光 ECT による 放電管内プラズマ発光強度分布の動画像化[†]

斎藤 英雄*・畠中 秀晃*
湯浅 邦夫**・弓削 洋二**・中島 真人*

Motion Image Reconstruction of Luminous Intensity Distribution of Plasma in Discharge Tube Using Light Emission Computed Tomography

Hideo SAITO*, Hideaki HATANAKA*,
Kunio YUASA**, Youji YUGE** and Masato NAKAJIMA*

A new method for imaging a temporally varying distribution of the luminous intensity radiated by the plasma in a discharge tube is proposed. In this method, the projection, that is the set of line integrals, of the temporally varying luminous intensity's distribution is measured using a photo detector with a collimator. Measurement of the temporal variation of each projection is synchronized with the period of the temporal variation of the discharge phenomenon. From the projections at an arbitrary time of the temporal variation, the luminous intensity distribution at the time can be reconstructed using the CT algorithm. For demonstrating the efficacy of the proposed method, the reconstructed images of the time varying luminous intensity's distribution inside a mercury discharge tube are shown.

Key Words : computed tomography, plasma luminescence, discharge tube, motion image, image reconstruction

1. はじめに

本研究の目的は、時間的に変化する放電管内プラズマ発光強度分布を、光 ECT 手法を用いて動画像として映像化する手法を提案することである。

これまでに、CT 手法(コンピュータ断層映像法)¹⁾を応用することにより、プラズマ発光や炎などの内部における発光強度の空間的分布を被検体に対して無侵襲に断層像として映像化する。光 ECT 手法が中島らによって提案されている^{2)~4)}。CT 手法は医用分野において研究さ

れてきたものであるが、近年では工業分野への応用も盛んに行われてきており、これまでに電界分布⁵⁾や磁界分布^{6),7)}の映像化への CT 手法の適用例、工業製品の非破壊検査への応用例^{8),9)}などが報告されている。中島らの提案した光 ECT 手法も、CT 手法の工業分野への応用例の一つであり、放電管のプラズマ発光や、炎などから発せられる発光強度分布を、コリメータをとおして測定することにより発光の線積分値群を求め、これを投影データとして CT アルゴリズムを適用することにより発光強度の空間的分布を断層像として映像化するというものである。

プラズマを測定するために用いられている従来の方法は、プラズマに対してプローブを挿入したり、マイクロ波やレーザー光などを作用させることにより測定するものであり、プラズマ分布そのものを乱す可能性があった。また、プラズマ内部の空間分布を把握することが困難でもあった。これに対して、中島らの提案した光 ECT 手法

[†] 第 31 回計測自動制御学会学術講演会で発表(1992・7)

* 慶應義塾大学理工学部 横浜市港北区日吉 3-14-1

** 東芝ライテック(株) 横須賀市船越町 1-201-1

* Faculty of Science and Technology, Keio University, Yokohama

** Toshiba Lighting & Technology Corp., Yokosuka
(Received August 24, 1992)
(Revised February 15, 1993)

の特長は、被検体の発光分布を乱すことなく無侵襲に内部の分布を映像化できることである。これまでに、この光 ECT 手法を、放電管内部の発光現象の解明を目的に用いたり¹⁰⁾、放電管以外の各種プラズマの測定^{11),12)}に適用した例が報告されている。

さて、これまでの光 ECT において得られる投影データは、時間的に平均化されたものであり、得られる再構成画像も時間的に平均化されたものになっていた。このため、交流電圧により発光する放電管のように、時間的変動を伴うプラズマ発光の時間的変化を把握することはできなかった。しかし、発光の時間的変化、すなわち過渡特性を測定することができれば、プラズマ診断に更に有用な情報が得られると期待される。

そこで、本研究では、これまで行われてきた光 ECT 手法に関する研究の成果を更に発展させ、時間的に変化するプラズマ発光強度分布の時間変化もあわせて測定し、分布の時間的変化を動画像として映像化する手法を提案する。本手法では、投影データの各サンプルに対応する各積分路において、発光強度の線積分値の時間変化を発光変動の基本周期に同期させながら測定する。このようにして全投影データの時間変化を測定し、各時刻における投影データに CT アルゴリズムを順次適用してゆくことにより、各時刻での発光強度分布を再構成してゆく。そして、これらを連続的に表示することにより動画像化を行うというものである。

本論文では、光 ECT によるプラズマ発光強度分布の動画像化のための原理を説明し、更に本手法の有効性を検証するために行った、水銀放電管内部の発光強度分布を動画像化する実験について述べ、この実験により得られた水銀放電管内部のプラズマ発光強度分布の再構成画像を示し、本手法の有効性を検証する。

2. 原 理

2.1 光 ECT の原理

CT 手法とは対象物体の任意断面上における 2 次元物理量分布の線積分値で表わされる投影データから、その断面における物理量分布を再構成することにより映像化する手法である。光 ECT では、Fig. 1 に示すように、発光物体に対してコリメータをとおして発光強度を測定することにより、任意断面上における発光強度分布の投影データを得る。コリメータは任意の直線上の発光だけを選択的に測定するためのものであり、ここでは両端に小さな穴の開いた筒をコリメータとして用いている。コリメータをとおして測定される光の強度は、発光物体の発光強度分布をコリメータの中心軸に沿って線積分した値と考えられ、コリメータを Fig. 1 に示すように走査する

ことにより、断面全体にわたって発光強度の線積分値を得ることができる。この線積分値群が、対象断面における発光強度分布の投影データに相当するのである。対象断面における発光強度分布を $A(x, y)$ とし、これに対するコリメータの位置を Fig. 2 のように表わすと、測定される光強度すなわち $A(x, y)$ の投影データは次式で表わすことができる。

$$P(\phi, \theta) = \int_l A(x, y) dl \quad (1)$$

ただし、 l はコリメータの中心軸に沿った直線を表わす。

この投影データを、投影角 θ すなわち発光物体に対するコリメータの位置を変えて多方向から収集し、これらの投影データに CT アルゴリズム¹⁾を適用することにより、発光強度分布 $A(x, y)$ を再構成することができる。以上が、光 ECT による発光物体の発光強度分布映像化の原理である。

2.2 動画像化の原理

光 ECT 手法により発光強度分布の時間的変化を測定するためには、分布を再構成するために必要な全投影データの時間的変化を同時に測定する必要がある。しかし、Fig. 1 のようにして投影データを測定する場合は、同時に一つの線積分値しか測定できない。

Fig. 1 Scheme for measuring the projection data of the luminous intensity's distribution.

Fig. 2 Relationship between the luminous intensity's distribution and the position of the collimator.

Fig. 3 The measured temporal variations of the line integrals of the luminous intensity's distribution. The set of the integrals at time t_i is the projection data at t_i . Applying the projection data to the CT algorithm, the luminous intensity's distribution at the time t_i is reconstructed.

そこで本手法では、測定対象として周期的に時間的変化している発光物体を想定した。発光の時間的変化が周期的であると考え、各積分路における発光強度の線積分値の時間変化を、変動の周期に同期させながら一周ずつ測定する。このようにして全投影データにおける各線積分値の時間変化を変動の一周にわたり収集し、Fig. 3 に示すように、変動周期内の時刻ごとにおける発光強度分布の投影データを得る。そして、任意の時刻 t_i での全方向の投影データに CT アルゴリズムを適用することにより、その時刻 t_i での発光強度分布 $A(x, y)$ を再構成する。この再構成を周期内の全時刻において行うことにより、発光強度分布 $A(x, y)$ の時間変化が得られる。更に、これらを連続的に表示することによって発光強度分布が動画画像化される。

3. 実験

3.1 実験システム

本研究で示した手法の有効性を確認するために、50 Hz の交流電源により発光している水銀放電管内部の発光強度分布を動画画像化する実験を行った。実験システムは、被検体の周囲にコリメータを回転させるための機械部分、被検体からの発光の測定系、そして投影データの収集を制御するためのコンピュータから構成されている。実験システムの構成を Fig. 4 に示す。

コリメータは、Fig. 5 に示すように、長さ 50 mm、前面開口の直径 0.5 mm、後方の端面にコア径 0.2 mm のプラスチック光ファイバを取り付けたものである。このコリメータが首振り走査することにより、発光強度分布の一方方向からの投影データが収集される。コリメータの首振り角度は、Fig. 2 における ϕ に相当する。また、コリメータの取付けられているステージが被検体となる発光物体の周囲を回転移動することにより、各方向からの投影データを収集する。この回転角が、Fig. 2 における θ

に相当する。本システムでは、コリメータの首振り角 ϕ については 0.25° おき 127 サンプル、ステージの回転角 θ については 3° おき 120 方向の測定が行われる。また、コリメータの首振りの中心と被検体領域の中心の距離は 120 mm である。なお、本実験において被検体とする放電管の外直径は、後に述べるように 26 mm であり、この放電管の内部を通り再構成に有効な線積分値を与えるサンプルは、コリメータの首振り角 ϕ に関する 127 サンプルの線積分値のうち、51 サンプルになる。Photo. 1 にデータ収集部の写真を示す。

コリメータを通った光は、この光ファイバにより光電子増倍管に導かれ、電気信号に変換される。光電子増倍管は、浜松フォトニクス(株)製 S-20(可視光用)であり、950 V の電圧で使用した。ここで、光電子増倍管の入口に干渉フィルタ(日本真空光学社製・20 mm ϕ)を取り付け

Fig. 4 The experimental arrangement for imaging the temporally varying luminous intensity's distribution inside a discharge tube.

Fig. 5 Collimator.

Photo. 1 Photograph of the mechanism which rotates the collimator on the stage around the discharge tube.

ることにより、任意の波長の発光のみを測定する。光電子増倍管の出力は、電圧増幅器(TEAC 社製・SA-56)を用いて 100 倍に増幅されたのち、12 bit の A/D 変換ボード(CONTEC 社製・A/D12-16A(98))により A/D 変換されてコンピュータに取り込まれる。この出力の時間変化は、各積分路における発光の線積分値の時間的変動波形に相当し、本実験では、サンプリング時間を 0.16 ms として、放電管の 1 周期あたり 128 サンプルのデータがコンピュータに取り込まれた。

本手法では、周期的に変化する放電を繰返し測定することにより、各時刻の投影データが得られる。このため、各周期において放電に再現性がなければ正確な測定ができなくなる。そこで、本実験では放電管の電源として交流安定化電源(TAKASAGO LTD. 社製・AA510)を用いて、放電管に流れる電流の安定性に留意した。

こうして収集された投影データの時間変動波形から、各時刻における発光強度分布の再構成を行った。また、それらの再構成画像を連続的に表示することにより動画画像を行い、VTR に記録した。この動画画像は、3.2 節に示す再構成画像を連続表示したものである。Fig. 6 に本実験の測定条件、Table 1 に再構成の条件を示す。

本実験では、光の検出に光電子増倍管を使用した。このほかに光の検出に幅広く用いられているのが CCD である。CCD を用いれば、一度に複数の光強度の測定が可能⁴⁾であり、本研究のように発光の時間的な変動を測

定する場合などには、データの収集が容易になるものと思われる。しかしながら、微弱な光や紫外の波長の光は光電子増倍管を用いなければ測定が困難であり、放電管の測定では紫外波長の発光強度分布の測定も必要になる場合があることを考慮して、本研究では光電子増倍管を発光の測定に使用した。

3.2 実験結果

ここでは、前節に述べた実験システムにより測定した、水銀放電管内部のプラズマ発光強度分布の時間変化を示す。

使用した水銀放電管は、長さ 435 mm、外直径 26 mm、ガラス管の厚さ 1 mm の円筒形状の放電管である。また、放電管内部の Hg 分圧は 40°C において 6 ミリ torr であり、さらに Ar が分圧 2.5 torr 程度で封入されている。そしてこの放電管を、100 V 50 Hz の交流安定化電源を用いて、0.6 A の交流電流により放電させた。

測定した光の波長は、水銀のスペクトルのうち、546 nm、436 nm の 2 種類である。546 nm の測定には、中心波長 546.5 nm、最大透過率 46%、半値幅 8 nm の干渉フィルタを使用し、436 nm の測定には、中心波長 441 nm、最大透過率 39.5%、半値幅 8.5 nm の干渉フィルタを使用した。

本実験では、Fig. 7 に示した 10 断面において、0.16 ms おきの 128 枚の再構成画像が得られる。そして、時刻ごとに得られている 10 枚の 2 次元断層像から放電管内部の 3 次元発光強度分布を示すため、Fig. 8 のように切断した円筒の表面における発光強度分布と、10 断面のうち 5 断面における横断面再構成画像を表示した。ここで、円筒の縦断面における発光強度分布は、実際に得られた 10 枚の横断面再構成画像から、円筒の縦方向に線形補間して作成したものである。

Fig. 9 は、波長 546 nm の発光強度分布の 3 次元再構成画像である。ここで示されている 8 枚の再構成画像は、

Fig. 6 Conditions of the experiment.

Table 1 Conditions of the image reconstruction

reconstructed image	128×128 pixel
pixel size	0.5 mm×0.5 mm
reconstruction algorithm	Filtered Back Projection

Fig. 7 The reconstructed layers in the discharge tube.

Fig. 8 Pseudo 3-D display of the luminous intensity distribution inside the tube.

発光の時間変化の 1 周期にわたって得られた 128 枚の再構成画像の代表例である．ここで用いた水銀放電管の発光はグロー放電によるものであり，Fig. 11 のように，陰極付近では電極からの距離に応じて放電状態が空間的に変化することが知られている．(b) の $t_i=32/128$ cycle の画像は，電極が陽極になっている状態の発光強度分布に相当する．グロー放電の場合は，陽極付近では全体的に発光状態が均一な陽光柱になることが知られているが，その様子が(b)に観察される．一方，(f)の $t_i=96/128$ cycle における画像は電極に負電圧がかかり陰極になっている状態の放電に相当するものであるが，こ

Fig. 9 3-D reconstructed images of the distribution of the temporally varying luminous intensity inside the tube. The measured wavelength is 546 nm.

Fig. 10 3-D reconstructed images of the distribution of the temporally varying luminous intensity inside the tube. The measured wavelength is 436 nm.

Fig. 11 Distribution of the luminescence of the glow discharge.

ここでは、電極からの順に負グロー、ファラデー暗部、陽光柱と放電状態が変化している様子が観察される。Fig. 10 は波長 436 nm の発光強度分布の 3 次元再構成画像である。これも Fig. 9 と同様の放電状態を示している。Fig. 9 および Fig. 10 に示した再構成画像にみうけられる多少の雑音は、コリメータを通過した光を検出するために用いた光電子増倍管において発生したものであり、光電子増倍管の熱雑音や光子の量子雑音が原因と考えられる。

4. 考 察

本手法では、コリメータにより発光強度分布の線積分値を測定したが、実際には、(1)コリメータの開口、(2)光の減衰、(3)ガラス容器の境界における光の屈折などの影響により、正確な線積分値は測定されていないために、再構成画像が劣化していると考えられる。

真の線積分値を得るためには、コリメータの開口は無限に小さくしなければならないが、実際には Fig. 12(a) に示すように、コリメータ開口の立体角にみこまれる範囲の発光の総和が測定されている。この影響は、再構成画像の空間分解能を低下させる。コリメータの開口角を小さくすれば空間分解能は向上するものの、測定感度が低下してしまうため、十分な感度を得るためにはある程度の開口が必要になる。したがって、再構成画像の空間分解能の向上を図るためには、高感度の光検出器を用いて、コリメータの開口角を小さくすることだけでなく、コリメータ開口の影響を補正するアルゴリズムを開発し、ソフトウェア的に分解能を改善することも重要⁽¹³⁾である。

光がコリメータに到達するまでに減衰することによる影響も本手法の問題点として考えられる。特に紫外線の減衰率は大きいので、放電管内部の紫外線の強度分布を

Fig. 12 (a) Influence of the aperture of the collimator. The measured value is not the precise line integral but the integral of the luminescence in the range of the solid angle of the collimator's aperture. (b) Influence of the light refraction at the boundary of the glass of the tube. The refraction changes the integral path inside the tube.

測定する場合には、光の減衰による影響を無視することができない。この光の減衰を補正するためには、医用のシングルフォトンエミッション CT (SPECT) における減衰補正法^(14,15)と同様なアルゴリズムが適用可能と考えられる。

さらに、ガラス容器の境界における光の屈折の影響も問題点として挙げられる。Fig. 12(b) に示すように、屈折により測定される線積分路が変わってしまうため再構成画像が乱れてしまうのである。この屈折による積分路の変化は、同じガラス管厚ならば形状の曲率が大きいほど大きくなる。本実験で測定したガラス管は、外直径 26 mm に対しガラス管の厚さ 1 mm であり、形状の曲率に対してガラス管が薄いものであるため、屈折の影響は無視できる程度に小さい。このことは、計算機シミュレーションによるレイトレーシングの結果からも確認した。しかし、同程度の太さで同程度の管厚の放電管であっても、楕円のように形状の曲率が部分的に大きくなるような断面形状の放電管においては、屈折による光の経路の変動が大きくなり、再構成画像を著しく劣化させてしまうと考えられる。さらに、ガラス管壁における画質劣化要因としては、光の反射や吸収が挙げられ、これらの影響も高精度な測定を行う際には無視できないと考えられる。

これらの問題点は、実用的には解決してゆかなければならないものであり、今後、これらの問題点をソフトウェア的に補正する手法について検討する予定である。

5. おわりに

光 ECT 手法を用いて、時間的に変化する放電管内部の発光強度分布を動画像化する手法を提案した。また、50 Hz の交流電流により発光している水銀放電管内部の発光強度分布の実験を行い、その 3 次元再構成画像を動画像化することにより本手法の有効性を検証した。更に、

提案手法の実用化のために解決すべき問題点を示した。

本研究の一部は、慶應義塾学事振興資金の補助により行われた。

参考文献

- 1) A. C. Kak and M. Slaney : Principle of Computerized Tomographic Imaging, IEEE Press, New York (1988)
- 2) H. Uchiyama, M. Nakajima and S. Yuta : Measurement of Flame Temperature Distribution by IR Emission Computed Tomography, Applied Optics, **24**-23, 4111/4116 (1985)
- 3) M. Hino, T. Aono, M. Nakajima and S. Yuta : Light Emission Computed Tomography System for Plasma Diagnostics, Applied Optics, **26**-22, 4742/4746 (1987)
- 4) 久保田, 稲森, 川村, 中島 : レンズ系を用いた光 ECT の開発, 第 4 回産業における画像センシングシンポジウム講演論文集, 11/16 (1989)
- 5) H. M. Hertz : Kerr Effect Tomography for Noninvasive Spatially Resolved Measurements of Asymmetric Electric Field Distributions, Applied Optics, **25**-6, 914/921 (1986)
- 6) H. Saito, F. Saito, S. Yuta and M. Nakajima : High Speed Data Collection System for Magnetic Field Imaging by CT Technique, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, **IM-39**-5, 739/744 (1990)
- 7) H. Shinada, S. Fukuhara, S. Seitou, H. Todokoro, S. Otomo, H. Takano and K. Shiiki : Dynamic Micro-magnetic Field Measurement by Stroboscopic Electron Beam Tomography, IEEE Transactions on Magnetics, **MAG-28**-2, 1017/1023 (1992)
- 8) S. Persson and E. Osteman : Use of Computed Tomography in Nondestructive Testing of Polymeric Materials, Applied Optics, **24**-23, 4095/4104 (1985)
- 9) Y. Tomikawa, Y. Iwase, K. Arita and H. Yamada : Nondestructive Inspection of a Wooden Pole Using Ultrasonic Computed Tomography, IEEE Transactions Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, **UFFC-33**-4, 354/358 (1986)
- 10) 湯浅, 本田, 弓削, 内田, 中島 : 光 CT 法による偏平断面蛍光ランプ中の励起種分布の測定, 光源物性とその応用研究会資料, **PE 90**-2, 11/20 (1991)
- 11) 沈, 高村 : 計算機トモグラフィによるプラズマ断面像の再生, 第 4 回産業における画像センシングシンポジウム講演論文集, 17/22 (1989)
- 12) 三宅, 伊藤, 中江川, 真壁 : CT による DC マグネトロン放電プラズマ中の電子と Ar^+ の空間密度分布の測定, 第 38 回応用物理学学会関係連合講演会講演論文集, 31 a-Zc-10 (1991)
- 13) 岩田, 吉田, 中島, 尾川, 油田 : エミッション CT におけるコリメータ開口特性の補正法, 電子通信学会論文誌 D, **J68-D**-6, 1312/1319 (1985)
- 14) L. T. Chang : Attenuation Correction and Incomplete Projection in Single Photon Emission Computed Tomography, IEEE Transactions on Nuclear Science, **NS-26**-2, 2780/2789 (1979)
- 15) 諸角, 中島, 尾川, 油田 : 減衰の有無により計算される 2 つの投影の比を用いる SPECT のための減衰補正法, 電

子通信学会論文誌 D, **J67-D**-7, 800/806 (1984)

[著者紹介]

斎藤 英雄 (正会員)

1992 年, 慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程修了。同年同大学理工学部電気工学科助手, 現在に至る。CT 手法の工業的応用, 画像処理の研究に従事。電子情報通信学会, 情報処理学会, 可視化情報学会などの会員 (工学博士)。

畠中 秀晃

1992 年, 慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。同年松下電器産業 (株) 入社, 現在に至る。在学中, CT 手法の工業的応用の研究に従事。電子情報通信学会の会員。

湯浅 邦夫

1976 年, 京都工芸繊維大学工学学部電子工学科卒業。78 年京都大学大学院修士課程修了。同年 (株) 東芝に入社。83~84 年オランダアイントフォーベン工科大学に研究留学。89 年東芝ライテック (株) 発足に伴い移籍, 現在に至る。主として低圧放電ランプにおける放電現象の研究に従事。照明学会, 応用物理学学会などの会員。

弓削 洋二

1968 年, 岡山大学理学部物理学科卒業。同年 (株) 東芝入社。89 年東芝ライテック (株) に転籍, 現在に至る。光源 (ハロゲンランプ, 放電ランプ), 光源材料の研究・開発に従事。照明学会の会員。

中島 真人 (正会員)

1973 年, 慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程修了。72 年同大学工学部電気工学科助手。88 年同大学理工学部電気工学科教授, 現在に至る。CT 手法, 画像処理, 超音波の応用などの研究に従事。電子情報通信学会, 電気学会, 日本超音波医学会などの会員 (工学博士)。