



研究ノート

多チャンネル測光およびレーザー
分光法のプラズマ診断への応用

三宅正司*

よく知られているように、核融合を目的とした高温プラズマであれ、溶接工学に不可欠のアーキ熱源のような高密度プラズマであれ、プラズマの温度や電子密度、あるいは中性粒子密度などを決定する上で、分光測定法は中心的役割を果たしている。しかるに一般的に実験室プラズマでは、定常源あるいはパルス源を問わず、プラズマの時間的又空間的変動および不均一性が、測定精度のみならず、研究テーマそのものとしても、大きな問題になる場合が多い。そのため通常の分光器と光電子増倍管による測定では、現象の解明に大きな制約があり、それを克服するために、数個の増倍管をとりつける方法がとられていたが、十分な機能を持つ事が出来ず、適用範囲も限られていた。

さて最近のオプトエレクトロニクスの進歩にともなって、いわゆる多チャンネル測光系の開発や、それを用いた研究が盛んになり、7~8年前から、実用的な市販品が出まわるようになった。分光測定の検出系としては、それは丁度、分光器出射側の写真乾板やフィルムなどと、光電子増倍管が結合したものに对应していて、スペクトル線の一次あるいは二次元像を一度に電気信号としてとり出せるシステムである。これにマイコンを結合させて、大量のデータを蓄積、演算処理出来るため、分光研究者にとっても大いに期待されていたものである。

このようなシステムを使った研究としては、化学反応や分析関係におけるものが最も盛んであるが、プラズマ分光の方面でも5年ほど前から使用されはじめ、最近ではVUV、軟X線に拡張した研究が行われだしている。もちろん市販品としては可視域が主体であり、VUV、軟

X線域については検出器としてMCPを用いた研究が発表されてきている。

我々も数年前から市販品を用いて可視域の多チャンネル測光の研究をはじめ、プラズマからのスペクトル線構造を中心として、多くのデータを得ている。又MCPとこの市販品を結合させた、低エネルギーX線の多チャンネル測光の基礎実験も行った。

さて上に述べた方法は、いわゆる受動分光法としての先端的技術の一つであるが、もう一つの能動分光法としてのレーザー分光も、プラズマ計測の分野においても大いに注目されている。これに類するものとしては、従来、ルビーやYAGあるいはCO₂レーザー等の波長の決まったレーザーを用いた、トムソン散乱計測が中心的役割を果たしていて、プラズマパラメータ決定の標準的方法の一つになっている。ここではそれとは違って、波長可変の色素レーザーを用いた研究について述べる。これは波長可変性を利用する点でレーザー分光というにふさわしい計測法であるが、実際には共鳴散乱あるいはレーザー誘起蛍光法(LIFM)として、プラズマ中の励起原子密度測定や、不純物原子の測定に利用されていて、量子エレクトロニクスの分野や分析関係で注目されているコヒーレント反ストークスマン分光(CARS)やドップラーフリー分光等の、本格的なレーザー分光の適用までには至っていない状態である。我々は一年前から、XeClエキシマレーザー励起型の色素レーザーを用いて、水素プラズマ中のH_α線を対象としたLIFMの研究を開始した。特に散乱光のスペクトル線プロフィールに注目した実験を行い、いくつかの成果を得ている。

以下に我々の行っている、多チャンネル測光とレーザー分光研究の一端を概説する。

まず大気圧に近いHe+H₂気体中で、パルス

*三宅正司(Shoji MIYAKE), 大阪大学, 溶接工学研究所, 溶接熱源熱輸送第1部門(荒田研究室), 助教授, 理博, プラズマ理工学

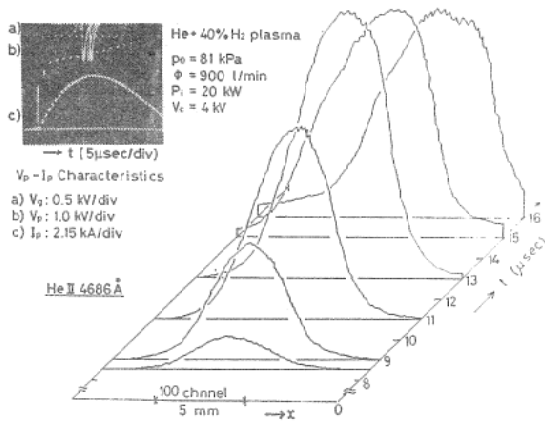


図1 He II 4686 線強度分布の時間変化

大電流アークに対して、可視域の多チャンネル分析器を用いて得たデータを示す。第1図は、アークから放出される、ヘリウムのイオン線(He II 4686 Å)の径方向変化を、時間的に追跡したものである。図の左上に放電の V_p-I_p 特性および光の検出時間とその巾を示す信号が示されている。この図で用いた検出器は、縦2.5 mm、横12.5 mmの受光面積があり、横方向に500チャンネル(1チャンネル25 μ m)の検出素子を持つ、一次元の位置検出系である。この横方向を分光器スリットの高さ方向、即ちプラズマの半径方向に一致させることによって、1ショットごとに、ジュール加熱のある時間での、イオン線全強度の空間分布が得られている。受光時間間隔は1 μ sであり、ショットごとの再現性がよいため、合計6ショットでイオン線の時間、空間的振舞を全体的に把握出来るという効率の良さである。

次に二次元の位置検出器で、同じような実験を行ったデータについて述べる。これは受光面寸法が12.5 mm \times 12.5 mmで、縦横各々500チャンネルの検出素子を持つ。今度は縦方向を分光器スリットの長さ方向に一致させ、さらにそれを何分割かする事により、加熱膨張プラズマの径方向の各点での、スペクトル線プロフィールを、1ショットで得られる事になる。その結果を第2図に示す。図には先に述べたHe II 4686線と、水素バルマー系列の H_{β} 線の両方が示されている。図の左側は、波長方向のスペクトル線プロフィールを、1トラック内に圧縮して全トラックにわたる強度分布(すなわち径方向分

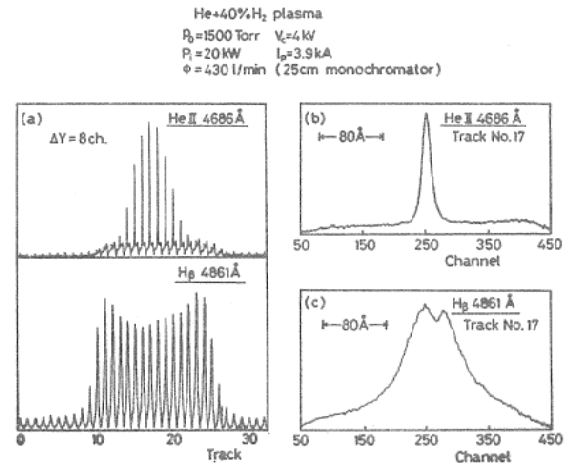


図2 He II 4686 および H_{β} 線プロフィールの径方向分布

布)が示されている。又右側にはあるトラックをぬき出した、スペクトル線プロフィールを与えている。図からよくわかるように、スペクトル線の違いによってそのプロフィールが全く異なる様子や、空間分布における発光場所の違いまで、わずか2ショットでS/Nよく得られている。もちろんこのような図1, 2のデータから、プラズマの温度や電子密度を極めて効率よく算出する事が出来ると共に、プラズマの巨視的安定性や加熱の効率等についても、その場で評価出来る事がわかった。

但しこのようなデータを得るに至る迄には、検出系そのものの持つ品質については、注意深くチェックされなければならない事も明らかになった。特にここで用いた検出器は、蓄積されたデータをパソコンで読み出す方法をとっている事、および像の強度増巾系として、イメージインテンシファイアを用いている事から電子ビーム系の電子光学的諸特性が、得られたデータの信頼性を大きく左右する事がわかり、メーカー側の仕様を全面的に信用してはいけない事も経験した。

さて次に我々は、本システムと先に述べたMCPを結合させて、4 keVの軟X線の多チャンネル測定的基础実験を行った。VUVの領域については、極く最近同様の構成による計測系が論文として発表されたが、軟X線域では、はじめての試みである。VUV、軟X線を問わず、分光器にとりつけて計測する場合には、斜

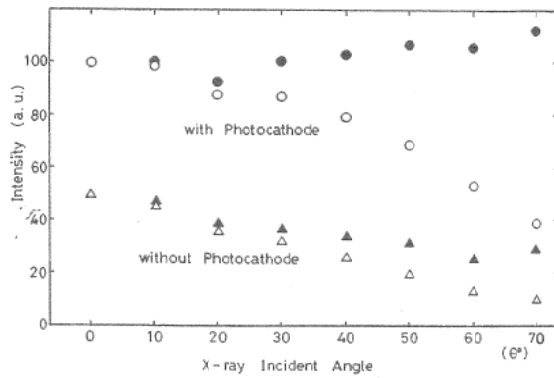


図3 斜入射X線に対する感度

入射分光系を使用しなければならない。しかるに MCP は、斜入射光に対しては感度が著しく低下するといわれている。そこで我々は MCP の前面に、透過型のフォトカソードを密着させて、その低下を補償する方法をとった。第3図はその結果を示す。黒丸がフォトカソードをつけた時の感度のX線入射角依存、黒い三角印がつけない時のそれに対応する。白い丸及び三角印は、補正前のデータである。図からわかるように、フォトカソードをつけると感度は2倍以上になり、かつ、入射角依存性がほとんどなくなっている。もちろんこの時、計測系全体の空間分解能は、フォトカソードをつけても1割程度しか悪くならず、この方法の有効性を確認する事が出来た。

最後にレーザー分光の研究結果の一例を示す。XeCl エキシマレーザー励起型色素レーザーを用いて電子密度 $10^{13} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ の高密度水素プラズマ中の、 H_{α} 線の共鳴散乱の実験を行った。これは通常レーザー誘起蛍光法 (LIFM) とよばれるが、我々は特に散乱光のスペクトル線プロフィールに着目し、第4図のようなデータを得た。すなわち、入射レーザー光が強い時、レーザー波長の変化に対して、スペクトル線が大変広が

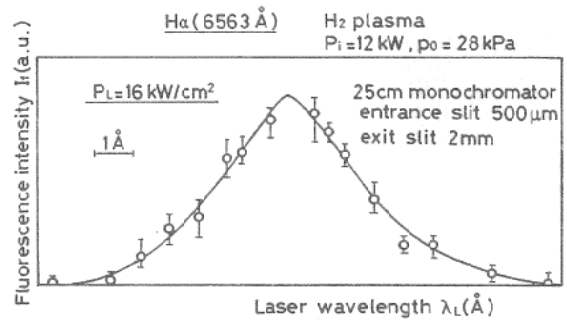


図4 H_{α} 線のパワーブロードニング

り、レーザー強度と共にその広がりが大きくなった。もとの発光スペクトルとしては、 1 \AA 以下しかないのに、図ではすでに、 4 \AA もの半値巾をもった広がりを示している。プラズマ中の共鳴散乱スペクトルにおいて、このような広がりを定量的に検出したのは、我々のデータがはじめてであるが、その機構は、量子エレクトロニクスでよく知られている。「パワーブロードニング」である事が確認された。我々はこの現象を利用すると、プラズマからのスペクトル線の中の、均質広がり、例えばシユタルク広がり的大小を推定出来る事を明らかにした。それはしかも、もとの発光線がドップラー広がりで支配されていても問題がない事も明らかになり、ひいては電子密度の推定にも利用出来る事を示す事が出来た。これは蛍光のスペクトル線プロフィールを調べるという意味で、レーザー分光というに値し、又プラズマ診断の1つの応用例として大変興味深いものであると考えている。

本ノートは筆者等が荒田研で行っている研究をもとにまとめたものであり、ここに荒田教授の日頃の指導と助言に対して感謝の意を表します。