

講座

プラズマ実験におけるデータ処理Ⅳ

4. 実験データ処理システムの例

4.4 レーザー核融合でのデータ処理

白 神 宏 之

(大阪大学レーザー核融合研究センター)

(1996年11月14日受理)

Examples of Data Processing Systems
Data Processing in Laser Fusion Experiments

SHIRAGA Hiroyuki

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

(Received 14 November 1996)

Abstract

Data-processing is critical to improving both the plasma diagnostic capabilities and the experimental-data management of laser-fusion experiments. Examples are given of a technique that uses data processing for high resolution diagnostics. The data acquisition system and experimental database system at the Institute of Laser Engineering, Osaka University are briefly described.

Keywords:

laser fusion, penumbral imaging, neutron camera, X-ray framing camera, X-ray streak camera, image sampling, multi-imaging X-ray streak camera, database system, WWW

4.4.1 はじめに

レーザーを用いた慣性閉じ込め爆縮核融合実験は、大阪大学レーザー核融合研究センターのガラス・レーザー激光 XII 号や、米国ローレンス・リバモア国立研究所の NOVA レーザー、ロチェスター大学レーザー・エネルギー研究所の OMEGA レーザー、フランスのリメイユ研究所の PHEBUS レーザー等で行われている。燃料プラズマの 10keV 程度までの加熱[1]と固体密度の数100倍までの圧縮[2]はすでに達成されており、現在は核融合点火・燃焼と高利得ターゲット爆縮の実現に向けた研究が展開されている。

レーザー核融合実験の特徴は、計測対象としてのプラズマが(1)空間的スケールが10ミクロン～数ミリメートルと小さいこと、(2)時間的スケールが数十ピコ秒から数ナノ秒と非常に高速であること、さらに(3)プラズマ密度が

固体密度の1～1000倍程度の超高密度となることである。これらはいずれもプラズマ計測技術に対し、非常に高い空間分解能(数ミクロン程度)、時間分解能(数ピコ秒程度)を要求し、なおかつ高オパシティのため圧縮されたプラズマの中身が見えないという厳しい条件を与える。

このような条件下での測定においては、データ処理を効果的に用いれば、計測上の困難を排した上で必要な分解能を得ることができる場合がある。例えば、直接に高空間分解・高時間分解結像することがむずかしい場合でも、変則的であるが技術的には容易な結像法でデータ取得後、データ処理により画像再生を行い高空間分解・高時間分解画像が得られる場合がある。これらのデータ処理の応用により、高密度に圧縮された燃料プラズマの時間的・空間的構造と、核融合反応を含む燃料プラズマ性

能に関する実験データを得ることができる。

レーザー核融合実験のもうひとつの特徴は、現状ではそれが1ショット・ベースの実験であることである。各研究機関では主に冷却の遅いガラス・レーザーが用いられているため、爆縮実験のショット間隔は数十分～数時間、1日あたりのショット数は数ショットからせいぜい10ショット程度である。したがって、すべての計測データ(レーザー・データ、ターゲット・データ、プラズマ・データ)を1ショット毎にまとめてデータ収集・保管し、これに数10人の研究者がアクセスしてデータ解析を行う研究形態となる。そのため、計算機による総合的データ収集システムと、結果を集約しネットワーク上でアクセスできる実験データベース・システムが必要となる。

本稿では、大阪大学レーザー核融合研究センターにおけるデータ収集システム、データ処理を用いた高分解計測の例、および実験データベース・システムについて概説する。

4.4.2 レーザー核融合実験におけるデータ収集

大阪大学レーザー核融合センターでは激光 XII 号ガラス・レーザー・システム[3]を用いて慣性核融合の実験を行っている。慣性核融合実験は、直径数100ミクロンから数ミリメートルの重水素や三重水素を燃料としたペレット・ターゲットに強力なレーザー光や粒子ビームを

均一に照射し、ターゲットを爆縮し核融合反応を起こさせる。爆縮された燃料から発生する数 keV 以上の X 線、核融合反応により生成された中性子や α 粒子を計測し、爆縮プラズマの診断をすることが核融合研究にとって重要である。これらの計測器をコンピュータを介してネットワークに接続し、計測器操作・データ収集の効率化をはかっている。

近年、パーソナルコンピュータやワークステーションなどの性能向上等で計算機をとりまく環境が大きく変化し、異機種間のデータ交換が増えてきた。また、画像データの大容量化等によりデータ転送技術が必要となった。例えば X 線ストリーク・カメラなどの計測器では1枚の画像データは約 1～4MB 程の容量となる。そこで1990年よりホスト・コンピュータ/ワークステーション/パーソナルコンピュータをイーサネットで接続し、ネットワーク化を行った(Fig. 1)。また、ゲートウェイを接続し、異機種間の接続や、プリンタ共有等も行えるようにしてある。

爆縮実験では放射線が発生するため実験時には実験室から退避して被爆を防止する必要がある。このため、ネットワークにより計測室から実験室の計測器を遠隔操作できるようにしている。最近では種々の遠隔操作ソフトが発売されているが、我々は Timbuktu Pro (Farallon 製) というリモート・コントロール・ソフトでこれを実

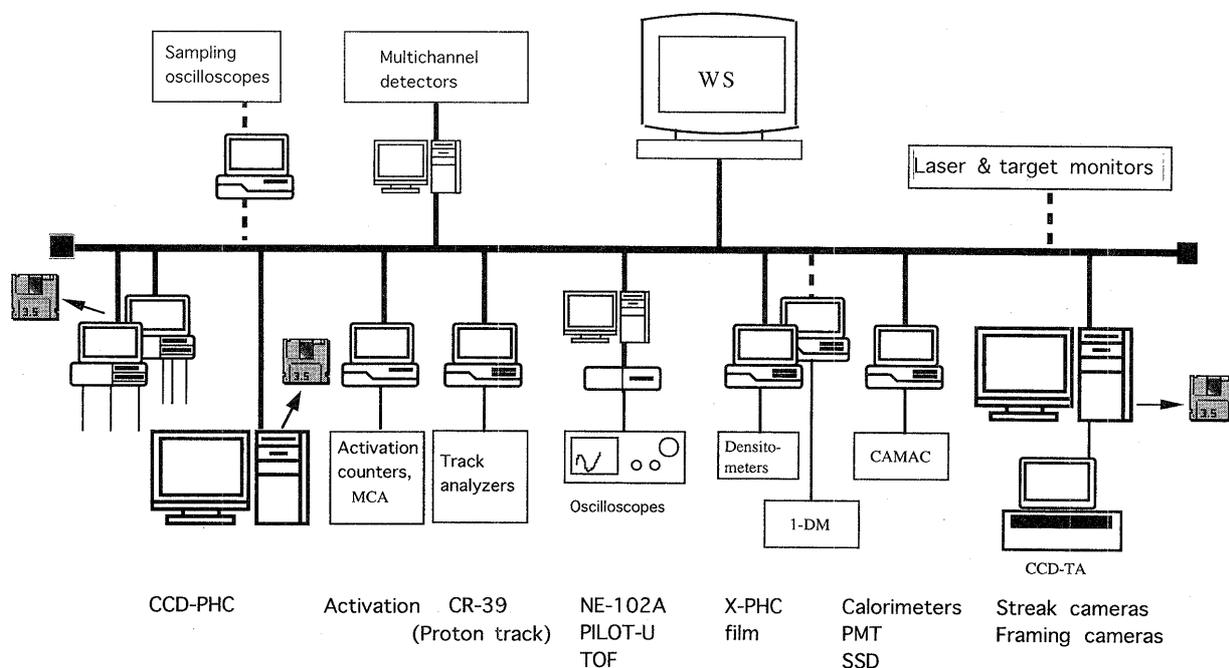


Fig. 1 Schematic of the data acquisition system.

現した。このソフトは Windows や Macintosh などの異機種間においても違和感なくファイル転送や遠隔操作ができるように作られている。

データ収集システムではまた、できるだけ安価で簡単に構築ができるよう考慮し、GP-IB を使用している。例えば画像計測の多くは CCD カメラの画像データ・コントローラを使って読みこまれ、GP-IB を介してコンピュータと接続され、データ収集などの制御が行われる。GP-IB は一台のコンピュータで複数の計測器を制御できるため、異なる種類の計測器を同時に制御可能である。ソフトウェアはグラフィカル・プログラミング・ソフトウェアの LabVIEW (National Instruments) を使って構築され、これはブロック・ダイアグラムを用いて視覚的にプログラムができるためプログラム構築が容易にできる。

計測データは制御用コンピュータによりデータ転送され、パーソナルコンピュータ/ワークステーション/汎用コンピュータ等で解析される。

4.4.3 データ処理による高分解計測技術の例

前述のように自動収集されるデータの中で、特に変則的結像と画像データ再生処理を用いることにより、通常の方法よりも高空間分解画像が得られる場合の例として中性子半影カメラ[4]を、また高時間分解画像が得られる例としてマルチイメージ X 線ストリーク・カメラ[5]を取り上げる。

一般に硬 X 線や中性子に対しては、反射結像系を構成することが困難であり、また高空間分解ピンホール結像系では信号量が不足するため、空間分解能を低下させずに直接これらの手法で高空間分解結像を得ることはむずかしい。そこで、100ミクロン程度の爆縮燃料プラズマから発生する中性子の空間分布を測定するために、大きな円形開口によりその半影像を撮影し、画像再生処理により高空間分解で本来の二次元画像を得る手法が用いられる。得られる半影像のままでは光源の空間分布はわからないが、画像再生のためのデータ処理によりもとの空間分布を得ることができる。半影カメラでは大口径の開口を用いるため、ピンホール結像系の場合よりもはるかに大きな信号量を期待できる。

Fig. 2 (a) に半影コーデッド・アパーチャ結像の原理を示す。光源の寸法 d よりも大きな開口 D で結像すると、投影面 (detector) 上に、一様強度の真影のまわりに光源の空間分布の情報を持つ半影 (penumbra) ができる。この半影をデコンボリューション処理すればもとの光源の強度分布が得られる。Fig. 2 (b) はこの中性子半影

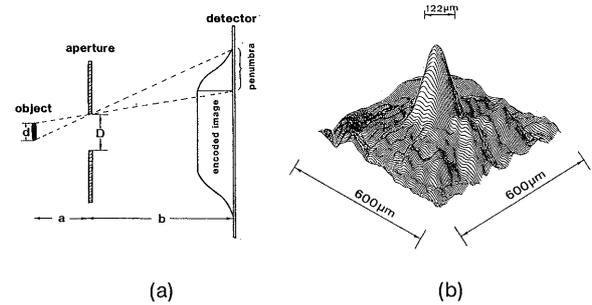


Fig. 2 Neutron penumbral camera. (a) Principle of the penumbral imaging, (b) a neutron image after deconvolution.

カメラにより撮影、再生された爆縮燃料プラズマ中の DT 核融合中性子発生強度分布である。アパーチャーは直径360ミクロン、厚さ6センチメートルで材質は金、検出器は1500本のプラスチック・シンチレータ・アレイ、このショットでの中性子発生数は 5×10^{11} 個であった。像再生には開口の応答関数を用い、Wiener filter 法で平滑化処理を行った。このデータの場合空間分解能は46ミクロンとなり、120ミクロン程度の中性子発生領域が十分に空間分解できていることがわかる。

爆縮ターゲットの時間分解二次元 X 線画像は、従来主にゲート型マイクロ・チャンネルプレートを用いた X 線フレーミング・カメラにより撮影されてきた。X 線フレーミング・カメラで得られる時間分解能は約80ピコ秒、最近開発されたより高速型のものでは30ピコ秒程度である。しかし、爆縮コア・プラズマの寿命は100ピコ秒程度のため、その間の詳細な時間変化を分解して計測するにはさらに高速の画像計測技術が必要である。一方、10ピコ秒以下の時間分解能を有する画像計測器はストリーク・カメラ以外にはないが、通常のストリーク・カメラの使用法では空間一次元分解像の時間変化しか撮影できない。そこで、マルチイメージ X 線ストリーク・カメラ (MIXS) 法によるデータ取得と画像再構成のためのデータ処理を応用した超高時間分解二次元 X 線画像再生法が開発された。

Fig. 3 (a)-(c) に測定原理を示す。カソード・スリットと θ の角度を持った等間隔ピンホール・アレイにより、2次元画像をそれぞれが上下方向に異なる場所を見ている多数の一次元画像に分解結像し (a)、ストリーク・データ取得 (b) 後、コンピュータ上で二次元画像再生処理 (c) を行う。これは一種の画像サンプリングの応用であり、これにより高時間分解ストリーク・カメラとの組み合わせが可能となる。実際の爆縮コア・プラズマの二次元再

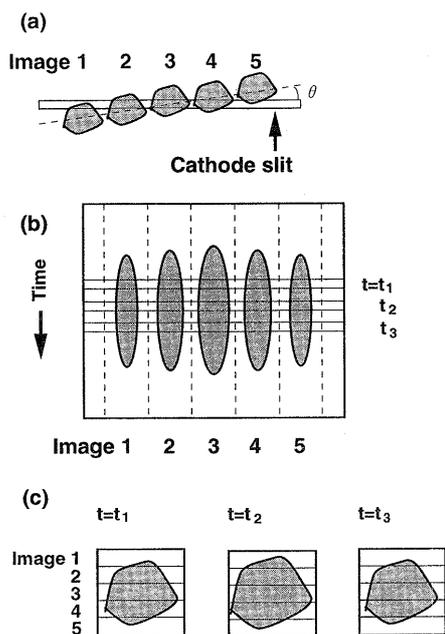


Fig. 3 Principle of the multi-image X-ray streak camera (MIXS). (a) Multiple imaging of different vertical positions of an objective with an array of pinholes which is tilted by an angle θ , (b) streaked images, (c) framing images after the image reconstruction procedure.

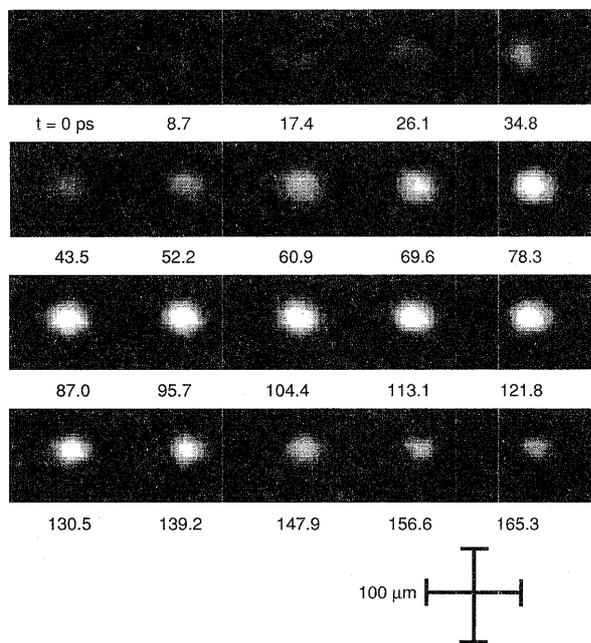


Fig. 4 Example of reconstructed time-resolved X-ray images obtained with MIXS showing imploded plasma. Relative time is indicated.

生 X 線画像の例を Fig. 4 に示す。各コマの露光時間は 11.7 ピコ秒，連続するコマ間隔は 8.7 ピコ秒，観測 X 線エネルギーは $h\nu = 2.5 - 4.9 \text{ keV}$ である。コア・プラズマの内部構造の時間変化が見取れる。この手法により時間分解能 10 ピコ秒の 2 次元 X 線画像を得ることが可能となった。

これらのデータ処理は，実験時にパソコンを経てワークステーションにデータ収集された後，別途ワークステーションやパソコンで実行され，最終的に得られた結果は実験データベース・システムに登録され，研究グループ内に公開され活用される。

4.4.4 実験データベース・システム

激光 XII 号での爆縮実験では，レーザー・データ，ターゲット・データ，プラズマ計測データ等，1 ショットあたり 1000 項目以上のデータが発生し，ひとつの実験シリーズは 1 ~ 2 ヶ月実施される。これらのデータをショット単位で集中管理するため，1987 年以来，実験データベース・システムを構築し，運用してきた。1996 年 3 月にホスト・コンピュータが更新されたことに伴い，データベース・システムはワークステーション上に移行された。

実験データベース・システムの概要を Fig. 5 に示す。実験で発生した各種のデータは，主にパソコンで自動収集され，データ転送サブシステムを用いてデータベース上に自動的に転送・登録される [6]。転送には FDDI, Ethernet を用いて構築した LAN (通称 ILE-NET) [7] を用いている。

一方，ここ数年の間にパソコン等の性能向上とともに実験データ収集用の計測機器も進歩し，画像データが急激に増加し，また 1 つのデータ容量も大きくなっている。最近では先述の MIXS 等で，コマ撮りのデータを動画として表示する手法も使われるようになった。これらの

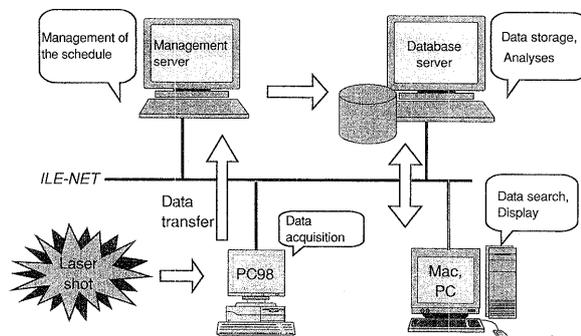


Fig. 5 Schematic of the ILE experimental database system.

画像・動画データの検索・表示については、WWWを用いることにより可能となった。WWWを用いるメリットは、画像や動画が扱えることだけでなく、クライアントの機種が制限されない（MacでもPCでもみることができる）、ワークステーションとパソコンの漢字コードの違いもブラウザが自動認識して表示するため問題にならない、そして、エンド・ユーザが簡単に操作できることなどである。UNIXを中心としたシステムへの更新によりデータベース・サーバをワークステーション上に移植し、WWWのノウハウを採り入れることで、画像・動画を含みかつ表項目やレイアウトの更新等が容易な実験データベースを実現することが可能となった。

ハードウェアとしては、サーバにEWS4800/310PX、クライアントはPC98, Macintoshなどのパソコン、または、ワークステーション等で、特に機種に依存せず、基本的にはILE-NETに接続されているマシン全てである。ソフトウェアとして、サーバのOSはUNIX、データベース・ソフトは、Oracle7 Server、さらに、データの検索・表示用にWWWを用いるため、データベースと連携するフリーソフトの「Oracle WWW Interface Kit」と、WWW標準のCGI (Common Gateway Interface) 機能を用いている。WWWサーバも、データベース・サーバ・マシン上で動かしている。WWWサーバ・ソフトは、アクセス管理等の機能の面でCERNのhttpdを用いた。クライアント側のWWWブラウザには、ユーザーの好みに応じたものを用いている。

例えばレーザー・データは、PC-9801に自動収集された後、実験スケジュール管理サーバ・マシンにPC-NFSを用いて転送されたものが、コマンド実行の日時を制御するcronの機能を用いてデータベース・サーバへ自動転送される。データの形式は、テキストの数値データで、データベース・サーバ上に転送されると、自動的に登録用プログラム（C言語で作成）が実行され、データベースへ登録される。

定型的なデータの検索・表示は、WWWで行う。検索は、ショット番号や登録されたターゲット製作番号で行うが、実験シリーズ名を選択するだけで、そのシリーズのショット番号一覧を表示し、ユーザは参照したいショットを選択できるような機能も付加している。レーザー・データについていえば、テキスト・データそのものだけでなく、その数値データを元に12本のレーザー出力エネルギーのバランスをFORTRANで計算させ、その結果をテキストで表示するだけでなく、レーダーチャート・グラフにし、GIFファイルに変換することによ

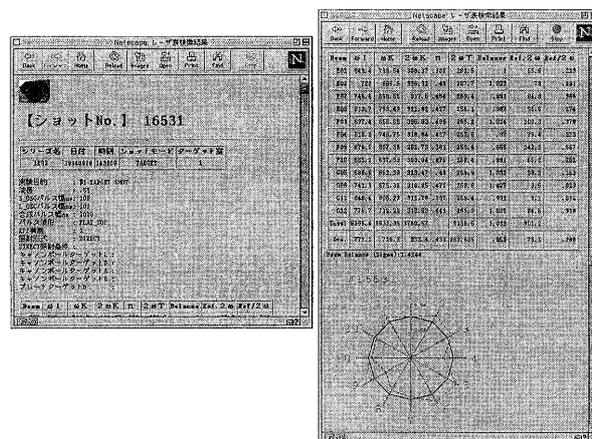


Fig. 6 Example of a WWW browser output-laser data.

って、WWW上に表示している。Fig. 6にその表示画面の一例を示す。

データベースとWWWを連携することにより、機種に依存せず、画像も扱え、ユーザにも使いやすい実験データベース・システムとなっている。また、実験スケジュールと実験データとを同じソフトで見ることができるなど、実験に関する情報管理の一元化が可能となった。また、UNIXを中心としたシステムであるため、データ転送や自動処理、拡張が容易に行えるようになった。

4.4.5 おわりに

大阪大学レーザー核融合研究センターにおけるデータ収集システム、データ処理を用いた高分解計測の例、および実験データベース・システムについて概説した。データ処理による変則的データ取得法の応用を含め、レーザー核融合プラズマの計測技術の進歩は著しく、高密度に圧縮された燃料プラズマの時間的・空間的構造と、核融合反応を含む燃料プラズマ性能に関する実験データが得られるようになってきている[8,9]。また、データ収集システム、実験データベース・システムの整備により、実験に関する情報の一元化が可能となり、効率的な実験遂行・データ解析に大きく寄与している。

謝辞

本稿執筆の機会を与えて下さった山中龍彦教授に、また執筆に関しご協力いただいた大阪大学レーザー核融合研究センター計測グループの島田京子氏、斎藤昌樹氏、中井光男氏に感謝します。

参考文献

- [1] C. Yamanaka *et al.*, Phys. Rev. Lett. **56**, 1575 (1986).
[2] H. Azechi *et al.*, Laser and Particle Beams **9**, 193 (1991).
[3] C. Yamanaka *et al.*, Nucl. Fusion **27**, 19 (1981).
[4] 山中龍彦, 宮永憲明: 核融合研究 **66**, 614 (1991).
[5] 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. Nakasuji, Y. Aoki, H. Azechi, T. Yamanaka and K. Mima, to be published in January 1997 issue of Rev. Sci. Instrum.
[6] 福田優子他: 核融合研究**68**別冊, 303 (1992).
[7] 伊藤京子他: 核融合研究**68**別冊, 293 (1992).
[8] 宮永憲明, 山中正宣, 山中龍彦: 核融合研究 **66**, 357 (1991).
[9] 西村博明, 白神宏之, 疇地 宏, 宮永憲明: プラズマ・核融合学会誌 **70**, 1259 (1994).