

ハイパワーレーザーによる超高輝度 X線源とX線レーザー — レーザー核融合の工学的応用 —



技術解説

大道博行*, 中井貞雄**

Ultra-high Brightness X-Ray Source and X-Ray Lasers Produced by a High Power Lasers : Engineering Application of Laser Fusion

Key words : High-Power Laser, X-Ray Laser, Laser-Plasma X-Ray Source

1. はじめに

レーザー核融合の研究は現在、投射したレーザーエネルギーに等しい核融合エネルギーを発生するブレークイーブンの達成を目指した核融合点火実験に着手しうる段階にまで至っている。ここでは、研究の過程で明らかになってきたレーザーとプラズマの相互作用、高温高密度プラズマ中の種々の原子過程に基づくレーザープラズマからの高輝度X線放出、プラズマ中に過渡的に生ずる反転分布を用いたX線レーザーについて筆者らの研究を中心に紹介する。前者はテーブルトップシステムからの高輝度X線放出、後者は放出X線輝度に原理的制約のないことを特

徴としている。この線源は、高エネルギー加速器研究の副産物としてシンクロトロン放射光が生まれたように、核融合プラズマからのX線放出を積極的に利用し、工学的応用を計ろうとしたものである。シンクロトロン装置同様、今後各種X線応用の分野に広く深く浸透してゆくことが期待されている。

2. レーザープラズマX線源

X線レーザーの研究は次節で紹介することにし、ここではプラズマからの自然放出光を中心にしたインコヒーレントX線源について述べる。



*Hiroyuki DAIDO
1952年4月26日生
1981年大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻博士修了
現在、大阪大学レーザー核融合研究センター、助手、工学博士、レーザー工学
TEL 06-877-5111 (内線 6593)



**Sadao NAKAI
1938年6月4日生
1966年大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻博士課程修了
現在、大阪大学レーザー核融合研究センター、センター長・教授、工学博士、核融合工学、レーザー工学
TEL 06-877-5111 (内線 6523)

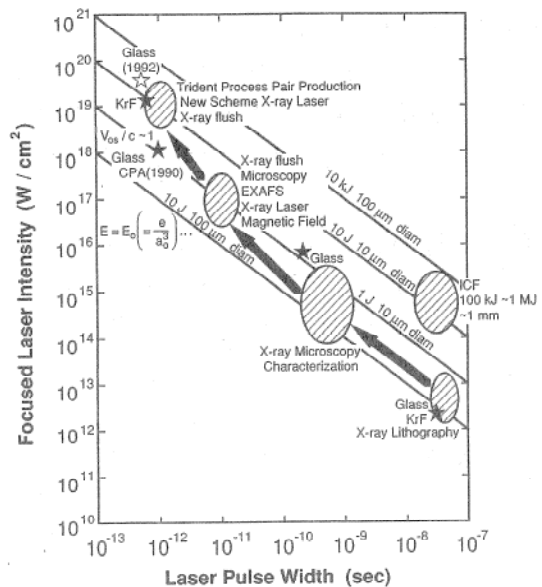


図1 高輝度レーザーの各種応用

この線源の特徴は、ひとえにレーザー光のエネルギー集中性に由来しており微小点光源（直径数 μm ~100 μm ）、短パルス（サブピコ秒~数十ナノ秒）、高輝度といった特性を有している。図1にレーザー集光強度とパルス幅に対応する種々の工学的応用を示す。図中右下がりの実線はレーザーの集光径とエネルギーをパラメータとしたときの関係を示している。現在、集光点でのレーザー光強度の最高値として $10^{19}\text{W}/\text{cm}^2$ 以上のものが現れ始めている¹⁾。レーザープラズマX線源は、このような超高レーザーエネルギー密度をいかに効率良く原子系の励起エネルギーに変換し、X線放射エネルギーとして取り出すかという点に研究の中心が置かれてきた²⁾。最近では照射レーザーの高繰り返し運転（数百Hz）が可能となってきており、レーザー照射ターゲットの高速変換、連続運転に伴う諸技術の開発が重要な課題となってきている³⁾。また近年急速に進歩したX線光学素子とこの線源を組み合わせた具体的応用も進み、目的に応じたX線波長における高輝度化といったことも重要な研究課題になっている。

筆者らは、繰り返し数Hzまで可能なガラススラブレザー（エネルギー5J、パルス幅30~50ns、波長1.053 μm ）光を回転ターゲット上に集光照射し、スペクトル分解されたX線の放射輝度を詳細に測定している⁴⁾。筆者らは、いわゆる水の窓（Water Window）と呼ばれ、水中あるいは水を多量に含んだ生体試料のX線撮影に適している波長領域（2.3nm~4.3nm）におけるスペクトル輝度を種々のターゲット材

料に対して測定した。これをゾーンプレート型X線顕微鏡に適用し、その特性を評価した⁵⁾。図2にその構成を示す。ゾーンプレートに必要とされるスペクトル幅 $\Delta\lambda$ と波長 λ の比約 10^{-2} の条件では、水素様ライマン α 線（波長3.37nm）の輝度 $>10^{16}$ フォトン/秒 $\cdot\text{mm}^2\cdot\text{mrad}^2$ （0.1%バンド幅）が得られた。大規模シンクロトン装置にウィグラーを挿入して得られるX線の輝度と同等以上の値となっていることがわかった。このときX線露光時間は、ほぼレーザー光パルス幅と等しい30ナノ秒であった。このように、極短露光時間で連続的にX線顕微鏡撮影ができることから、今後運動している生体観測等これまでになかった観測装置の線源として期待されている⁶⁾。

次に最近注目を浴びつつあるX線リソグラフィシステムへのこの線源の応用を紹介する。筆者らは、前記小型高繰り返しレーザープラズマX線源を用い近接露光型X線リソグラフィの実証試験を行い間隔0.25 μm の線幅の転写パターンを得た⁷⁾。最近のX線光学の進歩を反映して大量生産に適した方法として、光リソグラフィ同様X線光学系を用いた縮小転写方式が詳細に検討され始めた。例えば米国のローレンスリバモア研究所で提案されているレーザープラズマX線源を用いたものではレーザーに要求される性能としては現状でも十分実用可能なものとなっている。すなわちレーザーエネルギー0.7J/パルス、パルス幅2.5ns、繰り返し400Hz、平均パワー280Wである⁸⁾。米国ではベル研、サンディア国立研でも同様な線源開発が開始されており⁹⁾、5年~10年後の超LSI製造を目指して急速に研究が拡大する可能性も大きく、英国ラザフォード研とともに、ここしばらくは目の離せない状況が続くものと思われる。

以上の他、小型高繰り返し、低コストといった特徴を生かしX線吸収分析、EXAFS、光電子分光用光源としての活用も考えられている。また筆者らは、微小光源（サイズ $\leq 10\mu\text{m}$ ）であることに注目しフィルターにより単色化された高輝度線スペクトル源の空間コヒーレンスを測定し簡便なX線ホログラフィー用光源としての可能性を示した¹⁰⁾。既に英国ラザフォード研

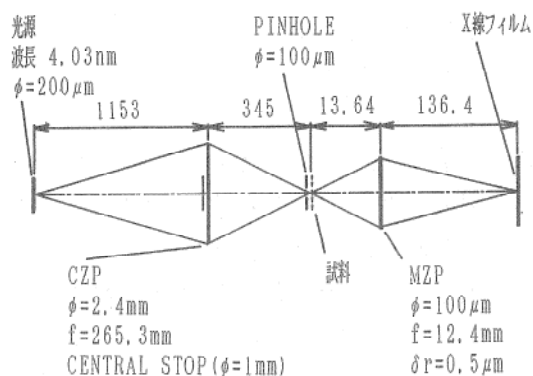


図2 ゾーンプレート型X線顕微鏡の光学配置図
(阪大極限センター、阪大レーザー研の協同研究)

では、繰り返し100HzのレーザープラズマX線源を外部との協同研究用に公開している。前記各種応用の専門家に加え生物学者も利用者に名を連ねており、期間を詳細に定めた利用計画の下で多彩な研究が展開されている。この線源活用の今後の方向を示唆する一例として興味深い。

3. X線レーザー

1960年レーザーが初めて発振して以来今日まで短波長化、高出力化を目指して種々の研究、開発が繰り広げられてきた。ガラスレーザー、CO₂レーザーに代表される赤外域のレーザーでは既にエネルギー数十kJ（パルス幅数ナノ秒）の核融合研究用レーザーシステムが稼働している。これは一般に波長が長くなるに従ってレーザー媒質でのエネルギー蓄積時間が長く、レーザー励起の条件が緩和され、高効率大出力システムが容易に構成しうるからである。一方、短波長レーザーの目標であったX線レーザーは既に1960年代に提案されながら、その実現まで20年近く要した。これはレーザー発振に必要な励起強度が波長の4乗に逆比例して増加するという厳しい比例則によるものである。最初のX線レーザーの発振は1984年米国物理学会においてローレンスリバモア研とプリンストン大学のグループにより発表された。励起方式はそれぞれ電子衝突励起型、再結合型と異なるものの励起源には前記大出力ガラスレーザー、CO₂レーザーを用いている。すなわちレーザー核融合研究の過程で蓄積されてきた大出力レーザー技術、高精度集光照射システム等の技術基盤にプラズマ中における励起機構の提案が結びついて初めてレーザー発振が可能になったのである¹¹⁾。その後現在に至るまでレーザー核融合研究を行っている各国の研究所を中心にX線レーザー発振の報告が相次いでいる。ここでは、英国クイーンズ大学からの協同研究者とともに阪大レーザー研の激光X II号ガラスレーザー装置を用いて行った電子衝突励起方式ネオン様ゲルマニウム軟X線レーザー（波長19.6nm-28.6nm）の実験結果の概要を紹介する。

X線レーザーの概念図を図3に示す。激光X

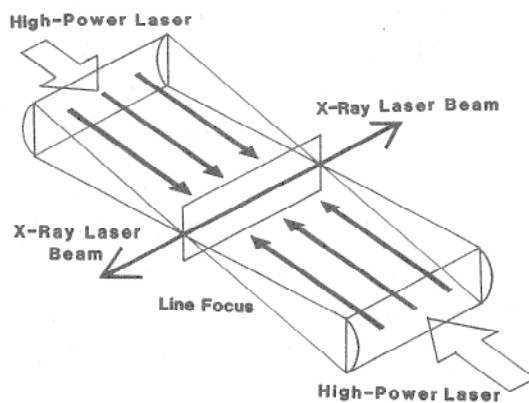


図3 高出力レーザー励起軟X線レーザーの概念図

II号ガラスレーザーの内2本のビームを図のように線状集光し厚さ400nm程度の薄膜ターゲットに照射する。このときレーザーの集光長は6cm、幅約100μmであった。電子温度1keV、電子密度 $5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 程度のプラズマが集光部分に生成されるとほぼレーザーのパルス幅（1ナノ秒）程度にわたりNe様イオンの励起状態間（3p-3s遷移）に反転分布が発生する。このときプラズマ生成用レーザー光強度 $1.7 \times 10^{13} \text{W/cm}^2$ 、波長 $1.05 \mu\text{m}$ であった。ターゲット長を変化し利得を測定すると約 3cm^{-1} であり、最大の利得長積は13.5となった。またこの実験では反射率35%の平面軟X線多層膜鏡をX線レーザーの一端に配置し、X線鏡を用いないときに比べ約50倍のピークX線強度がストロークカメラにより観測された。X線鏡に向かって増幅されてきたX線を鏡で折り返し再度増幅することによりこのような増強がおこったものと考えられる。ただし、この機構によるX線の増強の予測値は実験値よりはるかに大きい。実際増強X線は励起レーザー光ピークの0.3ナノ秒手前から急減している。ショット後にX線反射鏡の後遺損傷が見られており、この時刻に起こった損傷がX線の増強をターミネイトしていると考えられる。今後X線ミラーの改良、配置の最適化等により強力X線レーザーが実現しうる。これまでの実験により得られたX線レーザーのビームエネルギーの最大値は約0.2mJであり数百kWのパワーが得られている。また適当な間隔に配置されたピンホール列による干渉縞

を観測することにより空間コヒーレンスの測定も行った。これらの特性より今後のX線顕微鏡、超微細加工への適用可能性、X線ホログラフィー用光源としての可能性も明らかになった¹²⁾。

4. おわりに

レーザープラズマX線源、レーザープラズマを用いたX線レーザーの現状を紹介したが、紙数の関係で詳細は割愛せざるをえなかった。興味を持たれた読者の方は参考文献として掲げている原著論文、解説論文を参照されることをお勧めする。レーザー核融合研究の副産物として芽生えた研究テーマであるが、今や核融合研究という大樹の周辺で大きな幹、枝葉を成そうとする所まで育ちつつある。関連諸科学との連携をさらに強化し実り多い技術に育て挙げてゆきたいと願っている。

参 考 文 献

- 1) T. S. Luk et al., Opt. Lett. 14, 1113(1989).
- 2) 望月孝晏, 応用物理 56, 2 (1987).
- 3) I. C. E. Turcu et al., Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 1503, 391 (1991).
- 4) 「短波長レーザーとレーザープラズマX線応用技術共同研究グループ, 代表者中井貞雄」レーザープラズマX線応用技術開発共同研究報告書, 平成元年10月, 大阪大学レーザー核融合研究センター; G.M. Zeng et al., J. Appl. Phys. 69, 7460(1991); M. Kuhne and R. Thornagel, X-Ray Microscopy III, A. G. Michette ed. (Springer, Berlin, 1990) pp.39-42.
- 5) 有留宏明他, 重点領域研究「X線結像光学」第3回シンポジウム講演資料集(1992) p. 102.
- 6) 青木貞雄 同上 p.94.
- 7) G. M. Zeng et al., J. Appl. Phys. 67, 3597(1990).
- 8) N. M. Ceglio et al., OSA Proc. Soft-X-ray Projection Lithography, J. Baker, ed. (OSA, Washington, DC 1991) Vol. 12, pp.5-10.
- 9) D. A. Tichenor et al., ibid pp.54-57.
- 10) H. Daido et al., Appl. Phys. Lett. 60, 1155 (1992).
- 11) 大道博行, レーザー研究 18, 861 (1990).
- 12) 加藤義章他, 応用物理 60, 915 (1991).

