、面白い経験でした」。

イメージセンサーを組み込んだ基板の開発に取り組んだのが、同じく事業開発部の三井鷹さんだ。当時の苦勞をこう振り返る。「既存のイメージセン

サーなら基板設計の仕様書がありますが、全く新しいセンサーなので、仕様書から書き起こすようなものでした。正解がない不安がありました」。

そして2017年、ついに時間分解能10ナノ秒、すなわち1億分の1秒の撮影を可能にする超高速ビデオカメラを完成させた。評価実験は装置がある近畿大学で行われた。霧と闇に包まれた実験室で、パルス状のレーザーを照射した。数秒の沈黙の後、「いけています!」とカメラ操作担当の弾む声が響いた。もくろみ通り、飛んでいる光の連続撮影に成功した瞬間だ(図2)。

質量分析の速度短縮に期待 200倍速の実現へ

超高速ビデオカメラは、これまで観察できなかった超高速現象の解明や、先端計測技術の革新に貢献する可能性を秘める。しかも、イメージセンサーを用いたカメラは、コンピューターとの相性もよく、他の撮影技術に比べて利便性が高い。

期待される用途の1つが質量分析技術だ。試料の1点にレーザーを当てて、飛び出してきた原子や分子の速度から質量を割り出す。超高速カメラを用いれば、全面を照射し、生じた粒子の速度を一度に測れるため、分析時間を飛躍的に短縮できる。

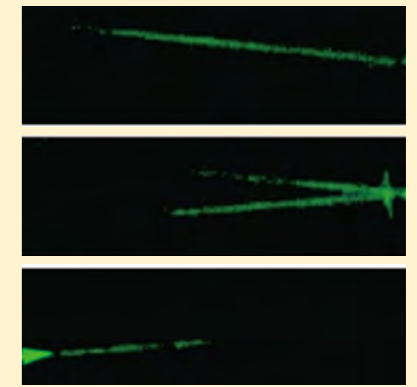


図2

飛ぶ光を連続撮影した10枚のうちの3枚。10ナノ秒で光は3メートル進む。10枚連続撮影するために30メートルを超える光路を用意し、向かい合わせに配置した鏡で反射する光を捉えた。



動画URL
<https://youtu.be/GYrkcoou54>

イメージセンサーを用いたカメラの研究開発の歴史はまだ浅い。江藤さんはさらに高い撮影性能を求め、社会に広めたいと考えている。飛ぶ光の撮影にこだわったのも、これまで特殊技術による撮影例しかなかったためだ。

「イメージセンサーを用いた撮影速度の理論的上限は、11.1ピコ(ピコは1兆分の1)秒です。この上限は難しいとしても、時間分解能を決める条件に沿って設計すれば、現在の技術で、200倍速い50ピコ秒の超高速イメージセンサーを作ることができます」。

究極の撮影速度は、次はどんな一瞬を切り取るだろうか。



飛ぶ光を捉える超高速ビデオカメラを実現した研究チーム。江藤さんが手にしているのはイメージセンサー。