特 集

ストリークカメラによる超短光パルス計測

土 屋 裕*

(1987年10月16日 受理)

Measurements of Ultrashort Optical
Pulses by Streak Cameras

Yutaka TSUCHIYA*

(Received October 16, 1987)

Recent measuring technology for various types of ultrashort optical pulses using ultrafast streak cameras and optical oscilloscopes are reviewed. The optical oscilloscope is a conceptually new electron-optical instrument, in which two advanced technologies: streak camera and oscilloscope, are combined in one unit.

Key Words: Streak camera, Synchroscan streak camera, Optical oscilloscope, Sampling optical oscilloscope, Ultrashort pulse measurement

1. はじめに

超高速光現象の計測手段としてストリークカメラが本格的に使用されるようになったのは、ストリークカメラとストリーク像解析装置を結合した「超高速ストリークカメラシステム」が出現して^{1,2)}、ピコ秒域のリアルタイム計測が初めて可能になった1977年以後である。以来、既に10年が経過したが、この間、超高速ストリークカメラシステムは、ピコ秒～サブピコ秒域における唯一の直接的な計測手段であったため、先端的な計測応用分野からの新たな厳しい要求に、常に直面してきた。この結果、その方式、性能、計測応用などについて、数々の研究開発が行われ^{3～5)}、現在では、種々の特長を持った種々の型の超高速ストリークカメラが実用化さ

れている^{6～10)}。

最近の超高速ストリークカメラの主なものとしては、時間分解能0.4ps以下のもの¹¹⁾、シンクロスキャンと単掃引を切替えるもの¹²⁾、単一光電子を確実に検出できるもの¹³⁾、光ファイバで導かれる40チャンネルの光信号を同時計測できるもの^{14,15)}、GHz域の高速繰返しパルス光の計測ができるもの^{16,17)}、モード同期レーザーの個々の光パルスのジッタなどが高時間分解能で計測できるもの^{16,17)}、1.6 μ mまでの赤外線域での計測ができるもの¹⁸⁾、軟X線域での計測ができるもの¹⁹⁾、1:10⁵以上のダイナミックレンジを持つもの²⁰⁾などがある。また、ストリーク像解析装置では、空間解像度、幾何学歪、ダイナミックレンジなどの特性が優れた冷却型CCDカメラ²¹⁾を利用したものがある²²⁾。

* 浜松ホトニクス(株)技術部 (〒435 浜松市市野町1126-1)

* R&D Division, Hamamatsu Photonics K.K. (1126-1 Ichino-cho Hamamatsu 435)

さらに、極最近では、超高速光計測における先端技術であるストリークカメラ技術と電気波形計測における汎用技術であるオシロスコープ技術を融合した、全く新しい概念の「光オシロスコープ」が開発された^{10,23~25)}。この光オシロスコープは、エレクトロニクス全盛時代の次にくるフォトン時代²⁶⁾の汎用型高速光波形計測器として、広い応用が期待されている。

そもそも、超高速ストリークカメラシステムによる計測は、

- ①直接法で高時間分解能 ($<0.4\text{ps}$)、かつ高検出感度 (単一光電子域まで) である。
- ②時間分解分光や空間・時間分解計測などの三次元、または、多チャンネル計測ができる。
- ③高速繰返し現象に対して、高速積算による高精度計測ができる。
- ④近赤外線域から真空紫外線域、さらには、X線域での計測ができる。
- ⑤ほぼリアルタイムの計測ができる。

など、他方式では実現不可能な特長がある。

本稿では、最近の超高速ストリークカメラシステムや光オシロスコープによる超短光パルス波形計測について述べる。

2. ストリークカメラによる計測

2.1 超高速時間分解計測

世界最良の時間分解能は、1984年に開発されたフェムト秒ストリークカメラ (FESCA) による 360fs である^{11,26)}。このFESCAに使用したストリーク管は、電磁集束 (従来は静電集束)、強加速電界 (光電面近傍で $\approx 6 \times 10^4\text{V/cm}$)、高偏向感度 ($\approx 6\text{cm/kV}$) などの特長を持ち、光電面と加速メッシュの間だけに強加速電界を印加する構造になっている²⁷⁾。

Fig.1は、CPM (パルス衝突型モード同期) 色素レーザー²⁸⁾からのフェムト秒光パルス (100fs FWHM以下) をマイケルソン干渉計に導いて得たダブルパルスの計測例 (ストリーク像とその強度分布) を示す。ダブルパルスの間隔は 4ps に設定してあり、パルス幅の計測値は、それぞれ、 392fs と 466fs となる。

Fig.1 An example of streak image and corresponding intensity profile, showing sub-picosecond temporal resolution of the FESCA.

超高速ストリークカメラでは、一般に、入射光のパルス幅を一定として、その強度を増していくと、パルス幅の観測値が広がる。これは、ストリークカメラの時間分解能が入射光の強度に依存することを意味し、時間分解能を定めた時に計測可能な入射光の強度範囲をダイナミックレンジと呼んでいる^{2~4)}。FESCAで測定を繰返して評価した結果、限界時間分解能は 360fs 、また、その時のダイナミックレンジは 2.4 であることがわかった¹¹⁾。

光電面自体の応答時間は 10fs 以下であると考えられているが、上述のダイナミックレンジを考慮すると、現方式のストリークカメラの究極的な時間分解能は 100fs 程度になる¹¹⁾。なお、ダイナミックレンジを制限する原因やその解決法は、まだ明らかになっていない。

2.2 極微弱光パルスの測定

繰返し極微弱光現象を精度よく計測するには積算計測が有効になる。シンクロスキャンストリークカメラ^{29,30)}はこれを目的として開発されたもので、 $80\sim 160\text{MHz}$ で繰返す超短光パルスレーザーと同期した正弦波で掃引する。入射光と掃引が同期しているから、個々の掃引によるストリーク像が蛍光面上の同一位置に生じて積算され、高いSN比が得られる。掃引周波数

はサブ・プラグインによって切換えられる。また、単掃引とシンクロスキャンが切換えられるユニバーサルストリークカメラもあり、時間分解能は単掃引のとき 2 ps, シンクロスキャンのとき 5 ps である。¹²⁾

シンクロスキャンストリークカメラを限界時間分解能付近で使用する場合、系のジッタによって時間分解能が 5 ps 程度に制限される。ジッタを発生する主な原因は、レーザーパルスの強度やパルス間隔の変動である^{16,28)}。このようなジッタの影響は、電子ゲート動作によって低減することができ、ユニバーサルストリークカメラの場合、最短時間幅 100 ns, 消光比 $1:10^6$ 以上のゲート動作が可能である¹²⁾。

2.3 フォトンカウンティング計測

ストリーク管は、光電面から出た光電子を蛍光面上のストリーク像に変換する。入射光を極微弱にして電子増倍部の利得を大きくすると、ストリーク像は離散した輝点の分布になる。この際、輝点の数を計数して入射光強度を計測することができ、この方法をフォトンカウンティング法と呼ぶ。この方法では、増倍利得の揺らぎを小さくして (パルス波高分布特性にピークが現れる)、個々の輝点の光強度の揺らぎを小さくすることが重要である¹⁷⁾。

ストリーク管で上記の性能を得るには、電子増倍に使用しているマイクロチャンネルプレート (MCP) を 2 枚にすればよく、これをユニバーサルストリークカメラに適用したものが、光子計数型ストリークカメラである¹³⁾。シンクロスキャンモードでストリーク像をアナログ的に積算すれば、S/N 比の高い計測ができる。また、単掃引モードで個々の輝点、すなわち入射光子の時間情報を計測すれば、光子統計、光子相関などが測定できる¹³⁾。

Fig. 2 は、光子計数型ストリークカメラで得たストリーク像を示す。個々の輝点が個々の入射光子に対応しているから、光子の到着時間をピコ秒という精度で計測できる。また、ストリーク像の空間方向の情報から光子の空間分布を

Fig. 2 An example of photon-counting streak image, where each bright dot corresponds to an individual incident photon.

Fig. 3 Time-resolved spectroscopic image of output light from a 4.5km single-mode fiber. Picosecond input light pulse obtained by a LD is strongly multi-mode in longitudinal-mode.

知ることもしける。

2.4 時間分解分光計測

分光器とストリークカメラシステムを結合すれば、時間分解分光計測ができる。Fig. 3 は、レーザーダイオード (LD) で得られる多縦モードのピコ秒光パルスを 4.5 km のシングルモードファイバに通して得られた出力光の時間分解分光計測例である。図から、波長の長い光ほど遅れてくることがわかる。このデータから光ファイバの波長分散を求めると³¹⁾, 17.0 ps/km·nm

at $1.52\mu\text{m}$ となる。それぞれの波長の光パルスについて考えれば、チャージングと波長分散と同じ方向のときにパルス幅が広がり、逆方向のときにパルス圧縮ができる。

このような時間分解分光計測では、時間分解能 $\approx 1\text{ps}$ と波長分解能 $\approx 1\text{\AA}$ が、それぞれ独立に得られるが、両者が不確定性の関係にあるため、これらを同時に満足する計測はできない。

2.5 空間・時間分解計測

ストリークカメラの前に結像系を付ければ、被写体上の直線に沿った部分の像がストリークカメラの入力スリットに入射し、各位置の光強度の時間的变化が計測できる。この場合、ストリーク像の一軸は時間、他軸は位置となる。このような空間・時間分解計測は、放電、爆発、衝撃波、超高速変位（モワレ縞計測）などの計測に利用されている。また、レーザー核融合実験では、X線ストリークカメラによって核融合燃料球の爆縮の計測が行われている³²⁾。

2.6 多チャンネル同時時間分解計測

多種の信号を光信号に変換して光ファイバで導き、これらを一列に並べてストリークカメラに入力すれば、多チャンネル信号の同時計測ができる。Fig.4は、40回線の信号を時間分解能 10ps で同時計測できるシステムを示す¹⁵⁾。このようなシステムの機能は、多チャンネルトラン

ジェントレコーダと等価である。

レーザー核融合実験、高エネルギー実験など電磁ノイズの強い場所、近くに計測器を設置できないような実験、多数の離れた場所からの信号の同時計測などに極めて有効である。なお、この種の計測では、光ファイバの中のパルス広がり^{3,4)}や波長分散を考慮する必要がある。

2.7 高速繰返し（GHz域）光パルスの計測

シンクロスキャンストリークカメラは、正弦波による掃引の戻り期間に入射光があると、往復の掃引によるストリーク像が重なり、強度分布の解析が困難になる。これは、最近、重要性が増してきたLDからの超高速繰返し光パルスの計測などで問題となる。そこで、戻りの掃引を楕円形の二次元掃引によって蛍光面の外に出して、ブランピングする方法が開発された¹⁶⁾。これはFig.5(a)に示すようなもので、種々の形と大きさの掃引が選べる。

この結果、従来不可能であったGHz域の高速繰返しパルス光や比較的寿命時間の長い蛍光などの超高速時間分解計測が可能になった¹⁶⁾。この方式は、2.9節に述べるS-1光電面との併用が可能であり、3.2節に述べる長波長用光オシロスコープでも採用している。

2.8 高速繰返し光パルスのジッタの計測

モード同期色素レーザーなどの高速繰返し超

Fig.4 Schematic diagram of multichannel time-resolved measurement.

Fig. 5 Conceptual diagrams of elliptical sweep and dual time base sweep.

Fig. 6 Dual time-base streak image of dye (upper) and pumping (lower) pulses, showing their fluctuations at the driving frequency of 40.941823 MHz for the mode locker.

短光パルスの中の個々のパルスの強度揺らぎやジッタが計測できる方法が開発された¹⁶⁾。これは、二時間軸ストリークカメラと呼ばれるもので、その掃引方法を Fig. 5 (b) に示した。縦軸掃引を行う正弦波は光パルスに周期し、その周波数は光パルスの繰返し周波数の整数倍、あるいは整数分の1倍である。横軸の掃引速度は、鋸歯状波の傾斜を変えて制御する。このようにすれば、比較的長時間に及ぶ光現象をピコ秒域の時間分解能で計測できる。

Fig. 6 は、強制モード同期 Nd:YAG レーザ励起色素レーザーからのピコ秒光パルスのジッタを計測した例を示す。縦軸は 200 ps/div、横軸は 1 ms/div であり、色素レーザーからのピ

コ秒パルス（上）と励起光（下）のストリーク像を示す。縦軸の掃引は、励起光パルスを分岐して得たトリガ信号に同期している。これは、モードロッカーの駆動周波数とジッタの関係を測定した一連のデータの中の一つで、駆動周波数は、最適値 -30 Hz ($40,941,53 \text{ Hz}$) である。この図から、励起光パルスの欠落、ハンチングしているように見える色素レーザーパルスの位相揺らぎなどがよくわかる¹⁶⁾。

2.9 赤外線域 ($\sim 1.6 \mu\text{m}$) の計測

従来、光電子放出効果を利用したストリークカメラでは長波長域での計測が困難であるとされていたが、最近、シンクロスキャンと S-1 光電面を組み合わせることによって、 $1.6 \mu\text{m}$ までの長波長光パルスの計測が可能になった¹⁸⁾。S-1 光電面の量子効率¹⁸⁾は波長 $1.5 \mu\text{m}$ のとき約 10^{-7} と小さいが、シンクロスキャン周波数 100 MHz と計測時間 10 ms を考えれば、実効的な量子効率は $(10^{-7} \times 10^6 \times 10^{-2}) = 0.1$ となり、可視域の単一光パルスに対する S-20 光電面の量子効率 ≈ 0.1 と同じ値になる。

実用的な光強度域では線形 ($\gamma=1$) な変換特性を示し、ダイナミックレンジは少なくとも 10^3 以上である¹⁸⁾。Fig. 7 は、InGaAsP LD からの光パルスの緩和振動を時間分解分光計測した例を示す。この種の高速繰返し光パルス計測には、

Fig.7 An example of relaxation oscillation measurement of an InGaAsP LD.

2.7節に述べた楕円掃引が有用である。

2.10 X線域の計測

軟X線域 (100 eV~10 keV), および紫外線域に感度があり, 光電面の交換が可能なX線ストリークカメラが開発された¹⁹⁾。光電面は, 1000Åのパリレンフィルムの上に蒸着した300ÅのAu膜を用いている。差動排気によってストリーク管の中の真空度を保つ構造になっており, 時間分解能10psである。

軟X線域や紫外線域での計測は, 非線形相関法では困難であり, 超高速ストリークカメラによって初めて測定が可能になった分野である。

2.11 超高ダイナミックレンジ計測

シンクロスキャンや楕円掃引ストリークカメラは積分原理を利用しているから, 単掃引型ストリークカメラに比べて, 優れた検出感度と優れたダイナミックレンジ特性を示す。しかし, 蛍光面での光のクロストークやかぶりを考えると, その上限は高々 10^4 程度である。これに対して, ダイナミックレンジ $10^5:1$ 以上が得られる方式が開発された²⁰⁾。

Fig.8は構成図を示す。ストリーク管の蛍光面の直前にスリットを設けて電子像を切出し (サンプリング), これを蛍光面で光信号に変換して光電子増倍管 (PMT) で読み出す。PMTの出力は対数増幅器で増幅し, X-YレコーダやオシロスコープのY軸に入力する。一方, 入射

Fig.8 Block diagram of a synchroscan photometer.

光パルスの一部を分岐して得た掃引トリガ信号は, 遅延したあと正弦波に変換してストリーク管の偏向電極に印加し, 遅延時間に比例した電圧信号を前記X-YレコーダやオシロスコープのX軸入力とする。

Fig.9に, LDからの光パルスの計測結果を示す。LDの駆動周波数は ≈ 8.2 kHz, カメラの掃引周波数は85MHz, LDの光パルスの幅は46ps, また, 計測時間は100sである²⁰⁾。LDか

Fig.9 Intensity profiles of picosecond LD pulses for various input power, showing a greatly improved dynamic range of $\approx 10^5:1$.

らの光パルスには、LEDモードの自然発光成分があるため、ニュートラルフィルタを用いて入射パルス光の強度を減じた。この図から、パルス光のピークと背景光との比が $10^3:1$ 程度、また、系のダイナミックレンジは $1:10^5$ 以上であることがわかる。

2.12 超高速電気信号の計測

電気光学効果を利用した電気-光変換器を用いれば、ストリークカメラで超高速電気信号を計測することができる³³⁾。変換器は、直交する偏光子の間に置いた光学結晶のポッケルス効果を利用するもので、透過光強度が光学結晶の両端にかかる電圧の関数となる。光学結晶としては、 LiTaO_3 などが用いられる。

3. 光オシロスコープによる計測

3.1 サンプルング型光オシロスコープによる計測

サンプルング型光オシロスコープ(OOS-01)は、全く新しい概念に基づいて、最近、開発された超高速の光波形計測器である。機能的には、従来の電気オシロスコープの入力を光信号にしたものであるが、その動作は電子光学的であり、時間分解能10ps以下、ダイナミックレンジ1000:1以上、超低波形歪、高サンプリングレート(2MHz)などの特長があり^{23~25)}、可視光域の光信号の直接測定ができる。

構造的には、ヘッド部(本体に収納可)と本体部(信号処理部)から成り、ヘッド部はサン

Fig.10 Operating principle of the sampling optical oscilloscope.

プリングストリーク管を内蔵している。Fig.10は、ヘッド部の動作原理を示すもので、光電変

Fig.11 An example of relaxation oscillation measurement.

Fig.12 Impulse response of the sampling optical oscilloscope.

Fig.13 Measurement of fluorescence of Rose Bengal (lower) and the exciting pulse (upper). The repetition rate of the exciting pulse is 82 MHz and the measuring time is 10 seconds.

換, 時空変換 (ストリーク掃引による変換), 電子サンプリング (スリットによる空間域でのサンプリング) などを一本のサンプリングストリーク管の中で実行する。

この方式は時空変換, および空間的な電子サンプリングを利用しているため, 従来のオシロスコープでは不可欠であったサンプリング用, あるいは増幅・処理用の超高速電子回路が不要になるという大きな利点がある。また, 従来方式で高速光検出器とオシロスコープを接続するケーブルも unnecessary になる。これらの結果, OOS-01は, 時間分解能が優れているとともに, 従来の測定系では不可避であるミスマッチングによる波形歪などが極めて小さくなる。

Fig. 11は, LDの緩和振動をサンプリング型光オシロスコープで計測した例を示す。LDの波長は780nmである。Fig 12は, サンプリング型光オシロスコープのインパルス応答を示すもので, 被測定光はCPMリング色素レーザーからのフェムト秒光パルスである。この図から, OOS-01のインパルス応答は $\approx 11\text{ps}$ であることがわかる。また, Fig. 13は, Rose Bengalの蛍光寿命を計測した例である。図中の上部は励起光, 下部は蛍光であり, 対数目盛りで表示してある。励起光パルスの繰返し周波数は82MHzであり, わずか10秒の計測時間で1000:1程度のダイナミックレンジが得られる。

3.2 長波長用光オシロスコープによる計測

長波長用光オシロスコープは, $1.6\mu\text{m}$ までの波長域での計測を目的として開発された光オシロスコープである³⁴⁾。楕円掃引方式を採用しており, 25~120 MHzの範囲の内の固定周波数による掃引が可能である。光通信関係で用いる各種の基準クロック (445.84, 463.00, 1820.90, 1930.00 MHz) で動作する光信号を計測するために, 基準クロックを1/16, または1/32に分周するプリスケラが用意されている。

被測定光は, Fig. 14の下部に示す本体正面に付けた光コネクタから入力する。リニアイメージセンサでストリーク像を読み出し, 時間分解能

Fig. 14 External appearance of the longwave optical oscilloscope.

10~20psが得られる。図中の上部に示すユニットは, 信号処理部でありオシロスコープとしての各種の波形演算・処理を行う。

4. あとがき

ストリークカメラによる超短光パルスの計測について述べた。最近のストリークカメラの進展は目覚ましく, その応用分野は急激に広がってきた。また, 新しく出現した光オシロスコープは, 汎用性があり, 手軽に使える超高速光波形計測器として, 今後の光波形計測分野に大きなインパクトを与えるものと考えられる。

紙面の制約上, 詳細を省いたり, 取上げなかった分野も多いことをご容赦願いたい。

参考文献

- 1) 土屋 裕, 犬塚英治, 鈴木義二: テレビ学会誌, **34** (1980) 1006.
- 2) 土屋 裕, 犬塚英治: テレビ学会誌, **35** (1981) 208.
- 3) 土屋 裕: レーザ研究 **10** (1982) 148.
- 4) Y. Tsuchiya: IEEE J. Quantum Electron., **QE-20** (1984) 1516.
- 5) A. J. Campillo and S. L. Shapiro: IEEE J. Quantum Electron., **QE-19** (1983) 585.
- 6) Y. Tsuchiya and Y. Shinoda: Proc. SPIE **533** (1985) 110.
- 7) 土屋 裕: レーザ学会第6回年次大会予稿集 (1986) p. 166.
- 8) 土屋 裕: 第34回春季応用関連講演会予稿集 (1987) p. 915.

- 9) 土屋 裕：光タイムドメイン応用調査専門委員会編，電気学会技術報告第254号 (1987) Chap. 3. 3, Chap. 4. 4.
- 10) Y. Tsuchiya: Technical Digest of Conf. on Lasers and Electro-Optics, Baltimore, Apr. 1987, p. 28.
- 11) 滝口義浩，土屋 裕，木下勝之：応用物理，**55** (1986) 515.
- 12) Y. Tsuchiya, A. Takeshima, E. Inuzuka, K. Suzuki, M. Koishi and K. Kinoshita: Proc. SPIE **491** (1984) 86.
- 13) T. Urakami, Y. Takiguchi, K. Kinoshita and Y. Tsuchiya: Proc. SPIE **693** (1986) 98.
- 14) K. Kinoshita, M. Ito, Y. Inagaki, T. Nakamura, T. Takeshita and K. Oba: Proc. SPIE **569** (1985) 173.
- 15) 浜松ホトニクス社カタログ C2780.
- 16) Y. Tsuchiya, M. Koishi, M. Miwa, T. Kurisaki, M. Watanabe and K. Kinoshita: Proc. SPIE **693** (1986) 125.
- 17) 土屋 裕：テレビ学会誌 **41** (1987) 415.
- 18) Y. Tsuchiya, H. Suzuki, M. Koishi, K. Kinoshita and T. Nakamura: Proc. SPIE **569** (1985) 181.
- 19) K. Kinoshita, E. Inuzuka, Y. Takiguchi, H. Okada, K. Suzuki, I. Hayashi, Y. Tsuchiya and K. Oba: Proc. SPIE **427** (1983) 36.
- 20) Y. Tsuchiya, K. Kinoshita, M. Koishi, A. Takeshima and Y. Inagaki: Proc. SPIE **491** (1984) 224.
- 21) 小川一三，原雅宏，水島廣，竹山周良：テレビ学会技術報告 IPA'87-1 (1987).
- 22) 浜松ホトニクス社カタログ CCD-TA.
- 23) 土屋 裕：オプトエレクトロニクス技術'87 (光学工業技術協会) II-4 (1987).
- 24) Y. Tsuchiya, M. Koishi and K. Kinoshita: Proc. Opto-Electron. Laser '87 (June 1987, Munchen FRG) in press.
- 25) Y. Tsuchiya, M. Koishi and K. Kinoshita: Proc. SPIE **832** (1987) in press.
- 26) Y. Takiguchi, K. Kinoshita, E. Inuzuka and Y. Tsuchiya: Proc. SPIE **491** (1984) 46.
- 27) K. Kinoshita, M. Ito and Y. Suzuki: Rev. Sci. Instrum. **58** (1987) 932.
- 28) 青島紳一郎，土屋 裕：レーザー研究 **14** (1986) 316.
- 29) R. Hadland, K. Helbrough and A. E. Huston: Proc. 11th Inter. Cong. High Speed Photography (1975) 107.
- 30) Y. Tsuchiya, A. Takeshima and E. Inuzuka: Proc. SPIE **348** (1982) 245.
- 31) K. Mochizuki, M. Fujise, H. Suzuki, M. Watanabe, M. Koishi and Y. Tsuchiya: Electron. Lett. **21** (1985) 524.
- 32) 山中龍彦：応用物理 **55** (1986) 36.
- 33) J. A. Valdmanis and G. Mourou: IEEE J. Quantum Electron. **QE-22** (1986) 69.
- 34) 浜松ホトニクス社カタログ OOS-3085.