速度の潜在能力を生かしたスマートICCDカメラ

アントワーヌ・ヴァラグナ、ジェラルド・ケアンズ、ゲーリー・ハンコック

撮像と分光の研究に使われる最新世代のICCDカメラは、特注ソフトウエアによる新しいアプローチを用いた信号読み出しの管理と増倍素子の開閉を用いて、毎秒数千の画像またはスペクトルを連続モードと毎秒数万のバーストモードで検出できる。

増倍CCD（ICCD）カメラは高い時間（高速ゲート）分解能と、電子増倍CCD（EMCCD）では非常に難しい単一光子検出機能が得られる[(1)、(2)]。従来の研究用ICCDは信号取得サイクルが遅く、携帯性にも制約がある。そのため、さまざまな分野から、より迅速に正確な情報を取得したいという要求を受けていた。その要求には生産ライン内プロセスと品質管理、遠隔地からの健康問題の検出および監視、高感度発光分析、光退色性生体試料の分析などのさまざまな要求が生まれていた。新たに登場した「インテリジェント」取得モードのカメラは、今日のICCDの能力を完全に生かし、高速で高信号対雑音比（SNR）のデータを取得できる。

ICCDは画像増倍素子と冷却したCCDアレイから構成され、両者を光ファイバプレートで接続して、最高の光透過性を実現している。光子が光電陰極（入力感光層）に入射すると、時間的分離が正確なナノ秒速度の信号のゲーティング、つまり光シャッタとしての開閉が行われる。発生した光電子は加速され、薄いハニカム構造のマイクロチャネルプレート（MCP）に向かう。この光電子の雲はMCPの狭いチャネルの内部で数百または数千倍に増幅される。次に、蛍光体スクリーンを用いて電子雲から可視光子への変換が行われ、可視光子は光ファイバプレートを通過しCCD上に到達して検出される。最後に、検出された信号は画像またはスペクトルとして読み出される。

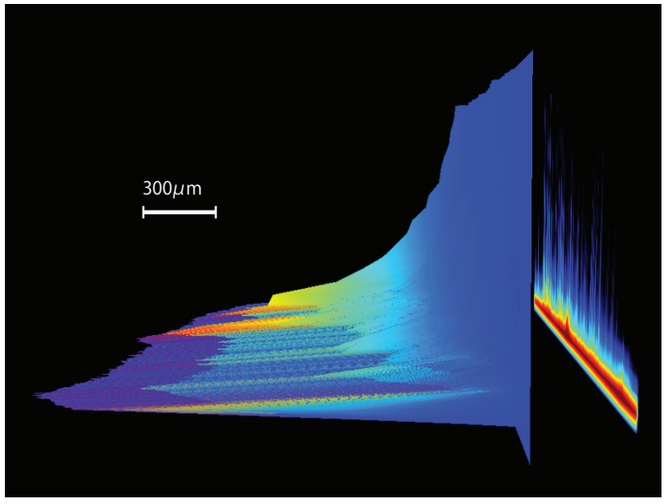

図1　アンドール社のiStar CCDカメラとShamrock 303分光計と用いた銅合金の時間分解レーザ誘起ブレークダウン分光法（LIBS）の測定データを示している。

クロップモード

物質アブレーション、ラジオ周波数プラズマ動力学分析、レーザ誘起蛍光（LIF）による粒子などの物体追跡、レーザ誘起ブレークダウン分光法（LIBS）による原子／化学顕微分光マッピングなどのさまざまな分野のパルス励起誘導現象の研究は、高い取得速度が必須になることが多い（図1）。これらの速度の要求を満足するには、高速過渡挙動の時間サンプリング周波数の最大化または最短時間でのSNRを可能にする同一現象の多重信号蓄積が必要になる。

実験からの有用な信号をCCD画素行列の底部の数列（つまり、直列読み出しレジスタに隣接する列）に精密に集光すると、「クロップモード」として知られるモードの使用が可能になり、毎秒数百までのサブ画像または毎秒数千のスペクトル（sps：spectra per second）を連続的に取得できる。専用ソフトウエアインタフェースを用いてセンサの低い部分上の実際に照明された列数を明確にすると、ユーザはクロップモードを用いることで、この特定部分だけの露光後のデータを読み出すことが可能になる。次の取得が開始されても、最後の露光はマスクされた読み出しレジスタを通して数百メガヘルツの

速度で読み出しノードに固定され、読み出し回路は最高の状態で管理され、最高速の取得速度が得られる。

撮像光学系の注意深い選択と位置決め、また分光計の場合の光ファイバ結合は、有用な信号を少数のセンサ列上に精密に結像し、センサの活性領域の上側部分に入る迷光を最小にするには必須となる。

クロップモードはどれほど高速に動作するのだろうか？ クロップモードの高速動作は使用するセンサの列数に依存する。13×13μmの高分解能画素から構成される標準の1024×1024画素アレイの場合、1024画素×10列の照明領域を設定すると333Hzの高いフレーム速度が得られる。

分光センサの場合の取得速度も大幅に向上する。読み出しスペクトルは一次元なので、重要な情報は基本的にCCDの縦列の強度となり、一般には試料中の発光信号の位置に関係する空間情報が不要になる。したがって、CCDの1つの縦列内にあるすべての画素は全信号の実際の読み出しが行われる前の読み出しレジスタに蓄積される。その結果、平均アクセススペクトル速度は3500sps以上になる。

表1　ICCDカメラモデルのクロップモードと高速移動モードの比較

	iStar DH320T	iStar DH334T
センサアレイサイズ	1024×255画素	1024×1024画素
画素サイズ	26μm²	13μm²
最大読み出し速度	5MHz	5MHz
フレーム速度（max., fps）		
1×1フルフレーム	15.9	4.2
クロップモード（130μm）	526（5列）	333（10列）
スペクトル速度（max., fps）		
FVB	323	145
クロップモード（130μm）	3,571（5列）	3,450（10列）
高速移動速度対チャネル高さ（Hz）		
500μm	4,155（20列）	3,930（38列）
200μm	9,495（8列）	9,525（15列）
100μm	16,615（4列）	16,805（8列）
50μm	26,590（2列）	39,850（4列）
26μm	37,990（1列）	48,780（2列）

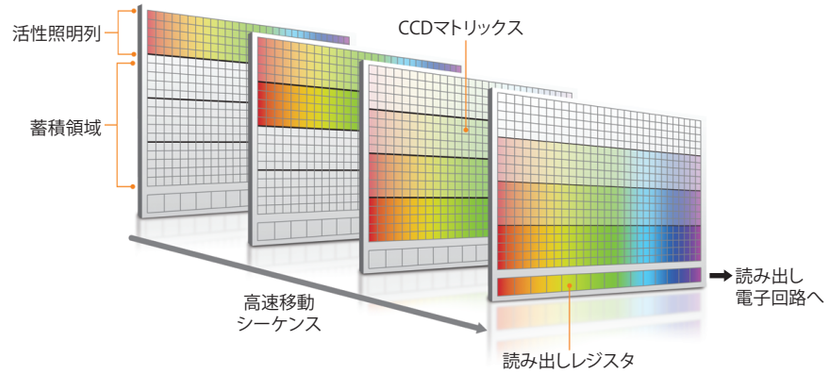

図2　高速移動モードの場合は、ICCDカメラのCCDの最上部にある数列の活性部分が照明される。カメラはCCDアレイの残りを高速蓄積レジスタにして、極端に高速の画像やスペクトルを取得する。

高速バースト現象の高速移動モード

しかしながら、画像の毎秒数百あるいはスペクトルの毎秒数千の速度であっても、このようなデータ取得速度が十分に高速とはならない用途もある。幸いなことに、「高速移動モード」と呼ばれる代替インテリジェント動作モードを使うと、高速バーストシーケンスによる高速動作が可能になる。レーザ閃光分解、ポンププローブ実験、プローブレーザ遅延の高速走査、高速過渡吸収などの実験はいずれも、このような高速取得速度が役立つ。クロップモードはCCDの読み出し増幅器のすべての能力を利用するが、高速移動モードはより高速の垂直方向のクロック速度（列から列への移動）を利用する。アンドール社の新しいiStarのような最先端ICCDは、この動作をわずか数ミリ秒で実行する。クロップモードの場合と同様に、CCDアレイのわずか数列がそれぞれの画像やスペクトルの記録に使われる。しかし、高速移動モードの場合、記録はアレイの最高部の数列で行われ、残りの列は高速ストレージレジスタとして使われる。

画像やスペクトルの取得はオペレータが専用ソフトウエアインタフェイスを通して設定したn列を使用して行われる（図2）。取得された画像は隣接するn列へ迅速に移動する。この過程はCCDの全アレイが一杯になり、バーストシーケンスが終わるまで反復され、すべてのアレイが直列読み出しレジスタを通して完全に読み出されると、この過程が反復される。高速移動モードの最大速度は各画像／スペクトルの列

数とCCDの垂直クロック速度から決まる。例えば、数ミリ秒のクロック速度の場合、8列が約17kHzの速度で画像化される。バーストの長さも各画像／スペクトルに使われる列数から決まる。例えば、1024×1024画素アレイの8列を使う場合、照明された最上部の8列は蓄積に使えないので、単一バーストでは（1024−8）/8＝127の画像が連続的に取得される。

毎秒1万7000データの取得速度は約60μsの時間分解能に相当するが、この分解能では不十分な蛍光減衰寿命の研究もある。しかし、この時間分解能はICCD光電陰極の高速開閉能力を利用することで何桁も改善できる。

チップ上の集積

センサは一連のデータ取得によって識別できる画像やスペクトルの取得時間を決めるが、画像増幅器は精密に分割できる究極の時間分解能を決める。その結果、レーザや閃光ランプなどの励起光源のいわゆる「ゲートアウト」が可能になり、LIBS装置のレーザアブレーション後に現われるコンティニュアムなどの望ましくない励起誘起背景雑音の発生を防止できる。また、極端に高い時間サンプリング粒状性が確保され、例えば、パルスプラズマプロファイルや蛍光寿命挙動プロファイルの精密な再構成も可能になる。光電陰極の開き時間はソフトウエアを用いることでナノ秒からミリ秒の時間周期にわたり制御され、最新のICCDの励起光源からのゲーティング遅れは10ps以内に調整される。

いくつかの実験では1回の励起に対して本質的に小さい光子フラックスの発生が観測されている。これは時間サンプリングの必要性、望ましくない信号ゲーティングの必要性、生体試料の光退色感受性などから生じると考えられる。その結果、許容できるSNRの実現が難しくなる。増幅器利得の一定レベルまでの増加は効果的だが、それ以上の増加は効果がなく、極端な増加はSNRの低下を引き起こす。これは光電陰極の熱雑音とショット雑音の増加から生まれる。

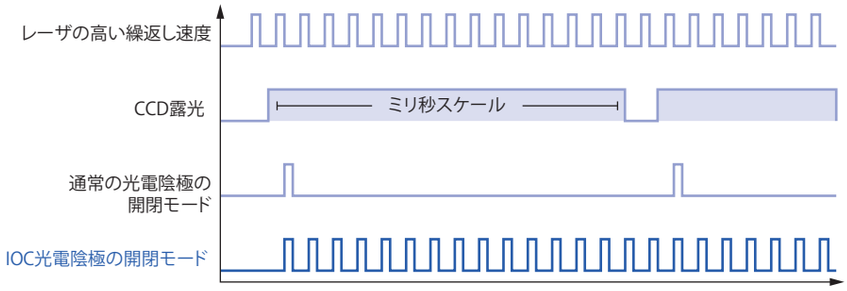

図3　高い繰返し速度のパルスレーザなどで励起された高速繰返し速度の事象の場合、チップ上の集積モードは1回のCCD露光で多数の事象を記録するので、カメラの感度が時間分解能の犠牲なしに大幅に向上する。

しかしながら、高速繰返し速度レーザ（10Hzから数百kHzまで）を用いると、光電陰極のタイミングと利得の精度を維持しながら、より短い時間フレームでのSNRの最大化が可能になる。とくに、CCDの取得速度が励起光源の周波数を超える（つまり、CCDの1回の露光中にいくつかの有用な信号が発生する）場合、チップ上の集積を行うと、センサのそれぞれの読み出しに先行して、すべての有用な信号の正確な追跡と蓄積を行うことができる（図3）。最新世代のICCDは500kHzまでの速度から発生したすべての単一信号をゲート電圧の変更なしに利用できるので、最高のシステム空間分解能が維持される。

通常モード動作の光電陰極は、露光時間が全体でミリ秒になるCCDの2nsの短い時間に対して活性化される。システムは残りの露光時間を暗雑音として蓄積する。しかし、チップ上の集積の場合は残り時間が有用な信号の累積に使われる。このときの光電陰極はレーザパルスと同じ遅延時間で同期されるが、CCDの毎回の露光に対して何回でも開いた状態になる。信号レベルが低い場合、このことはデータを高いSNRで迅速に構築する最適な方法になる。

より高速のチップ上の集積は撮像と分光のいずれであっても、とくに蛍光寿命測定の場合は、すべての繰返し事象の記録に役立つ。また、最新のソフトウエア制御デジタル遅延発生器をチップに搭載すると、非常に強力な性能が得られる。この組み合わせは前例のない数百kHzのバースト速度の取得を、ナノ秒の時間分解能と10psの精密な遅延設定で行うことができる。

参考文献
（1）C. G. Coates and D.J. Denvir, “Optimizing low -light microscopy with back -illuminated electron multiplying charge -coupled device,” J. Biomed. Opt., 9, 6（November/December 2004）.
（2）D.J. Denvir and E. Conroy, “Electron Multiplying CCD Technology: The new ICCD,” SPIE Proceedings Series, 164（2002）.

著者紹介
アントワーヌ・ヴァラグナ（Antoine Varagnat）とジェラルド・ケアンズ（Gelald Cairns）はアンドールテクノロジー（Andor Technolo gy, 北アイルランド）に所属、ゲーリー・ハンコック（Gary Hancock）はアンドールテクノロジー USA（Andor Technology USA）に所属。
e-mail: a.varagnat@andor.com　URL: www.andor.com

LFWJ