レーザー解説

ピコ秒ストリークカメラとその応用

土 屋 裕*

Picosecond Streak Camera and Its Applications

Yutaka TSUCHIYA*

(Received December 4, 1981)

1. まえがき

ピコ秒領域における測光は、超短時間と超高光強度という特長を合わせ持つピコ秒レーザーの出現によって、物理、化学、生化学、物性、光工学、核工学、高エネルギー物理、およびこれらの境界領域などの新しい分野で、必要不可欠なものとなってきた^{1)~5)}。このような分野における超高速光現象の波形測定方法としては、光カーシャッター⁶⁾を用いて被測定光をサンプリングする方法、エシェロン⁷⁾などの時間-空間分解変換系を利用する方法、および、ストリークカメラ⁸⁾による方法があるが、最も優れた測定手段はストリークカメラであろう。

ストリークカメラの歴史は、まだ10年程度と短い、時間分解能0.7psの報告⁹⁾もある。最近では、マイクロチャンネルプレート(以下MCP)を内蔵した高感度ストリーク管¹⁰⁾とこれを用いた小型、高性能ストリークカメラ¹¹⁾が開発された。また、テレビジョン技術を応用したストリーク像解析装置^{12), 13)}の開発によって、ピコ秒領域のほぼリアルタイムな計測が初めて可能となり¹⁴⁾、これらを組み合わせたピコ秒ストリークカメラシステム^{15), 16)}が、実用性、機能性、性能などの優れたものとして広く利用されている。

このようなストリークカメラは、近赤外から可視、さらには紫外、X線域の現象まで測定できる。また、単なる高精度の時間分解だけでなく、空間分布や分光器によるスペクトルの時間的変化などの二次元的解析^{17)~19)}も同時に行な

え、検出感度も極めて高い。

ストリークカメラには、時間分解能2psの超高速型^{20), 21)}から、放電や爆発などの解析を目的とした低速型(時間分解能1ns~10 μ s)²²⁾まで各種のものが開発されている。また、100~200MHzで発振するDyeレーザーと組み合わせて、極めて微弱な蛍光などが測定できるシンクロスキャシストリークカメラ^{23), 24)}もある。他方、二次元的解析を目的として、フレームメモリ(デジタル画像メモリ)を内蔵したストリーク像解析装置²⁵⁾も開発されている。

本稿では、このようなピコ秒ストリークカメラシステムについて、筆者らが開発してきたものを中心として、実用面、応用面からシステムの動作原理と概要、主要特性、計測手法などについて述べる。

2. ストリークカメラシステムの概要

ストリークカメラシステムは、Fig.1に示すように、ストリークカメラとストリーク像解析装置に大別され、後者はSIT(Silicon Intensi-

Fig. 1. External appearance of the streak camera system having a capability of real time measurements in a picosecond region.

本資料は今年2月4日~6日、東京で開催されたエレクトロ-optics / レーザー'82セミナー(レーザー学会主催)のテキストの一部である。

*浜松テレビ(株)(〒435 浜松市市野町1126-1)

*Hamamatsu TV Co., Ltd.(1126, Ichino-cho, Hamamatsu-shi, 435)

fier Target) 管カメラ, アナライザーおよびテレビモニターから成る。この他, Fig. 1 には示していないが, トリガー信号発生用 PIN フォトダイオード受光器, トリガー信号の遅延時間を調整する遅延ユニット, 出力データを記録・処理するペンレコーダやホストコンピュータがある。

2.1 ストリークカメラ

Fig. 2 にストリークカメラの系統図を示す。被測定光を入力スリットに入射し, リレーレンズを介してストリーク管光電面にスリット像を結像させる。入射光は光電面で電子に変換され, メッシュ状の電極で加速されて偏向場に入り, スリット長さ方向と直角な方向に高速偏向されたあと, MCP で約 3×10^3 倍に増倍され, 蛍光面に射突して光学像 (ストリーク像と呼ぶ) に変換される。

Fig. 2. Block diagram of the compact streak camera.

この結果, 電子は, いつ光電面を出たかによって, その偏向角, すなわち蛍光面上の位置が決まり, 入射光の時間軸が蛍光面上の縦軸に変換されることになる。したがって, 像の濃淡から入射光の強度, 縦軸上の距離から時間差がわかる。また, 入射スリットにスペクトルを入射すれば, 蛍光面上の横軸は波長軸となり, 4.3 節に述べる時間分解分光が行なえる。

なお, 上述の高速偏向と電子の通過はタイミングを合わせる必要があり, 通常は, 被測定光の一部をビームスプリッターで分岐し, PIN フォトダイオードで受光してトリガー信号を得ている。

掃引回路は, トリガー信号に同期した高速偏向電圧を発生する。このとき, 掃引速度とその直線性, 遅延時間, トリガージッターなどの特

性が重要であり, 特殊なトリガー回路を介してアバランシェトランジスタをスイッチングするもの^{15), 20)} や高周波用三極管を用いたもの²²⁾ などがある。いずれの場合も, 掃引速度はステップ切換えとなっている。

ストリークカメラには, 通常のストリークモードと掃引を停止してイメージ管として動作するフォーカスモードがある。後者は, 光学系のアライメント調整や入射光量調整などに有用である。また, 感度は MCP の印加電圧を切換えて制御することができる。

2.2 ストリーク像解析装置

ストリーク像解析装置では, ストリーク像を SIT カメラで撮像し, 得られた画像信号をアナライザーで解析して, 入射光の強度分布をテレビモニター画面上にグラフ表示するとともに, アナログまたはデジタル信号として出力する。被測定光入射からモニター画面上のグラフ表示までの時間は, 最大 2 秒, 平均 1 秒であり, ほぼリアルタイム計測が可能である。

(1) SIT カメラ

有効走査面は $10 \times 10 \text{ mm}^2$, 有効走査線数は 256 本, 順次走査である。ストリーク管内の MCP に入射する単一光電子を検出するのに必要なゲイン¹⁵⁾ (3.6 節参照), 強いパルス光入射時の画像信号増幅器の飽和に起因する誤計測を防止するための読出し電子ビーム量の抑制¹⁵⁾ などの考慮がしてある。通常は, ストリークカメラの掃引方向と SIT カメラの垂直走査方向を一致させて使用する。

(2) アナライザー¹⁵⁾ (TA)

Fig. 3. Block diagram of the Analyzer.

Fig. 3 にアナライザーの系統図を示す。画像信号に対して、各々の走査線ごとにゲートをかけて積分し、結果を A/D 変換 (8 ビット) してメモリー (16 ビット) に記憶し、これを読み出してモニター画面上のグラフ表示 (8 ビット)、アナログ (0 ~ 1 V) またはデジタル信号 (16 ビット) として出力する。ゲートは、画像信号の積分区間を決めるもので、モニター画面上では走査線と垂直な帯状の領域 (ウィンドーと呼ぶ) となり、その両端をモニター画面上の 2 本の垂直な白線で表示する。

ウィンドーは、一枚のテレビ画面の中に最大 2 個まで独立に設定でき、各々の位置と幅はストリーク像を観察しながら任意に設定できる。微弱なストリーク像を高い S/N で計測するためには、ウィンドー幅を広げた方が有利である。

モニター画面上のグラフ表示 (8 ビット) はゲインと零レベル (オフセット) を任意に選ぶことができる。また、カーソル機能を利用してグラフの値を読取ることもできる。いま、ストリーク像の時間軸を目盛る走査線をチャンネル (ch) と呼ぶことにすれば、グラフのフルスケールは時間軸が 256 ch、強度が 256 カウントとなる。

また、極めて微弱であるが繰返し可能な現象を高い S/N で計測するためには、繰返すストリーク像を加算して平均値を求めるイベント加算 (1 ~ 256 イベント) モードが利用できる。この他、SIT 管ターゲットに蓄積された全電荷を読出すための残像加算 (1 ~ 16 フレーム)、システム全体の暗電流や漏洩光などのダークを補正するモードもある。

さらに、アナライザーには、通常の画像 (例えばフィルム画像など) を解析するためのフリーランモードがあり、フレーム積算 (1 ~ 256 フレーム) もできる。

(3) マルチウィンドー TA²⁵⁾

フレームメモリー (画像メモリー) を付加したアナライザーで、単発ストリーク像などの二次元的解析を目的として開発された。フレームメモリーでは、単発ストリーク像のフリーズ、1024 イベントまでの加算などが行なえる。

Fig. 4 はその系統図を示す。画像信号の A/D

Fig. 4. Block diagram of the Multiwindow TA employing a digital video frame memory.

変換は、512 (水平) × 256 (垂直) 画素について 8 ビットで行なう。フレームメモリーは 64 (水平) × 256 (垂直) × 12 ビットであり、水平方向 8 画素分のデータの合計のうち 10 ビットをフレームメモリーの 1 画素分のデータとして記憶する (Fig. 5 参照)。解析ウィンドーはフレームメモリー上で最大 64 個まで任意に選べる。

このアナライザーでは、ストリーク像 (単発または加算) をフレームメモリーに記憶した後で、各種の解析パラメーターを選択することができ、二次元解析も容易にできる。いま、フレームメモリーの水平方向の分割枠をウィンドー (w) と呼ぶことにすれば、256 ch (時間軸) × 64 w (空間軸) × 12 bit (強度) の解析ができる。また、SIT カメラを 90° 回転すれば、時間軸が 64 w、空間軸が 256 ch となる。

2.3 シンクロスキャンストリークカメラ

Fig. 6 はシンクロスキャンストリークカメラの動作原理を示す。ストリークカメラの掃引は高繰返しレーザーパルス光と同期したサイン波であり、周波数は 80 ~ 160 MHz である。入射光と掃引波形が同期していれば、ストリーク像は

Fig. 5. Schematic diagram showing principles of integration in the preprocessing circuit.

Fig. 6. Schematic diagram of the synchroscan streak camera.

毎回蛍光面上の同じ位置に生じることとなり、蛍光面上でストリーク像が積算されて高いS/Nを得ることができる。

最近筆者らが開発したシンクロスキャンストリークカメラでは、時間分解能 9 ps が得られている²⁶⁾。ストリーク管は新規開発した MCP 内蔵型のものであり、ストリーク像解析装置と結合して使用している。Dye レーザーを用いた測定では、Dye レーザーを含めた系のドリフトやジッターが時間分解能を制限する。これは、観測時間の長さにも関係し、筆者らの実験では、ゲート時間の 1 μ s のとき 10 ps の時間分解能が得られている²⁶⁾が、Dye レーザーの特性も含めて今後さらに検討、改良すべき問題であろう。

2.4 分光感度特性

ストリークカメラの分光感度特性は、入力光学系とストリーク管によって支配される。最も一般的なストリーク管は、UV ガラス窓と S20

光電面の組合せであり、200~850 nm に感度がある。しかし、一般的な入力光学系は 400 nm 以上の光しか透過せず、200~400 nm 領域での測定には UV 入力光学系を用いる必要がある。

真空紫外域では、MgF₂ 窓と CsTe または CsI 光電面、X線域では Be 窓と Au の光電面が用いられる。また、近赤外域では AgOCs (S-1) 光電面が用いられる。

2.5 システムの主要性能

各種のストリークカメラの主要性能を Table 1 にまとめて示す。これらの性能は全て、ストリーク像解析装置と一体化したシステムで得られた値である。

3. ストリークカメラシステムの諸特性

ストリークカメラシステムで重要な特性は、時間分解能、ダイナミックレンジ、掃引速度の非直線性、トリガーディレイ、トリガージッター、検出限界などである。ここでは、これらについて、実用面から検討する。

3.1 時間分解能

インパルス光入力に対するシステムの出力の半値幅で定義している¹⁶⁾。実際に時間分解能を測定するときは、充分短い光パルスを入射し、システムの出力の半値幅、すなわちアナライザーを介して得られるモニター画面上のグラフの半値幅から求めている。

Table 1. Performances of Streak Cameras

Type No. Items	C1370 Ultrafast	C979		C1155-01 Slow, Gating	C1587X. Synchroscan
		M1284	M1130		
Time Resolution	2ps	10ps	100ps	1ns	10ps
Streak Time per Full Screen (15mm)	0.38 ~ 1ns	1 ~ 10ns	10 ~ 100ns	100ns ~ 1ms	1ns at 80 ~ 160 MHz
Trigger Jitter	< ±20ps	< ±20ps	< Time Resolution		< 10ps
Trigger Delay	12 ~ 14ns	16 ~ 22ns	24 ~ 50ns	70ns*	-
Dynamic Range	> 1 : 30	> 1 : 100			≈ 1 : 1000
Minimum Detectability	Several Photoelectrons/Pulse at room temperature				
Spectral Response	200 ~ 850nm, SI, Xray, VUV				

* In this case, Trigger Delay is defined by time difference between trigger signal and incident light, when streak image is obtained at the top of the screen.

いま、システムの時間分解能を T_s 、入射パルスの半値幅を T_p とし、それぞれガウス形と仮定すれば、システムの出力（観測値）の半値幅 T は、

$$T = (T_s^2 + T_p^2)^{1/2} \quad (1)$$

で表わせる¹⁶⁾。したがって、半値幅 T_p が既知であるパルス光に対する観測値 T から T_s を知ることができる。また、このようにして T_s を求めておけば、 $T_p \geq T_s$ なる任意のパルス光に対して、その半値幅を知ることができる。

パルス光源としては、時間分解能 2 ps 程度ではパッシブ型 Dye レーザー、10 ps 程度ではアクティブ型 Dye レーザーや Nd ガラスレーザー、100 ps 程度では半導体レーザーによるパルス光源²⁷⁾ や YAG レーザーが用いられている。

3.2 ダイナミックレンジ

ストリークカメラに入射するパルス光のパルス幅を一定として、その強度を増してゆくと、観測されるパルス幅が広がってゆくという、時間分解能の強度依存性が1976年に W. Friedman らによって報告された²⁸⁾。以来、ストリークカメラで精度よく測定できる光強度範囲、すなわちダイナミックレンジについて多々議論された。

Fig. 7. Plot of intensity dependent pulse width and concept of traditional dynamic range measurement.

Fig. 7 は、この時間分解能の強度依存性と従来のダイナミックレンジの考え方を示したものである。従来は、記録媒体としてフィルムを使用することが多く、強度依存性によってパ

ルス幅が20%広がる点とフィルムのフォグ（かぶり）レベルに相当する点の強度比でダイナミックレンジを定義している²⁹⁾。また、読出しに OMA (Optical Multichannel Analyzer) を使用した報告³⁰⁾ もあるが、下限として OMA のノイズレベルを用いている。

しかし、この定義では、システムのゲインが充分大きく、単一光電子の検出が可能な場合には、単一光電子に対応する系の出力がフォグレベルやノイズレベルより充分大きくなり、もはや意味を持たない。また、実用面から考えても、一枚または単一のストリーク像で実測可能な最強パルスと最弱パルスの比を知った方がよい。

以上のことから、我々は、従来のダイナミックレンジの考え方 (Fig. 7) の中で下限として用いているノイズレベルの代りに、実測される最弱パルスを用いることにしている¹⁶⁾。

Fig. 8. Schematic diagram of the dynamic measurement.

Fig. 8 にピコ秒パルスを用いてダイナミックレンジを測定する系の例を示す。まず、単一パルス光を2枚の半透明ミラーで構成されるエタロンに入射する。すると、図中に示すように、一定の減衰率と一定の時間間隔を有するパルス列が得られる。各々の半透明ミラーは、エタロンを構成する内側のみ反射膜が塗付されており各々の反射率を、 R_1 、 R_2 、透過率を T_1 、 T_2 としたとき、 k 番目のパルス光の強度 I_k は、

$$I_k = I_1 (R_1 R_2)^{k-1} \quad (2)$$

$$\text{ただし、} I_1 = T_1 T_2 I_0$$

となる。ここで、 I_0 は入射パルス光の強度であ

る。また、パルス光の間隔 Δt は、エタロンの間隔を d としたとき、空気中の光速 c を用いて

$$\Delta t = 2d/c \quad (3)$$

となる。

Fig. 9. One frame streak image of a pulse train, having a constant reduction ratio of 0.75 and a time separation of 30 ps (left), and corresponding intensity profile (right).

Fig. 9は、このパルス光列をストリークカメラシステムで測定した結果を示す。左側のモニター画面はストリーク像解析装置で得られたストリーク像を1フレームメモリ（アナログ式）に記憶して再生したもので、時間軸はモニター画面の縦軸方向、モニター画面上の2本の垂直な白線はウィンドウの両端を示している。右側のモニター画面は、アナライザーで解析した結果（強度の時間的変化）をグラフ表示したものである。

半透明ミラーの反射率は $R_1 R_2 = 0.75$ 、ストリークカメラの入射スリットの大きさは $30 \mu\text{m} \times \text{約} 1 \text{ mm}$ 、ストリーク速度は約 15 mm/ns 、パルス間隔は $\Delta t = 30 \text{ ps}$ である。アナライザーでグラフの値を読み取り（ゲイン可変）データを解析すると、時間分解能 10 ps でかつ入出力特性が直線関係にある最強パルスと最弱パルスの比は $1 : 100$ 以上の範囲におよぶことがわかる¹⁴⁾。

Fig. 10は、 $4 \pm 1.5 \text{ ps}$ FWHMのパルス光を時間分解能 8 ps のストリークカメラシステムで観測した結果である。図から、時間分解能の強度依存性、および $1 : 270$ 程度のダイナミックレンジが確認できる。

Fig. 11 は、各種のストリークカメラの時間

Fig. 10. Plot of intensity dependent pulse width measured by the 8 picosecond streak camera, showing the dynamic range of better than $1:270$.

Fig. 11. Dynamic range of several streak camera systems. Data obtained by Bradley et al are converted to values defined in the text by authors.

分解能とダイナミックレンジの関係をまとめたものである。横軸は観測値の半値幅である。この図から、時間分解能を向上してゆくとダイナミックレンジが小さくなってゆくことがわかる。これらのシステムでは、検出限界（3.6節参照）が単一光電子領域にあるため、更に大きなダイナミックレンジを得るには上限を大きくする工夫が必要である。なお、この上限は、ストリーク管内の空間電荷密度が支配的であると考えられている。

3.3 掃引速度の非直線性

掃引速度の非直線性は、時間軸の歪みだけでなく、強度の測定値にも歪を生じる。つまり、一定強度のパルス光入射でも、掃引が遅くなれば時間軸が縮み、この結果強度が大きくなる。

掃引速度の非直線性を測定するには、前節と同様にエタロンで得られる等間隔のパルス光列を利用する。例えば、前出の Fig. 9 の場合、各々のパルスのピーク位置の間隔 Δx をアナライザで読取ると、 $\Delta x = 12.1 \pm 0.7 \text{ ch}$ となる。 Δx に対応する時間差は 30 ps であるから、掃引速度 v は、

$$\Delta x / \Delta t \approx 0.40 \pm 0.02 \text{ (ch/ps)} \quad (4)$$

となり、非直線性は約 6 % となる¹⁴⁾。

実際には、減衰率が小さいエタロンを用いた方が便利である。Fig. 12 は、2 ピコ秒ストリークカメラの最速レンジのデータであり、数枚のストリーク像から得たデータを同一のグラフ上にプロットしてある。この場合、非直線性は 5 % 以下である²¹⁾。

比較的遅い現象を測定する時間分解能 1 ns 以上のストリークカメラでは、掃引回路にフィードバック型の回路を使用しているため、掃引速度の非直線は 1 % 以下と極めて小さく、むしろ S I T カメラの画像歪が問題となってくる²²⁾。

なお、掃引速度の非直線性が問題となる時には、測定の直前に上述のようなエタロンによる測定を行ない、このデータをホストコンピュー

Fig. 12. Linearity of the streak speed at 40 mm/ns (Time resolution of this sweep range is 2 ps)

タに転送して記憶させ、自動的に非直線性を補正する方法もある。

3.4 トリガーディレイ

ストリークカメラの蛍光面の中央にストリーク像を得るためには、入射光がスリットに到着する時刻より、トリガー信号を先行させておく必要がある。このトリガーディレイの代表例を Table 2 に示す。実際の測定では、トリガー信号発生用のパルス光が約 25 ns 先行するように、被測定光に光路差を設ける。

3.5 トリガージッター

レーザー励起による蛍光などの微弱光を高い

Table 2. Typical Triggering Delay Time of Streak Cameras

C1370 Ultrafast		
Streak Speed	Streak Time	Trigger Delay
40mm/ns	375ps/15mm	12 ~ 25ns
30	500	
15	1000	
C979 with M1284		
15mm/ns	1ns/15mm	16ns
7.5	2	17
3	5	19
1.5	10	22
C979 with M1130		
1.5mm/ns	10ns/15mm	24ns
0.75	20	26
0.3	50	34
0.15	100	50

C1155-01 Gating Streak		
Streak Speed	Streak Time	Trigger Delay
150mm/ μ s	0.1 μ s/15mm	70ns + $\frac{T_w}{2}$ Tw : Streak Time
75	0.2	
30	0.5	
15	1	
7.5	2	
3	5	
1.5	10	
750mm/ms	20	
300	50	
150	100	
75	200	
30	500	
15	1000	

S/Nで測定するには、現象を繰返して各々のストリーク像を加算（イベント加算）して平均値を求めるなどの処理が必要となる。このとき、蛍光面上のストリーク像の位置が毎回少しずつずれるというトリガージッターがあると、加算するストリーク像の位置がずれることになり、トリガージッターが系の時間分解能を制限することとなる。

トリガージッターの分布をガウス形、その半値幅を T_j とすれば、半値幅 T_p のパルス光をイベント加算モードで充分大きなイベント数だけ加算したとき得られる観測波形の半値幅 T_o は、

$$T_o = (T_s^2 + T_p^2 + T_j^2)^{1/2} \quad (5)$$

となる。また、トリガージッター T_j は、

$$T_j = (T_o^2 - T_s^2 - T_p^2)^{1/2} \quad (6)$$

となり、既知の T_s 、 T_p から求まる。

Fig. 13は、レーザーダイオードパルス発生器 (HTV-C1308)²⁷⁾ で得られる半値幅44ps、波長800nmの単一パルス光を用いて、トリガージッターを測定した結果である。アナライザのイベント加算を100に設定して100個のパルスを加算したものと単一パルスの半値幅の平均値を比較した。この場合、トリガージッターは、 $T_j < \pm 15$ psである¹⁶⁾。

Fig. 13. Measurement of triggering jitter. Intensity profiles obtained under one streak (a) and 100 streaks integrated on the analyzer (b) were compared.

当然のことながら、掃引速度の遅いストリークカメラでは、ジッターは時間分解能以下となつて無視できる。なお、トリガージッターをホストコンピュータで補正する方法については4.2節で述べる。

3.6 検出限界

実測値に基づくゲインに関する各部のパラメータの代表例をTable 3に示す。Fig. 14は、これらの値から求めた各部のキャリア（光子または電子）数を示す¹⁵⁾。スリット面からMCP入力面まではキャリア数が減少し、MCP入力部で最少となる。MCPに入射する電子（有効電子）1個に対して、SIT管ターゲット上には 8.5×10^5 個（平均）の電子が蓄積される。また、アナライザでは、MCPに入射する1個の電子に対応するカウント数が3.5（読出ゲイン4のとき）となるように設計してある。

このように、ストリークカメラシステムは、単一光電子の検出に充分なゲインを有している

Table 3. Standard Value of Parameters Affecting System Gain

Parameter	Symbol	Gain	Gain of the Streak Camera ≈ 140 $V_{MCP} = 800$ V
Input Optics	T_{i0}	0.74	
Streak Tube		(9×10^3)	
Photocathode	QE	0.1	
Mesh	T_M	0.6	
OAR of the MCP	T_{CP}	0.6	$V_{MCP} = 800$ V
Gain of the MCP	G_{CP}	5×10^3	
Phosphor	I^*	50	
Output Optics	T_{o0}	2.1×10^{-2}	$V_i = 9$ KV
SIT		(1.6×10^2)	
Photocathode	QEs	0.1	
Target	G_s	1.6×10^5

Fig. 14. Number of carriers in the streak camera system.

が、実際の測定ではストリーク管光電面やMCPなどで発生するノイズが検出限界を制限する。

常温における検出限界の実測値は、光電面から出る電子の密度で約400電子/mm²であり、30 $\mu\text{m} \times 1\text{mm}$ のスリットを使用したとき、12光電子となる。このとき、MCPへの有効入射電子数は約4個となる¹⁶⁾。

なお、ストリークカメラ全体を0℃以下まで冷却すると、ストリーク像上のダークノイズがほとんど観測されなくなる。この状態における検出限界は実測していないが、少なくともS/Nを向上する点では有効である。

4. 計測手法

ストリークカメラは、当初、パルスレーザーの診断などのような波形測定に利用されていたが、最近では、時間分解分光などの二次元的解析に利用されるようになり、益々その応用分野が広がっている。ここでは、ストリークカメラを応用した計測について、基本的な手法とその限界などについて述べる。

4.1 光パルス波形の測定

Fig. 15はレーザーパルス波形測定のための標準的なシステム構成を示す。トリガー信号は、被測定光の一部をビームスプリッターで分岐し、PINフォトダイオードで受光して得る。被測定光側には、トリガーディレイに相当する長さの光路(約9 m)を設け、トリガー信号のタイミングはディレイユニットを利用して電氣的に

Fig. 15. Block diagram showing the typical arrangement for measurement of pulse shape.

調整する。

この構成によって、被測定光入射から約1秒後にパルス波形がモニター画面上にグラフ表示される。したがって、パルス波形のほぼリアルタイムな測定とともに、レーザーの調整なども容易に行なえる。

光学系のアライメント調整はストリークカメラのフォーカスモード(掃引停止)を利用し、テレビモニター画面を見ながら行なう。また、ストリーク像の解析領域(ウインドー)は、モニター画面上のストリーク像を観察しながら設定する。この際、光路差を利用して作ったダブルパルスを入力すれば、ストリーク像自体の中に時間軸情報が入り、精度と信頼度の高い測定ができる。(Fig. 16)

Fig. 16. Double pulse method improving accuracy and reliability of the measurement.

ストリークカメラの掃引の最大繰返し周波数は1 KHz程度であり、数百Hz程度で繰返す入射パルス光に対してストリーク像は毎回得られるがアナライザーで約1秒に1回の割合で自動的に抜取られて解析される。また、ストリークカメラの単掃引モードを利用すれば、一度掃引するとリセット信号が入るまで掃引を停止する。したがって、アナライザーでの解析終了後リセット信号を発生し、これをストリークカメラに供給するようにすれば、確実なデータ収集が行なえる。

一方、レーザーダイオード(以下LD)のように数100MHz~数GHzで連続発振するようなパルス光を測定するには、入射光を切出すことが必要となる。これは、ストリークカメラの掃引のフライバック(もどり)期間中の入射光が観測すべきストリーク像と重なってしまうことを避けるために必要となる。この場合、通常は

400Hz 程度の回転ミラーで光を切り出す方法^{31),32)}が便利である。この方法により、800~850nm のLDの場合、ピーク出力1mW程度のもので測定可能である。

4.2 蛍光寿命の測定

分子や分子集合体が励起状態から緩和する過程に生じる光現象を測定することは、その構造の解明に極めて有効である^{33),34)}。ストリークカメラを利用したレーザー励起蛍光測定の基本構成は、ほぼFig. 15と同じであり、ストリークカメラの直前に試料を置く。

この場合、蛍光を効率よくストリークカメラに入射することが重要となり、集光光学系を設けた方がよい。このため、ストリークカメラの入力光学系の先端部には、ネジ込み式スクリーマウントが設けてあり、K-3リング(ニコン)を介してレンズを装着することができる。また、UV入力光学系には専用の集光レンズが用意されている。

測定に関する一般的な事項は前節と同じであるが、S/Nを上げるために、励起光と蛍光を金属干渉フィルターなどで分離し、蛍光のみをストリークカメラに入射する工夫が必要である。また、極めて微弱な蛍光を高いS/Nで測定するためには、現象を繰返し起させ、これらを加算して平均を取るイベント加算が有効となる。

イベント加算は、アナライザーで256イベント(マルチウインドーTAでは1024回)まで可能であり、繰返し周波数は1KHz程度まで上げられる。ただし、高時間分解能を必要とする測定では、ストリークカメラのトリガー jitter が系の時間分解能を制限する。これは、トリガー信号発生用PINフォトダイオードに入射するパルス光の強度変動に大きく依存するが、このパルス光強度の変動を小さくすれば ± 20 ps程度以下とすることができる。

さらに、高い時間分解能を必要とする測定では、アナライザーの出力をホストコンピュータに転送し、コンピュータでジッター、すなわちストリーク像の時間軸のずれを補正して加算する。この場合、ストリークカメラシステム

の最大繰返し周波数は1Hz程度となる。

時間軸のずれ(ジッター)の検出には、Fig. 17に示すように、ストリーク像の中に参照光を入れておき、このパルスの位置を基準点として利用する方法が有効である。

Fig. 17. Correction of triggering jitter using a calibrating pulse arriving at the camera at an earlier time.

4.3 時間分解分光測定

ストリーク像は本来、2次元像であり、時間軸以外にもう一つの次元を有する。ストリーク像が2次元像であることを積極的に利用すれば様々な計測が可能となるが、これは換言すれば多チャンネル(約100ch)同時の時間分解測定となる。ストリークカメラによる時間分解分光測定は、分光器で分光して得たスペクトルをストリークカメラのスリットに入射するもので、最近特にその応用が注目されている。

(1) 測定系

時間分解分光測定系の構成をFig. 18に示す。分光器は、スペクトル結像面が平面となるものが適しており、例えばUSF 200(Jovine Yvon), CT-25(日本分光)などがある。スペクトラムは波長軸がスリットの長さ方向と平行になるように入射する。

ストリーク管蛍光面上のストリーク像は、縦軸が時間、横軸が波長となるが、SITカメラ

Fig. 18. Block diagram showing the arrangement for time resolved spectroscopy.

Fig. 19. Analyzing techniques of time resolved spectroscopic image by the Analyzer(a) and the Multiwindow TA (b).

を90°回転することができ、Fig. 19に示すような2種の解析ができる。図中(a)の場合には、256ch(時間)×2w(波長)または2w(時間)×256ch(波長)の解析ができ、ウィンドウの位置と幅が全画面の1/256の精度で任意に設定できる。マルチウィンドウTAを利用する(b)の場合には、256ch(時間)×64w(波長)または64w(時間)×256ch(波長)の解析となり、しかも、単発現象も解析できる。

スペクトルは、観測対象となる全域を入射スリットの有効長(C979, C1155-01では約3mm, C1370では約23mm, C1587Xでは約14mm)の中に入れる必要がある。このスペクトル幅を $\Delta\lambda$ としたとき、アナライザーの波長分解能は $\Delta\lambda/64$ 程度となる。高い時間分解能($\approx 10\text{ps}$)と高い波長分解能($\approx 0.1\text{nm}$)を同時に実現するためには、分光器の中で生じる時間広がり(4.6節)を考慮する必要がある。

(2) 測定例

LDによる短パルス光($\approx 100\text{ps}$ FWHM)の時間分解分光測定系をFig. 20に示す。分光器は、焦点距離500mm、波長分散度約1.7nm/mm、分解能約0.05nm、後述(4.6節)する分光器の時間広がり約40psである。Fig. 21は、ストリーク像とウィンドウ(w)内の強度分布のグラフ(

Fig. 20. Experimental setup of time resolved spectroscopy of subnanosecond LD pulse.

Fig. 21. Time resolved spectroscopic image of 100 ps (FWHM) pulses from LD and corresponding spectrum (300 shots are superimposed).

両方とも約300ショット重畳)を示す。LDは緩和振動をしており、第1パルス内のチャージング、第1パルスと第2パルス間でのスペクトルの相異などがよくわかる。ウィンドウの位置を変化させて、各時間領域におけるスペクトラムを得、これらを3次的に表示したものがFig. 22である¹⁹⁾。

また、同様の実験を、マルチウィンドウTAを用いて行なうこともできる。この場合には、単一現象の解析が可能となる。Fig. 23はLDからの単一パルス光($\approx 120\text{ps}$ FWHM)の時間分解分光例²⁵⁾である。

Fig. 22. Spectral distributions obtained from a streak image of Fig. 21.

Fig. 23. Time resolved spectroscopic image of single, 120 ps (FWHM) pulse from LD by means of Multiwindow TA.

もっと一般的な応用分野は、化学や生化学分野にある。これらについては参考文献を参照してほしい。

4.4 空間・時間分解測定

前節の例ではストリークカメラの直前に分光系を配したが、この代りに結像系を設ければ空間・時間分解測定ができる。この場合、結像系は対象物体の像をストリークカメラのスリット

面に結像する。したがって、対象物体上の直線に沿った各位置の光強度の時間的変化が測定できることとなる。

Fig. 24. Schematic diagram of the arrangement for measuring pellet implosion by a X-ray streak camera³³⁾.

Fig. 24は、レーザー核融合における爆縮を測定する系の構成図である³³⁾。X線領域では通常のレンズが使えないため、ピンホールレンズを用いている。またストリークカメラの光入射部は真空チャンバー内に入れる。Fig. 25はこのようなX線用ストリークカメラの例を示す。

Fig. 25. General view of the X-ray streak camera.

この他、比較的低速のストリークカメラでは放電現象の解析、衝撃波の解析などの分野で、この種の空間・時間分解測定を行なっている。

また、爆発などの解析を行なう場合には、種々の方向に出る光を各々の光ファイバーで受光して伝送し、ストリークカメラの直前で一列に並べてスリットに入射する (Fig. 26)。この方法も一種の空間・時間分解測定であり、特にストリークカメラを被測定対象の近くに設置できないようなときや多チャンネル同時測定が必要な

Fig. 26. Schematic diagram showing the method of Multichannel measurement using a streak camera.

とき有効となる。なお、高い時間分解能を必要とする測定では、光ファイバー自体の時間広がり(4.6節)が問題となることもある。

4.5 吸収測定

吸収測定の構成を Fig. 27 に示す。この場合、一般に用いられる参照光はフラッシュランプの光などであり、測定対象時間領域外の参照光の取扱いが問題となる。つまり、ストリークカメラは光電変換原理を応用しており、光が光電面

Fig. 27. Arrangement of absorption measurement.

Fig. 28. Diagram showing the concept of absorption measurement and electrical gating.

に入射している間は常に光電子を発生する。しかし、この光電子は管の中で測定対象期間に種々の悪影響を与える (Fig. 28 参照)。

例えば、参照光のパルス幅が $1\ \mu\text{s}$ 、測定対象期間を $1\ \text{ns}$ (このとき、時間分解能 $\approx 10\text{ps}$) とした場合、参照光の影響、すなわちノイズは $1\ \mu\text{s}$ 間の積分値として測定値に含まれてくる。この値は測定時間とノイズの影響する時間の比 $1:1000$ を考えると、無視できない。

ストリーク管には、コーン電極が入っており、掃引開始前と終了後には光電面から出る光電子が MCP および蛍光面、すなわちストリーク像の中に入らないよう工夫されている。しかし、このときの消光比 (on-off 比) は $1:1000$ 程度である。したがって、高精度の吸収測定を行なには、観測期間外に生じる光電子を効率よく遮断するゲートが必要となる。

ゲート付ストリークカメラは、このゲート機能を有するストリークカメラである²²⁾。光電子のゲートは光電面・メッシュ間と MCP の両者で行なっており、消光比は $1:10^4$ 以上である。

Fig. 29. Streak image of continuously pulse-driven diode laser at 100 MHz and corresponding intensity profile, obtained by the gating streak camera and video readout without any optical chopper.

Fig. 29 は、ゲート付ストリークカメラで連続発振 (100 MHz) LD のパルス光を観測した例である²²⁾。この方式によれば、4.1 節の回転ミラーはもはや必要でないことがわかる。このゲート機能は、現時点では時間分解能 $1\ \text{ns}$ 以

上の低速型ストリークカメラに実装されている (Table 1 参照) が、今後は全てのストリークカメラに必要となるものと思われる。

4.6 光学デバイスにおける時間広がり

光ファイバーや分光器の中では時間広がりが生じ、ストリークカメラを用いた時間分解測定を行なう際、充分考慮する必要がある。ここではこれらについて簡単に述べる。

(1) サンプルセルの大きさ

蛍光寿命測定に使用するサンプルセルの大きさは10mm程度である。しかし、この長さは、30 ps 程度の時間差を生じることになる。

(2) 光ファイバーの時間広がり

ピコ秒レーザーパルス光とストリークカメラを用いた筆者らの実験では各種の光ファイバーに対して、Table 4 に示すような時間広がりが見測された。レーザーパルスの波長は 530 nm である。

Table 4. Temporal Dispersion in Optical Fibers at 530 nm Light

Items Type	Diameter (mmφ)	Length (m)	Temporal Dispersion (ps) at 530nm
Light Pipe	5	1	16
Fiber Cable	2	0.95	4
Single Fiber	≈ 0.1	1	3.5

(3) 分光器の時間広がり

回析格子を用いた分光器では必ず時間広がりを生じる。回析格子の各種パラメーターと時間広がり $\Delta \tau$ の関係は、

$$\left. \begin{aligned} \Delta \tau &= \frac{\lambda}{c} \cdot \frac{kw}{d} \\ &= \frac{\lambda}{c} \cdot R \\ &= 1/\Delta \nu \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

但し、 λ : 入射光の波長

c : 空気中の光速

k : 回析の次数

w : 回析格子の全幅

d : 回析格子の溝間隔

R : 波長分解能

$\Delta \nu$: 周波数広がり

となる³⁴⁾。

したがって、波長分解能を上げれば、時間広がりが大きくなる。この関係は筆者らの実験でもほぼ(7)式に合致する結果が得られており、別の機会に詳しく報告したい。

5. おわりに

以上、ピコ秒ストリークカメラシステムとその応用について総合的に述べてきた。このようなストリークカメラの実際の応用例は極めて多岐に渡っており、多数の貴重な研究の報告がある。主な分野は、レーザー診断、LDのパルス波形測定、レーザーフォトリシス、ラジオフォトリシス、非線形光学等々である。筆者らは、ストリークカメラはともかく、これらの専門的な応用分野については門外漢である。実際の応用は文献を参照していただくこととし、付録として応用分野別にまとめておく。見落した点などは御容赦下さるようお願いしたい。

参 考 文 献

- 1) D. J. Bradley and G. H. C. New: Ultrashort Pulse Measurements, Proc. IEEE, **62**, 3 (1974) 313-345.
- 2) 黒田: ピコ秒パルスレーザーとその物性研究への応用, 応用物理, **44**, 9 (1975) 934-954.
- 3) S. L. Shapiro, ed: Ultrashort Light pulses, (Springer-verlag, Berlin, 1977).
- 4) 日本化学会編: ナノ, ピコ秒の化学 (学会出版センター, 化学総説, No.24, 1979).
- 5) 小林: ピコ秒分光法, 化学と工業, **34**, 6, (1981) 74-77.
- 6) M. A. Duguay and J. W. Hansen: An Ultrafast Light Gate, Appl. Phys. Lett., **156**, (1969) 192-194.
- 7) M. R. Topp, P. M. Rentzepis and R. P. Jones: Time-Resolved Absorption Spectroscopy in the 10^{-12} -sec Range, J. Appl. Phys. **42**, 9, (1971) 3415-3419.
- 8) D. J. Bradley, B. Liddy and W. E. Sleat: Direct Linear Measurement of Ultrashort Light Pulse with a Picosecond Streak Camera, Optics, Communications, **2**, 8, (1971) 391-395.
- 9) D. J. Bradley and W. Sibbett: Subpicosecond Chronoscopy, Appl. Phys. Lett., **27**, 7 (1975) 382-384.

- 10) 木下, 鈴木, 松岡: チャンネルプレートを内蔵したストリーク管, テレビ全大予, 3-2 (1976) 37-38.
- 11) 土屋, 犬塚, 鈴木: 超高速ストリークカメラ, テレビ全大予, 11-18 (1977) 251-252.
- 12) 犬塚, 神谷, 土屋: ストリーク像解析装置, テレビ全大予, 11-19 (1977) 253-254.
- 13) E. Inuzuka, Y. Tsuchiya and K. Kamiya: Direct Readout System for Streak Cameras, in Proc. 13th International Congress on High Speed Photography and Photonics, SPIE Vol. 189 (1978) 586-589.
- 14) Y. Tsuchiya, E. Inuzuka, Y. Suzuki and W. Yu: Ultrafast Streak Camera, *ibid* (1978) 517-520.
- 15) 土屋, 犬塚, 鈴木: ピコ秒ストリークカメラシステムの設計, テレビ誌, 34, 11 (1980) 1006-1011.
- 16) 土屋, 犬塚: ピコ秒ストリークカメラシステムの諸特性, テレビ誌, 35, 3 (1981) 208-214.
- 17) L. W. Coleman: Ultrafast x-ray Diagnostics for Laser Fusion Experiments, SPIE Vol. 94 (1976) 19-29.
- 18) H. J. Caulfield: Remote Profilemetry, *ibid* (1976) 30-33.
- 19) 堀口, 犬塚, 土屋: ストリークカメラによる超高速時間分解分光, テレビ全大予, 15-11 (1979) 409-410.
- 20) E. Inuzuka and Y. Tsuchiya: Development of a New 2 picosecond Streak Camera, 14th International Congress on High Speed Photography and Photonics, Moscow (1980).
- 21) 三輪, 犬塚, 土屋: 超高速2ピコ秒ストリークカメラの諸特性, テレビ全大, 17-1 (1981) 401-402.
- 22) 竹島, 犬塚, 小石, 土屋: ゲート付ストリークカメラの開発, テレビ大全, 17-2 (1981) 403-404.
- 23) M. C. Adams, W. Sibbett and D. J. Bradley: Linear Picosecond Electron-Optical Chronoscopy at a Repetition Rate of 140 MHz, Optics Communications, 26, 2 (1978) 273-276. 2 (19
- 24) 浜松テレビ社カタログ (1981).
- 25) Y. Tsuchiya, C. Horiguchi, H. Iida and K. Kamiya: Two-dimensional Direct Readout System for Streak Cameras, 14th International Congress on High Speed Photography and Photonics, Moscow (1980).
- 26) To be published.
- 27) Y. Tsuchiya, A. Takeshima and M. Hosoda: Stable Ultrashort Laser Diode Pulse Generator, Rev. Sci. Instrum., 52, 4 (1981) 579-581.
- 28) W. Friedman, S. Jackel, W. Seka and J. Zimmerman: Dynamic Range and Spatial Resolution of Picosecond Streak Cameras, SPIE Vol. 97 (1976) 544-548.
- 29) D. J. Bradley, S. F. Bryant, J. R. Taylor and W. Sibbett: Intensity Dependent Time-Resolution and Dynamic Range of Photochron Picosecond Streak-Cameras, Rev. Sci. Instrum., 49, 2 (1978) 215-219.
- 30) D. J. Bradley, S. F. Bryant, and W. Sibbett: Intensity Dependent Time Resolution and Dynamic Range of Photochron Picosecond Streak Cameras II. Linear Photoelectric Recording, Rev. Sci. Instrum., 51, 6 (1980) 824-831.
- 31) M. Izutsu, H. Haga and T. Sueta: Semiconductor Laser Output Modulated in GHz Frequency Region Observed by Image Tube Streak Camera, Electronics Lett. 16, 14 (1980) 531-532.
- 32) 伊藤, 村田, 横山, 稲場: 高周波変調にもとづく AlGaAs 半導体レーザーからの超短光パルス発生, 応用物理, 50, 1 (1981) 18-28.
- 33) T. Sasaki, H. Azechi, K. Aono, T. Yamanaka, K. Hosokawa, K. Nishihara and C. Yamanaka: Laser Fusion Experiment on Pellet Implosion Observed by X-ray Streak Camera, in Proc. 13th International Congress on High Speed Photography and Photonics, SPIE Vol. 189, (1978) 385-388.
- 34) N. H. Schiller and R. R. Alfano: Picosecond Characteristics of a Spectrograph Measured by a Streak Camera / video Readout system, Optics Communications, 35, 3 (1980) 451-454.

付録 ストリークカメラの応用例

A General

- 1) R. Hochstrasser, W. Kaiser and C. V. Shank ed.: Picosecond Phenomena II (Springer-Verlag, Berlin, 1980).

B Diode Laser

- 1) H. Ito, H. Yokoyama, S. Murata and H. Inaba: Picosecond Optical Pulse Generation from an R. F. Modulated AlGaAs D. H. Diode Laser, Electronics Letters, 15, 23 (1979) 738-740.
- 2) M. Izutsu, H. Haga and T. Sueta: Semiconductor Laser Output Modulated in GHz Frequency Region Observed by Image Tube Streak Camera, Electronics Letters, 16, 14 (1980) 531-532.
- 3) H. Ito, H. Yokoyama and H. Inaba: Bandwidth Limited Picosecond Optical Pulse Generation from Actively Mode-Locked AlGaAs Diode Laser, Electronics Letters, 16, 16 (1980) 620-621.
- 4) 伊藤, 村田, 横山, 稲場: 高周波変調にもとづく AlGaAs 半導体レーザーからの超短光パルス発生, 応用物理, 50, 1 (1981) 18-28.
- 5) H. Ito, N. Onodera, K. Gen-ei and H. Inaba: Self-Q-Switched Picosecond Optical Pulse Generation with Tandem-Type AlGaAs TJS Laser, Electronics Letters, 17, 1 (1981) 15-17.
- 6) D. J. Bradley, M. B. Holbrook and W. E. Sleat: Bandwidth-Limited Picosecond Pulses from an Actively Mode-Locked GaAlAs Diode Laser, IEEE J. Quantum Electronics,

QE-17, 5 (1981) 658-662.

- 7) H. Ito, H. Yokoyama, S. Murata and H. Inaba: Generation of Picosecond Optical Pulses with Highly RF Modulated AlGaAs DH Laser, *ibid* (1981) 663-670.
- 8) S. Tarucha and K. Otsuka: Responce of Semiconductor Laser to Deep Sinusoidal Injection current Modulation, *ibid* (1981) 810-816.
- 9) 横山, 多田, 伊藤, 稲場: モード同期 AlGaAs 半導体レーザーによるコヒーレント超短光パルスの発振特性, 電子通信学会論文誌, **64-C**, 8 (1981) 445-452.
- 10) 小林, 末田: 半導体レーザーのピコ秒パルス発生, 応用物理, **50**, 9 (1981) 951-959.
- 11) その他.
第40回応用物理学会, 講演会予稿集 (1980) 秋,
第28回応用物理学関係連合講演会予稿集 (1981) 春, に多数の使用例有。

C LINAC

- 1) 田畑, 田川, 勝村, 上田, 長谷川, 田中: 東大 35 MeV 電子線型加速器, 日本原子力学会誌, **20**, 7 (1978) 473-480.
- 2) S. Tagawa, Y. Katsumura and Y. Tabata: The Ultra-fast Process of Picosecond Time-Resolved Energy Transfer in Liquid Cyclohexane by Picosecond Single-Pulse Radiolysis, *Chem. Phys. Letters*, **64**, 2 (1979) 258-260.
- 3) 大脇, 川西, 菊池, 大熊, 竹田, 沢井, 山本, 木村, 山本, 桜井: 阪大 35 MeV 電子ライナックⅢ, チェレンコフ光による出力測定システム, 第26回応用物理学関係連合講演会, 30p-K-7 (1979) 春, p.19.
- 4) H. Kobayashi, T. Ueda, T. Kobayashi, S. Tagawa and Y. Tabata: Performance and Improvements of an Electron Accelerator Producing a Picosecond Single Electron Pulse, *Nuclear Instruments and Methods* **179** (1981) 223-228.

D Molecules, Dye, Lifetime

- 1) K. K. Smith, Ja-Y. Koo, G. B. Schuster and K. J. Kaufman: Unimolecular Decay of Photoexcited Tetramethyldioxetane Probed by Picosecond Spectroscopy, *Chem. Phys. Letters*, **48**, 2 (1977) 267-270.
- 2) M. Sumitani, N. Nakashima, K. Yoshihara and S. Nagakura: Temperature Dependence of Fluorescence Lifetime of Trans-Stilbene, *Chem. Phys. Letters*, **51**, 1 (1977) 183-185.
- 3) W. Yu, F. Pellegrino, M. Grant and R. R. Alfano: Subnanosecond Fluorescence Quenching of Dye Molecules in Solution, *J. Chem. Physics*, **67**, 4 (1977) 1766-1773.
- 4) J. Okada, K. Ikeda and M. Matsuoka: Streak Camera Investigations of Superradiance Depolment, *Optics Communications*, **27**, 3 (1978) 321-323.
- 5) H. J. Eichler, U. Klein and D. Langhans: Measurement of Orientational Relaxation

Times of Rhodamine 6G with Streak Camera, *Chem. Phys. Letters*, **67**, 1 (1979) 21-23.

- 6) P. P. Ho, P. Y. Lu and R. R. Alfano: Oscillatory Optically Induced Kerr Kinetics in Nitrobenzen, *Optics Communications*, **30**, 3 (1979) 426-428.
- 7) A. Namiki, N. Nakashima and K. Yoshihara: Fluorescence Quenching Due to the Electron Transfer. Indole-Chloromethanes in Rigid Ethanol Glass, *J. Chem. Physics*, **71**, 2 (1979) 925-930.
- 8) K. Yoshihara, A. Namiki, M. Sumitani and N. Nakashima: Picosecond Flash Photolysis of Cis and Trans-stilbene. Observation of an Intence Intramolecular Charge-Resonance Transition, *J. Chem. Physics*, **71**, 7 (1979) 2892-2895.
- 9) H. Sato, Y. Kusumoto, N. Nakashima and K. Yoshihara: Picosecond Study of Energy Transfer between Rhodamine 6G and 3,3'-Diethylthiacarbocyanine Iodide in the Premicellar Region: Förster Mechanism with Increased Local Concentration, *Chem. Phys. Letter*, **71**, 2 (1980) 326-329.
- 10) M. Migita, T. Okada, N. Nakashima, K. Yoshihara, Y. Sakata and S. Misumi: Picosecond Time-Resolved Fluorescence Studies of Intramolecular Heteroexcimers, *Chem. Phys. Letters*, **72**, 2 (1980) 229-232.
- 11) N. Nakashima and K. Yoshihara: Time-Resolved Measurement of Electron and Energy Transfer of Rhodamine B Monolayer on the Surface of Organic Crystals, *J. Chem. Physics*, **73**, 8 (1980) 3553-3559.
- 12) N. Nakashima, K. Yoshihara, F. Tanaka and K. Yagi: Picosecond Fluorescence Lifetime of the Goenzyme of D-Amino Acid Oxidase, *J. Biological Chemistry*, **255**, 11 (1980) 5261-5263.

E Laser, Electrooptics, Xray, Shock Wave

- 1) H. E. Bates, R. R. Alfano and N. Schiller: Picosecond Pulse Stacking in Calcite, *Applied Optics*, **18**, 7 (1979) 947-949.
- 2) 前田, 水波, 佐藤, 宮副: エキシマレーザーによる紫外ピコ秒パルスの増幅, 応用物理, **49**, 11 (1980) 1107-1116.
- 3) T. Kobayashi, H. Ideno and T. Sueta: Generation of Arbitrally Shaped Optical Pulses in the Subnanosecond to Picosecond Region Using a Fast Electrooptic Deflector, *IEEE J. Quantum Electronics*, **QE-16**, 2 (1980) 132-136.
- 4) T. Sasaki, H. Azechi, K. Aono, T. Yamanaka, K. Hosokawa, K. Nishihara and C. Yamanaka: Laser Fusion Experiment on Pellet Implosion, Observed by X-ray Streak Photography, High Speed Photography and Photonics, *SPIE Vol. 189* (1978) 385-388.

- 5) N. H. Burnet, G. Josin, B. Ahlborn and R. Evans: Generation of Shock Waves by Hot Electron Explosions Driven by a Laser, Appl. Phys. Letters, **38**, 4 (1981) 226-228.