小特集

高分解能プラズマ X 線計測の最前線

2. レーザープラズマの時空同時分解分光画像計測

2.1 画像サンプリングを用いたレーザープラズマの高時間空間分解画像計測

白 神 宏 之

(大阪大学レーザー核融合研究センター)

Time- and Space-Resolved Spectroscopic Imaging Diagnostics of Laser-Produced Plasmas
Imaging Diagnostics of Laser-Produced Plasmas with High Spatial
and Temporal Resolutions Obtained by Image-Sampling Technique

SHIRAGA Hiroyuki

Institute of Laser Engineering, Osaka University, Suita 565-0871, Japan

(Received 23 January 2003)

Abstract

We have developed a wide variety of one- (1D) and two-dimensional (2D) image sampling techniques coupled with x-ray streak cameras for ultrafast x-ray imaging. As 1D sampling, a multi-image x-ray streak camera (MIXS) was developed and successfully utilized for diagnosing the uniformity and heating process of laser-imploded core plasmas with time and space resolutions of 10 ps (equivalent to 10^{11} frames/sec) and 10 μm , respectively. Two types of spectroscopic application of the MIXS have been developed. One is multi-channel MIXS (McMIXS), which has various spectral responses for time-resolved 2D temperature measurement. The other is monochromatic MIXS (M-MIXS), useful for temperature, density, and material mixing measurement, in which monochromatic images made with Bragg crystal are coupled to MIXS. 2D image sampling on an x-ray streak camera (2D-SIXS) has also been developed. Such ultrafast x-ray imaging is of great importance for diagnosing laser-produced plasmas such as imploded core plasma of inertial confinement fusion and ultrashort-laser-irradiated plasma.

Keywords:

image sampling, x-ray streak camera, ultrafast x-ray imaging, laser fusion, laser plasma

2.1.1 はじめに

レーザー核融合における爆縮プラズマや超短パルスレーザー照射により生成したプラズマなどは、空間的に微小でしかも超高速で時間変化している。例えば爆縮プラズマでは、初期半径数百 μm のターゲットが数百 ps の時間内に爆縮し、半径数十 μm 、持続時間 100 ps 程度の

author's e-mail: shiraga@ile.osaka-u.ac.jp

爆縮コアを形成する。したがって、それらを観測するためには計測系の時間空間分解能は 10 ps および 10 μm 程度あるいはそれ以下が必用となる。高電圧ストリップラインを有するゲート型マイクロチャンネルプレートを応用した X 線フレーミングカメラ [1] はこのような目的で開発され、時間分解能 35 ps にまで到達したが、時間分解

能としては依然不十分であった。

現在の技術で単発事象に対して 10 ps 以下の時間分解能を持つ画像計測器としては、ストリークカメラが唯一の現実的装置である。既に X 線用のものでも 1 ps 以下の時間分解能が達成されている[2]。ところがストリークカメラは通常、1 次元の空間分解機能しか持たない。即ち、スリット上に結像された画像から 1 次元画像情報のみを取り出し、それと直交する方向に時間掃引するのである。したがって、1 次元的空間広がりや単なるスペクトルなどの時間変化測定には問題ないが、光源の形状や運動などの 2 次元画像を得ることは不可能である。

しかしながら、2 次元画像といえどもこれを多数の要素に分解した上でストリークカメラに結像させ、時間掃引した後にもとの 2 次元像に再構成するという手法を用いれば、2 次元画像の時間変化を記録することが可能となるのである。画像を一定の規則により分解することは即ち画像サンプリングであり、筆者らはこれを用いたストリークカメラの手法を開発してきた。

なお、プラズマの X 線計測である以上、必ずスペクトル分解あるいは少なくともスペクトル選択の機能が同時に要求される。本稿では、スペクトル分解可能な X 線計測技術としての画像サンプリング X 線ストリークカメラ法について、画像サンプリングの歴史的経緯もふまえながら最近の開発成果とこれにより得られたプラズマ計測の例について述べたい。

2.1.2 画像サンプリング

サンプリングとは、連続信号から離散的データを抽出する手法である。例えばサンプリングオシロスコープでは、時間的に変化する電圧 $V(t)$ を、時刻 $t_i = i\tau$ におけるサンプリングされたシーケンシャルなデータ V_i の配列とする。ここで τ はサンプリング間隔であり、 $i = 0, 1, \dots, k$ である。サンプリング理論によれば、 τ はもとの信号の持つ最小時間スケールあるいは観測系の時間分解能の $1/2$ 以下であればよい(すなわち、サンプリング周波数は信号の最大周波数成分の 2 倍以上が必用である)。通常のサンプリングオシロスコープでは繰り返し信号に対して十分シャープなサンプリングパルスを信号とわずかに異なる周波数で与え、サンプリング時刻をずらせてゆくことでこれを行っている。

画像サンプリングもデータの空間次元(ここでは 2 次元画像とする)を除けば基本的に同じである。Fig. 1 に画像サンプリングの比較を示す。通常の画像は 2 次元の

Fig. 1 Sampling schemes for a 2D image. (a) 1D selected image as in conventional use of streak cameras. (b) 1D sampling as used in MIXS. (c) 2D sampling as used in 2D-SIXS.

(x, y 方向とも)に連続である。ここにストリークカメラのスリットを置けば、1 次元画像の時間分解データが得られる(Fig. 1(a))。画像サンプリングには 1 次元の(1D)サンプリングと 2 次元の(2D)サンプリングの可能性がある。ここで考える画像サンプリングの目的は、ストリークカメラに結合可能な形で 2 次元画像の規則的分解である。1 次元サンプリング法を Fig. 1(b)に示す。ここではもとの 2D 画像を、例えば x 方向に連続な多数の 1D 画像データとして y 方向に分解、すなわち離散的データとしてサンプリングする。これはテレビジョンのラスタ画像に似た配置である。一方、2 次元サンプリングの配置例を Fig. 1(c)に示す。ここではもとの 2D 画像は、2 次元的に(x, y 方向に)分布した多数のサンプリング点での信号強度を測定することにほかならない。データは 2 次元的に離散的となる。ちょうど CCD カメラのピクセルのような配置である。あとは、これらの分解された多数の離散的画像あるいは信号がストリークカメラの画面上で相互に重ならないように、工夫して掃引し、得られたデータから時間分解された時々刻々の 2D 画像を再構成してやればよいことになる。

サンプリングの利点は、その設定によって分解能を向上可能なことおよびデータの次元を下げることである。前者の例としては、サンプリングオシロのアナロジーでもあるモアレ結像[3]があげられるが、本稿では後者を利用することになる。また、もとの 2D 画像における分割画像あるいは信号の位置は、サンプリングに用いるマスクなどによって完全に確定しているので、一度画像サンプリングしてしまえば、その後で画像歪みが生じることはない、という利点もある。

2.1.3 1次元サンプリング(MIXS)

もとの 2D 画像に対する 1D 画像サンプリングの原理は上に述べたとおりである。時間掃引した画像が相互に重ならないようにする方法は 2 種類ある。ひとつは、単

一画像に対して一定の間隔を有する多重スリットマスクを設け、Fig. 1(b)の配置で上下に隣り合うサンプリングスリットの間に掃引データを記録する方法である。実はこの方法は、なんと今から50年以上も前になされているのである。Sultanoff[4]は、機械式光学ストリークカメラで受光面にまさに Fig. 1(b)そのものの一定間隔で設けた多重スリットを置いて画像を掃引し、爆発に伴う衝撃波の時間分解2D像を 10^8 フレーム/秒(fps)の速度で連続30フレーム撮影した。1コマの露光時間はすでに10 nsを達成していたことになる。この方法のおもしろいのは、得られた掃引データに撮影時と同等の配置の多重スリットを重ねて、これをずらしてやれば時間分解画像が自動的に再生できることである。

もう一つの方法は、サンプリングオシロスコープ同様に繰り返し信号に対してサンプリング位置をずらせてゆく方法である。すなわち、多重ピンホールカメラなどを用いて同等のX線画像を多数形成し、ストリークカメラのカソード直前においたスリットで異なる空間位置をサンプリングする。サンプリングする位置を一定間隔でずらすには、多重ピンホールの配列をカソードスリットに対して傾斜させる方法を用いることが多い。プラズマ計測では、1989年にImperial CollegeのChoiら[5]が多重ピンホールカメラにより画像数5または9で異なる位置でのプラズマフォーカス装置のX線発光像を観測した。ただし彼らは異なる場所を同時に観測したにとどまり、2D画像への再構成はなされていない。その後、1992年にローレンスリバモア国立研究所のLander[6]は、レーザー照射プラズマを7分割画像としてストリーク撮影し、データから時間分解2D画像を初めて再生した。フレーム速度は 3×10^{10} fps、1コマの露光時間は30 psであった。彼らの撮影では空間分解能が最適化されておらず、サンプリング間隔は空間分解能よりも大きいので、完全な2D画像とは言えないが、プラズマ形状の時間変化を見ることはできた。

それらとは独立して1994年頃から筆者らはマルチイメージX線ストリークカメラ(Multi-Image X-ray Streak camera: MIXS)法の開発を行ってきた[7]。Fig. 2にMIXSの構成を、Fig. 3に測定原理を示す。等間隔 s で直線上に並んだ N 個のピンホールで構成される多重ピンホールカメラにより、ストリークカメラの水平方向のカソードスリット上に N 個の同等なピンホール像を結像する。ここでは簡単のため $N=5$ としてあるが、実際には $N>10\sim20$ が必要である。ピンホール列の設定により、像列をカソードスリットから角度 θ だけ傾けておく。

Fig. 2 Schematic of MIXS system.

Fig. 3 Principle of MIXS. (a) Image array aligned on the photo-cathode slit. (b) Streaked image array. (c) Reconstructed time-resolved images.

こうすると、光源上で垂直方向に等間隔 $s(1 + 1/M) \sin \theta$ でサンプリングされた像が、1次元画像のセットとして選択されたことになる(Fig. 3(a))。サンプリング間隔を原画像の空間分解能の $1/2$ 以下にすると、情報を失うことはない。これは繰り返し信号に対して一定間隔で位置をずらせたサンプリングとなっている。次に、1次元画像のセットをストリークカメラによって時間掃引する(Fig. 3(b))。時間掃引された画像を、ある時刻の線上でスライスし、分割された1次元画像を、「左 右」から「上 下」に並べ替えることにより、もとの2次元画像を再構成することができる。ここで再構成された2次元画像は選択された特定の時刻でのスナップショットになっている。選択する時刻をストリークカメラの時間分解能程度で順次変えていけば、2次元画像の連続する時間分解画像が得られる(Fig. 3(c))。X線ストリークカメラの時間分解能として10 psは容易に得られ、現在高速のものでは1 ps以下まで可能であるため、この手法により超高速の2次元画像計測が可能になる。また、観測するX線の波長領域も、カソード材とフィルタの組み合わせにより、1 - 10 keV程度の範囲でかなり自由に選択できる。

この手法の欠点は、多数の分割画像を得るために視野が狭くなることである。垂直方向の視野は $Ns(1+1/M)\sin\theta$ 、水平方向の視野は L/MN で与えられる。ここに L はカソード長である。なお、サンプリング数 N を大きくすることで視野を広くする試みもなされている[8]。

Fig. 4 に典型的な爆縮ターゲットのコアプラズマを観測した例を示す。初期直径 589 μm 、厚さ 6.72 μm の中空重水素化ポリスチレン球殻ターゲットを、GEKKO-XII 号レーザーの 2 倍高調波出力 (12 ビーム、波長 0.53 μm 、総エネルギー 3.6 kJ、パルス幅 2.4 ns) を照射し、爆縮実験を行った。ここでは X 線ストリークカメラとして $L=25$ mm を持つ Hamamatsu C-2590 を使用した。カソードは厚さ 0.1 μm のパリレン (CH) 上にコートした厚さ 0.03 μm の Au、フィルタとしては厚さ 25 μm の Be と厚さ 5 μm の Ta を用いた。画像は 512 $\times$ 480 ch の CCD に記録され、画像再生処理は計算機上でなされた。その際、カソードの感度分布等の補正を行う。Fig. 4 は形成された爆縮コアプラズマの MIXS 再構成画像である。連続するコマ間隔および 1 コマの露光時間は 8.7 ps および 11.7 ps で、撮像速度としては約 10^{11} fps と言える。ここでは 15 コマを表示しているが実際にはコマ数は 100 以上が容易に得られる。時刻はコアプラズマが発光を始めてからの相対的時間で示してある。発光領域は圧縮加熱されたプラ

Fig. 4 Reconstructed sequential MIXS images of a laser-imploded core plasma. Time indicated is a relative one. Framing interval is 8.7 ps, and exposure time of each frame is 11.7 ps.

ズマの温度・密度が高い領域に対応する。中心部分から発光が始まり、次第に発光領域が広がるとともに発光強度が高くなり、 $t=100$ ps あたりで最大強度になった後、急速に強度が弱くなっている。高密度爆縮を達成するためにはコアプラズマの形状は球対称が理想であるが、この瞬間画像に見る限り、瞬時には細かい非一様な構造があり、特に発光が減衰していく時に非一様性が大きく、しかも 10 ps オーダで高速に変化していることがわかる。これらは主にレーザー照射の非一様性に起因する非一様加速と、ターゲットの加速・減速時のレイリー・テイラー不安定性によるものと考えられ、その制御はレーザー核融合研究において最も重要な課題である。爆縮途中のシェルのダイナミクスとの時間的関係を調べるため、通常の 1 次元空間分解ストリークと MIXS を同時に行う試みもなされている[9]。

この結果を見ると、10 ps の時間分解能がいかに重要かがわかる。X 線発光の半値時間幅は約 80 ps であり時間分解能 35 ~ 80 ps の X 線フレーミングカメラでは有意な画像は 1 ~ 2 コマ程度しか得られない。

また、MIXS で得られた多数コマの連続する 2 次元画像をコンピュータの画面上で動的に表示することにより、現象の変化をさらに直感的に理解することが可能である[10]。

2.1.4 MIXS の分光的应用

時間分解した分光的画像からは、適当なプラズマモデリングを仮定することにより、プラズマの温度・密度等のパラメータ、特定のイオン種の同定など、爆縮プラズマの研究における重要な情報が (x, y, t) の関数として得られる。そこで、MIXS の分光学的応用を行った。

まず、MIXS を多チャンネル化 (Multi-channel MIXS:

Fig. 5 Principle of temperature derivation with McMIXS. (a) Spectral responses of channels A, B, and C. (b) Signal intensity ratio between ch. B and ch. C as a function of electron temperature T_e .

McMIXS) し、各チャンネルが異なるスペクトル応答を持つようにした[11]. Fig. 5(a)に、異なるフィルタとカソード材質の組み合わせにより構成した3チャンネルのスペクトル応答の例を示す. ここで、プラズマの電子は熱平衡にあると仮定し、プラズマからのX線が自由-束縛遷移、または自由-自由遷移によるものであるとすると、その発光スペクトルは $\exp(-h\nu/kTe)$ に比例する. したがって、異なるスペクトル応答を持つチャンネル、例えばch.Cとch.Bの信号強度比からプラズマの電子温度を得ることができる(Fig. 5(b)).

Fig. 6 Time-resolved 2D temperature distribution of a laser-imploded core plasma obtained with McMIXS.

このように時間分解して得られた、電子温度の2次元空間分布を Fig. 6 に示す. ここでは初期直径 $507\text{ }\mu\text{m}$ 、厚さ $8.03\text{ }\mu\text{m}$ のポリスチレン(C_8H_8)球殻に Ar を 0.075 atm ドープした 30 atm の DD 燃料ガスを充填したターゲットを GEKKO-XII 号レーザーの2倍高調波出力(12ビーム、波長 $0.53\text{ }\mu\text{m}$ 、総エネルギー 2.8 kJ 、パルス幅 1.6 ns)で照射、爆縮した. 観測されるX線は主に Ar からの発光である. この例でも、プラズマ温度には局所的な非一様構造があり、それが時間的に変化している様子が観測された. ここで、あらゆるX線画像計測でそうであるように、被写体は本来3次元的であり、観測された2D画像はプラズマ中でのX線の発光・吸収(輸送)を異なるプラズマパラメータを持つ視線上に積分したものであることに注意を要する. また、観測されたX線スペクトルには Ar のライン発光が多く含まれている. したがって導かれた温度は見かけ上のものとなり、一般に発光強度の強い部分あるいは温度の高い部分の情報に偏る傾向がある.

MIXS のもうひとつの分光的应用は、ブラッグ反射結晶と組み合わせて、特定のライン発光X線に対する時間分解単色X線2次元画像を得る手法である(Monochromatic MIXS: M-MIXS [12]). Fig. 7にこの原理を示す. 傾斜したピンホール列はMIXSと同じであるが、ここでは垂直方向の画像サンプリングはカソードスリットではなく、単色X線に対するブラッグ反射の角度選択性によりなされる. そのため、カソードはスリットではなく面状のものを用いる. これを多チャンネル化すれば、異なる特性X線の単色画像を同時に得ることができるので、ライン強度比からプラズマの電子温度、密度、あるいは異なる物質の空間分布等を求めることができる. 例えば、Ar をドープした燃料ガスを封入した同様のターゲット

Fig. 7 Schematic of M-MIXS.

の爆縮で Ar の $1s^2-1s2p$ 線スペクトル ($h\nu = 3.14$ keV) の時間分解 2 次元単色 X 線画像などが得られている。

2.1 5 2 次元サンプリング (2D-SIXS)

次に, Fig. 1(c) に示した 2D サンプリングについて述べる. 最初の 2 次元サンプリングストリークの原理的デモは, これも当時 Imperial College にいた Niu らにより 1981 年に光学的ストリークカメラに多重グリッドマスクを組み合わせてなされた[13]. それは掃引速度こそ 8×10^{10} fps と速いが, サンプリング間隔の最適化などほとんどなされていない単なる手法の実証に終わっている. しかし, ストリークカメラのカソードを 2 次元的に分布するサンプリング点に対する 2 次元的时间分解検出器として使用することを提唱した意義は大きい.

我々は爆縮コアプラズマに対する超高速高空間分解画像計測を目的として MIXS に続いて 1997 年より, 2 次元画像サンプリング X 線ストリークカメラ (2-Dimensional Sampling-Image X-ray Streak Camera: 2D-SIXS) 法[14]の開発を行ってきた. MIXS では画像サンプリングは繰り返し 2 次元画像に対して垂直方向に 1 次元的になされ, 2 次元画像を分割 1 次元画像のセットに変換するが, 2D-SIXS では単一 2 次元画像に対して規則的に分布したサンプリング点によって 2 次元的にサンプリングされる. MIXS では多数の同等な像を得るため, 結像装置としてはピンホールカメラを使用せざるを得ず, したがってその空間分解能は通常 $10 \mu\text{m}$ 程度に限界がある. しかし, 2D-SIXS では単一の画像でよいから, より高空間分解能 ($5 \mu\text{m}$ 以下) の X 線顕微鏡 [15] 等との組み合わせが可能である. Fig. 8 に 2D-SIXS の原理を示す. X 線ストリークカメラの面状のカソードの前面に 2 次元的に配列したピンホール列を持つマスクを置く. ピンホール列は一段ごとにわずかにシフトさせ, その間にオーバーラップを避けて時間掃引する領域を設ける (Fig. 8 (a)). 全体の時間掃引像は, 各サンプリング点の時間掃引像で構成される (Fig. 8 (b)). 各サンプリング点の対応する時刻の信号強度を読みとれば, 時間分解した 2 次元画像を再構成することができる (Fig. 8 (c)). カソード自体の空間分解能が十分よいならば, サンプリング間隔 S_x, S_y は $S_x, S_y < (1/2) M \Delta r$ であればよい. ここに Δr は結像系の空間分解能である. また, ピンホール列のシフト量 δx はカソードの空間分解能以上であればよい. 例えば, $1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$ のカソード上に $S_x = S_y = 300 \mu\text{m}$, $\delta x = 50 \mu\text{m}$ として 30×30 個のサンプリング点を配置できる. $M = 120$ の X 線顕微鏡を用いれば, $\Delta r = 5 \mu\text{m}$ で視野

Fig. 8 Principle of 2D-SIXS. (a) 2D-distributed sampling points on the photo cathode. (b) Streaked data of sampling points. (c) Reconstructed 2D images.

$80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$ が得られることになる.

現在までに, 2D-SIXS 法でレーザー照射ターゲットの X 線発光像を撮影することに成功している. しかし, 上記のような設定パラメータを最適化しての動作はまだ行われていない. 高空間分解 X 線結像系として, 例えば近年開発された位相型フレネルゾーンプレート (FPZP) [16] などを用いれば, $h\nu = 5$ keV にて空間分解能 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ は達成可能である. これを最近開発されている広視野・高ダイナミックレンジの高性能 X 線ストリークカメラ [17] に結合して 2D-SIXS を構成すれば, 時間・空間分解能 $10 \text{ ps} \cdot 2 \mu\text{m}$ の同時達成が可能である. さらに高速型の X 線ストリークカメラ [2] を用いれば, $1 \text{ ps} \cdot 2 \mu\text{m}$ も可能となろう. レーザー核融合の爆縮プラズマが核融合点火した際の, 燃焼波伝搬の診断に要求される分解能レベルがこの程度であり, したがってレーザー核融合プラズマ研究に要求される時間・空間分解能は基本的にはすべて達成可能と結論することができる.

なお, 段ごとにサンプリング点をシフトさせ, その間に時間分解情報を蓄積する配置方法は, 最近超高速 CCD として脚光を浴びているチップ蓄積型 ISIS-CCD [18] のそれと奇しくも全く同じである. すなわち, 高速掃引データは受光画面内に配置したメモリに記録してしまうという発想である.

また, UV 光での応用例だが 2D-SIXS に類似して, 2 次元画像をバンドルファイバで 2D 画像サンプリングして受光し, 幾何学的配置の工夫ではなく構成要素である多数のファイバを解きほぐしてストリークカメラのカソードスリット上に一直線に再配列することにより, データの重なりを避けて時間掃引する手法も開発されている [19]. この場合も時間掃引データから受光位置でのファイバーのアドレスに従って時間分解 2D 画像を再構成することができる.

2.1.6 まとめ

超高速 2 次元 X 線画像計測法として, X 線ストリークカメラに画像サンプリングを応用した MIXS ならびに 2D-SIXS 法を開発した。これらの特徴は, (1) X 線ピンホールカメラ, X 線顕微鏡や X 線ストリークカメラはいずれも確立された装置であり, 技術的な困難はない, (2) X 線ストリークカメラは高速で連続的撮像が可能であり, ここでは 10 ps の時間分解 (10^{11} fps) を達成したが, 市販の装置でさらに 1 ps 以下 (10^{12} fps 以上) まで時間分解が可能である, (3) McMIXS, M-MIXS などの分光的应用が容易であり, 観測 X 線スペクトル領域はおおよそ 1 - 10 keV 程度の広い範囲で選択可能, (4) 2D-SIXS では高空間分解能の X 線顕微鏡と組み合わせることにより, 1 - 2 ps, 2 - 5 μm の時間・空間分解能を同時に実現できる, 等である。MIXS ならびに 2D-SIXS は, レーザー爆縮プラズマや超短パルスレーザー照射プラズマなどの, 微小で高速に変化する光源の観測に適している。

現在これらの手法は GEKKO-XII 号レーザーにおける爆縮実験に定常的に使用され, 爆縮コアプラズマのダイナミクス, 一様性ならびにその加熱過程の研究に使用されている。X 線フレーミングカメラ (XFC) が時間分解能 80 ps (最近では 35 ps) で時間的に離散的なコマ取り画像になるのに対して, MIXS, 2D-SIXS では時間分解能 10 ps 以下で連続的な画像が得られる。一方, 視野に関しては XFC では 1 mm は確保できるのに対して, MIXS, 2D-SIXS では 100 - 200 μm 程度に制限される。したがって, 爆縮初期～途中の球状ターゲットの観測には XFC が, また爆縮で形成されたコアプラズマの観測には MIXS, 2D-SIXS が適しており, 実際の爆縮実験ではこれらを相補的に使用している。

画像サンプリング・ストリーク法は, 変則的ではあるが, ピコ秒連続画像を得ることのできる強力な, そしておそらく唯一の切り札であろう。この手法に関しては, 既に見たように多くの人々が個別にそれぞれの試みを行ってきたが, そこには自ずと全体的な流れがあるのが読みとれる。筆者らは筆者らの手法を独自に発想したのではあるが, しかしこうしてみるとそれはいわば高速度撮影の進展の中での必然として位置づけられると思われる。

謝辞

ここに述べた成果は多くの方々の協力によって成されたものであることは言うまでもない。大阪大学レーザー核融合研究センターの山中龍彦センター長には本研究の

機会を与えていただくとともに貴重な助言をいただいた。宮永憲明教授, 疇地宏教授, そして藤島晃君 (現 JR 西日本), 部谷学君 (現大阪大学自由電子レーザー研究施設), 中筋幹生君 (現東芝), 青木良之君 (現 NHK), 藤岡慎介君をはじめとする大学院生諸君, および児玉了祐助教授, 村中崇信研究員には, 共同研究者として多くの議論とともに熱心に研究に取り組んでいただいた。ここに敬意を持って深く感謝する次第である。米国ローレンスリバモア国立研究所の O.L. Landen 博士と J.D. Kilkenny 博士には, 1 次元サンプリング法に関して比較検討いただいた。高速度撮影における画像サンプリングの観点から, Sultanoff の先駆的仕事を筆者にご紹介くださった山本芳孝教授 (東海大学), チップ蓄積型 ISIS-CCD についてご教示いただいた江藤剛治教授 (近畿大学), Niu らのサンプリング法について議論いただいた侯洵 (Hou Xun) 教授 (中国科学院西安光機所), 木下勝之氏 (浜松ホトニクス), そしてこれらの方々に出会う機会をつくっていただいた高山和嘉教授 (東北大学) に感謝する。核融合科学研究所における画像計測研究会で多様な画像計測手法に関する理解を深める機会をいただいた岩間尚文教授 (富山県立大学), 長山好夫助教授 (核融合研) に, また機会あるごとにプラズマ計測のあり方について議論いただいた長照二教授 (筑波大学) に感謝する。

参考文献

- [1] J.D. Kilkenny, *Laser Part. Beams* 9, 49 (1991); M. Katakayama *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* 62, 124 (1991); D.K. Bradley *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* 63, 4813 (1992); M. Katakayama, H. Shiraga, M. Nakai, T. Kobayashi and Y. Kato, *Rev. Sci. Instrum.* 64, 706 (1993); D.K. Bradley *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* 66, 716 (1995).
- [2] 例えば, Hamamatsu C-4575 など。
- [3] M. Matsuoka, H. Azechi, M. Nakai, N. Izumi, K. Shigemori, T. Nagaya and N. Miyanaga, *Rev. Sci. Instrum.* 70, 637 (1999).
- [4] M. Sultanoff, *Rev. Sci. Instrum.* 21, 653 (1950).
- [5] C. Deeney and P. Choi, *Rev. Sci. Instrum.* 61, 2747 (1990); P. Choi and R. Aliaga, *Rev. Sci. Instrum.* 60, 3558 (1989).
- [6] O.L. Landen, *Rev. Sci. Instrum.* 63, 5075 (1992).
- [7] H. Shiraga, M. Heya, A. Fujishima, O. Maegawa, K. Shimada, Y. Kato, T. Yamanaka and S. Nakai, *Rev. Sci. Instrum.* 66, 722 (1995); H. Shiraga, N. Miyanaga, M. Heya, M. Nakasugi, Y. Aoki, H. Azechi, T. Yamanaka and K. Mima, *Rev. Sci. Instrum.* 68, 745 (1997).
- [8] M. Heya, S. Fujioka, H. Shiraga, N. Miyanaga and T. Yamanaka, *Rev. Sci. Instrum.* 72, 755 (2001).

- [9] H. Shiraga, M. Heya, M. Nakasuji, N. Miyanaga, H. Azechi, H. Takabe, T. Yamanaka and K. Mima, *Rev. Sci. Instrum.* 68, 828 (1997).
- [10] 部谷 学, 白神宏之, 島田京子, 宮永憲明, 高部英明, 山中龍彦, 三間園興: プラズマ・核融合学会誌 75, 507 (CD-ROM pp. 105 - 118) (1999).
- [11] M. Heya, M. Nakasuji, H. Shiraga, N. Miyanaga, H. Azechi, H. Takabe, T. Yamanaka and K. Mima, *Rev. Sci. Instrum.* 68, 820 (1997).
- [12] N. Miyanaga, Y. Aoki, H. Shiraga, K. Shimada, K. Fujimoto, M. Heya and M. Nakasuji, *Rev. Sci. Instrum.* 68, 817 (1997).
- [13] H. Niu, T. Chao and W. Sibbett, *Rev. Sci. Instrum.* 52, 1190 (1981).
- [14] H. Shiraga, M. Nakasuji, M. Heya and N. Miyanaga, *Rev. Sci. Instrum.* 70, 620 (1999).
- [15] R. Kodama, N. Ikeda, Y. Kato, Y. Katori, T. Iwai and K. Takeshi, *Opt. Lett.* 21, 1321 (1996); R. Kodama, H. Shiraga, N. Miyanaga, T. Matsushita, M. Nakai, H. Azechi, K. Mima and Y. Kato, *Rev. Sci. Instrum.* 68, 820 (1997).
- [16] Y. Tamari and H. Azechi, *Proc. Inertial Fusion Science and Applications 2001*, ed. K.A. Tanaka, D.D. Myerhofer and J. Meyer-ter-Vehn (Elsevier, Paris, 2002) p. 871; 礪地宏他, プラズマ・核融合学会誌 79, 398 (2003).
- [17] 例えば, Hamamatsu C-7770など.
- [18] T.G. Etoh, K. Takehara, T. Okinaka, Y. Takano, A. Ruckelshausen and D. Poggemann, *Proc. 24th Int. Congress on High-Speed Photography and Photonics*, Ed. K. Takayama, T. Saito, H. Kleine and E. Timofeev, SPIE, Vol. 4183 (2001).
- [19] R. Kodama, K. Okada and Y. Kato, *Rev. Sci. Instrum.* 70, 625 (1997).