レンズ系を用いた光 E C T 法の高画質化

正員 寺田 賢 治 (慶應大)

正員 久保田 孝 介 (慶應大)

非会員 三 井 麻 水 (慶應大)

正員 中 島 真 人 (慶應大)

High Quality Imaging utilizing Light Emission Computed Tomography with Lens system

Kenji Terada, Member (Keio University)

Kousuke Kubota, Member (Keio University)

Asami Mitsui, Nonmember (Keio University)

Masato Nakajima, Member (Keio University)

To perform the effective application of plasma phenomena, the measurement of a radiation intensity distribution on an arbitrary internal cross-section is very important. We have already proposed "Light Emission Computed Tomography (LECT)" and succeeded in reconstructing a radiation intensity distribution. But very long data collection time is necessary to obtain the good reconstructed image by the conventional system. Therefore in order to reduce time for collecting the data, we have developed a new LECT system which uses a detector consisting of cylindrical lens and CCD device. And we have developed a new algorithm to reconstruct the tomographic layer. But when a discharge tube vessel is thick, the projection data in this system are degraded by refraction and reflection of rays on a discharge tube vessel. Therefore in this paper, we propose a method for obtaining high quality images using this LECT system. In this method, we perform the reconstruction with the consideration of the effect of the refraction and the reflection of rays upon the projection data. The experiments using the experimental system are performed to demonstrate the efficacy of this method and the experimental results are shown.

キーワード：プラズマ，計算機断層映像法，再構成，プラズマ計測，発光強度分布

1. まえがき

プラズマ現象の応用は、核融合、レーザー等、極めて広範な領域に渡っている。これらの現象を利用した新たな技術や装置の研究開発を行なう上で、プラズマ内部の状態を正確に把握することは非常に重要であり、特に無侵襲で高速かつ簡単な計測手法の開発に対する要求は大きい。これまでに、レーザーやマイクロ波をプラズマに入射し、内部での散乱、吸収、屈折、励起蛍光などを測定する能動的な計測手法も種々提案されている⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾。しかしこれらの手法は、大がかりな装置が必要であったり、測定が1点ごとで煩雑であるなど、実用的なものではなかった。また測定対象となるプラズマが軸対象の分布を有している場合には、アーベル変換よりその2次元的な分布を得ることができたが⁽⁶⁾、

適用できる対象が限られ、実用性に乏しいものであった。

そこで筆者らはプラズマ内部の任意断面における波長ごとの発光強度分布を無侵襲、非接触に映像化する手法として、光 E C T 法を既に提案している⁽⁸⁾⁽⁹⁾。これは、対象物内部にある発光源から放射される光を、対象物外部から投影データとして計測し、これに C T アルゴリズム⁽⁷⁾⁽⁹⁾を適用することによって、その任意横断面における発光強度分布を映像化する手法である。この光 E C T 法には、データ収集部にコリメータ系を用いる手法⁽⁸⁾と、レンズ系を用いる手法⁽⁹⁾があるが、後者のレンズ系による光 E C T 法は、投影データを高速、高効率に計測できる点で有利である。

しかし光 E C T 法を、放電管内部に生じる気体プラズマの発光強度分布の映像化に適用した場合、放電管外部に放射される光は、必ず放電管の容器管壁において屈折および

反射しており、測定される投影データはこの影響によって劣化を受けている。このような投影データの劣化は、再構成画像の画質劣化の原因となる。この放電管容器の管壁における光の屈折と反射は、光ECT法特有の画質劣化要因であり、本手法の実用のためには、この屈折反射を考慮した像再構成法の開発が必要不可欠である。

そこで本論文では、レンズ系により得られる劣化した投影データから、高画質の再構成画像を得るための手法を提案する。従来の手法では、レンズ系の再構成に必要な寄与率の分布⁽⁹⁾を、実測により作成していたのに対して、本手法では、放電管容器が被検体領域にあることを考慮して計算機上で作成するものである。本論文ではさらに、肉厚の容器を持つ放電管を用いて、大きく劣化した投影データから画像再構成を行う実験により、本手法の有効性を検証する。

2. レンズ系を用いた光ECT法の原理

図1に筆者らが既に提案しているレンズ系による投影データ収集の概念を示す⁽⁹⁾。この手法ではデータ収集部に、円筒レンズ、CCD素子、ダブル・スリットからなるレンズ系を使用する。これは、縦方向に曲率を持たない円筒レンズを使用し、その前後にダブル・スリットを配置することにより、CCD素子に被検体の測定断面以外からの発光が入射しないようにしている。このようなデータ収集部を用いることにより、被検体の測定断面上に存在する発光源から一方向に放射される光全てを、機械的な走査を一切行うことなくCCD素子上に取り込むことができる。このデータ収集部を被検体の周囲に一周させ、投影データを多方向から計測することにより、測定面の発光強度分布を映像化する。

一般のCT再構成法⁽⁷⁾は、得られた投影データが映像化しようとする物理量分布の線積分値群である時にのみ適用できる演算法である。しかし、レンズ系を用いたデータ収集部では図2に示すように、CCD素子上の一点に、その点に対応する領域内にある全ての発光源からの放射光が入

図1 レンズ系によるデータ収集
Fig. 1 Data collection using a lens system

図2 レンズ系で得られる投影データ
Fig. 2 Projection data measured by a lens system

射するため、得られる投影データは測定断面の発光強度分布の線積分値群とはならない。したがって、以下に示すようなレンズ系で得られる投影データから被検体の発光強度分布を映像化するための固有の像再構成アルゴリズムを提案している⁽⁹⁾。

まず、被検体領域内の全ての点に単位強度の点発光源が存在した場合、各々の点発光源からCCD素子上の任意の点へ入射する光の強度を“寄与率”と呼ぶことにする。そしてこの寄与率を、CCD素子上の位置 s と被検体領域内の位置 (x,y) を変数とし、 $w(s,x,y)$ と表現する。図3はCCD素子上の任意の一点 s_1 に対する被検体領域内の各位置における寄与率の値の分布を概念的に示したものである。この寄与率を用いれば、被検体領域に任意の発光強度分布 $I(x,y)$ が存在する時に、CCD素子上の点 s で得られる投影データ $p(s)$ は、(1)式のように被検体領域内の各点の寄与率の値と発光強度との積を、被検体領域全域にわたって積分した値として表わすことができる。

$$p(s)=\int\int I(x,y)w(s,x,y)dxdy. \tag{1}$$

本手法では、実際の被検体の測定を行う前に、この寄与率の分布をあらかじめ作成しておき、これを既知のものとして画像再構成に用いる。

3. 劣化した投影データからの像再構成法

従来法では、寄与率は、被検体領域内に点光源を置き、これを移動させながらCCD素子の各点に入射する光の強

図3 寄与率の概念
Fig. 3 Schema of a contribution rate

度を測定していくことによって作成していた⁽⁹⁾。しかし図 4 に示すような実際の被検体から得られる投影データに屈折、反射による劣化が含まれている場合は、この寄与率を用いて像再構成を行うと、再構成画像に大きな画質劣化が生じてしまう。これは、寄与率に屈折、反射の影響が考慮されていないからであるが、屈折、反射の影響を考慮させるために、プラズマ容器内部で点光源を移動させ、実際に寄与率を作成することは不可能である。そこで本手法では、寄与率の分布を実測にて作成するのではなく、放電管容器が被検体領域にあることを考慮しながら、計算機上で作成する。

この処理は、放電管容器内部の各点に単位強度の点発光源が存在する時、それぞれの発光源から容器管壁において屈折、反射をした後、CCD 素子上の任意の点に入射する光の強度を考えて寄与率の分布を作成するものである。このため新たな寄与率には、放電管容器の管壁における光の屈折、反射の影響が考慮されているため、これを像再構成に用いれば、投影データの劣化までも考慮した再構成画像を得ることができる。本手法によれば、従来のレンズ系の像再構成アルゴリズムに、上述の寄与率を適用するだけで、劣化した投影データから高画質の再構成画像を得ることが可能である。

屈折、反射の影響を含む寄与率を作成するためには、まず放電管容器の形状を計測し、この計測値を用いて計算機上でレイ・トレーシングを行う。この計算機による寄与率

図 4 劣化した投影データ
Fig. 4 Degraded projection data

図 5 寄与率の作成方法
Fig. 5 Method of making up a contribution rate

の作成方法を図 5 に示す。被検体領域内の任意の一点に単位強度の点光源があると仮定し、この光源から一定の微小角度おきに光線を放ち、これらの光線を追跡していくことによって、CCD 素子の各部に入射する光の強度を計算する。この光線追跡を、放電管容器内のあらゆる位置に点光源が置かれている場合について行うことにより、屈折、反射の影響を含んだ寄与率の分布が作成される。

管壁におけるレイ・トレーシングを行なう際には、入射光線（入射角 θ ）に対して反射光線と媒質の境界面法線のなす角（反射角 θ' ）及び屈折光線と境界面法線のなす角（屈折角 ϕ ）、強さの反射率 R 及び透過率 T を計算する必要がある。まず図 6 に示すように光の反射角 θ' は入射角 θ と等しく、また屈折角 ϕ はスネルの法則

$$n_1 \sin \theta = n_2 \sin \phi, \quad (2)$$

で求めることができる（ただし、 n_1 、 n_2 は各々入射側、屈折側の媒質の屈折率）。また光の振幅の反射率 r と透過率 t は、電磁波の理論より、次の式によって表されることが知られている。

$$r_p = \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2}, \quad (3)$$

$$r_s = \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2}, \quad (4)$$

$$t_p = \frac{n_1}{n_2} \frac{2N_1}{N_1 + N_2}, \quad (5)$$

$$t_s = \frac{2N_1}{N_1 + N_2}. \quad (6)$$

(a) 入射角と反射角

(b) 入射角と屈折角

図 6 管壁における屈折反射

Fig. 6 Refraction and reflection of rays
on a discharge tube vessel

(a) angle of refraction (b) angle of reflection

ただし、 r_p , t_p のとき、 $N_1 = \cos \theta / n_1$, $N_2 = \cos \phi / n_2$, r_s , t_s のとき、 $N_1 = n_1 \cos \theta$, $N_2 = n_2 \cos \phi$ であり、添字の p , s は電磁波の振動面が入射面に平行及び垂直の意味で、磁場波の成分についてはこの逆になる。これらの式により、反射光、屈折光の強度の反射率 R 、透過率 T は、

$$R = \frac{r_p^2 + r_s^2}{2}, \quad (7)$$

$$T = \frac{t_p^2 + t_s^2}{2}. \quad (8)$$

により求めることができる。

これらの関係を用いて行なったレイトレーシングの一例について示す。図7 (a)(b) は、ある放電管容器内の任意の位置の単位点光源 (強度 1.0) から 0.01 度おき (これ以上小さくしても結果にほとんど影響を与えないことは、調査済み) に放射された光線のうち、1本の光線を追跡した様子を示したものである。図中の線は放射された光線の経路を示し、数字がその強度を表す。このように放電管内の発光は、屈折、反射の影響を受けていることがわかる。

図8に、放電管容器内のあらゆる位置に点光源を置き、直接透過する光と放電管容器の内壁または外壁で1回反射する光までを全て追跡し、CCD素子の各部に入射する光の強度を求めた寄与率分布の一例を示す。これはCCD素子のあるサンプル点 ($s=0 \sim 91$ の中の $s=23$) に対する被検体領域内の各点における寄与率の値の分布を表示している。(a) は劣化要因の全くない理想系における寄与率、(b) は屈折、反射の影響を考慮した寄与率の分布の一例である。この二つの寄与率の分布は大きく異なっており、特に(b)では容器管壁での反射光がCCD素子に入射することによる寄与率の値の分布 (図中矢印) が確認できる。

図7 レイトレーシングの例

Fig. 7 Examples of ray-tracing

(a) Example 1 (b) Example 2

(a) 考慮なし

(b) 考慮あり

図8 寄与率分布の一例

Fig. 8 Examples of contribution rate

(a) without consideration (b) with consideration

図9 実験システムの構成

Fig. 9 Diagram of experimental apparatus

図10 4対の針状対向電極を持つ放電管

Fig. 10 Experimental objects which are discharge tubes with 4 pairs of point electrodes

またここで、1 回の反射までしか考慮していないのは、さらに 2 回の反射までを考慮したレイトレーシングを行なっても、結果に変化が見られないためである。複雑な形状の容器を対象とする場合などには、2 回以上の反射を経る光線を考慮する必要があると思われるが、本論文にて対象としているプラズマ容器では、1 回の反射まで十分であると思われる。

4. 有効性の検証

本論文で提案した手法の有効性を検証するため、図 9 に示すレンズ系のデータ収集システム⁽⁹⁾により得られる劣化した投影データから像再構成を行なう実験を行った。データ収集システムは、CCD 素子と円筒レンズから構成されるデータ収集部を、ステッピングモータにより駆動される回転台に固定したもので、操作はすべて計算機によって制御されており、全方向からの投影データを約 23 秒で自動的に収集することができる。

まず、図 10 に示す肉厚の円筒系容器内に 4 対の針状対向電極を配置した放電管について実験を行なった。ここで放電管容器は、図 10 (a) に示すような内径 45.0mm、外径 55.0mm、肉厚 5.0mm、屈折率 1.51 のガラス円管と、図 10 (b) に示す内径 43.6mm、外径 64.9mm、肉厚 10.7mm、屈折率 1.49 のアクリル円管の 2 種を用いた。この実験では、測定した投影データは 3.6 度おき 100 方向、投影データのサンプル数は 1 方向につき 92 点、再構成画像は 64 × 64 pixel (1 pixel = 0.5mm × 0.5mm) である。

図 11 寄与率
Fig. 11 Examples of contribution rate
(a) Tube A (b) Tube B

(a) 考慮なし

(b) 考慮あり

図 12 再構成画像 (容器 A)

Fig. 12 Reconstructed image (Tube A)
(a) without consideration (b) with consideration

(a) 考慮なし

(b) 考慮あり

図 13 再構成画像 (容器 B)

Fig. 13 Reconstructed image (Tube B)
(a) without consideration (b) with consideration

前節で述べた手法により屈折、反射を含んだ寄与率を作成すると図 11 のようになった。ここでは、CCD 素子上の各サンプル点 $s(0 \sim 91)$ に対する被検体領域内の各点における寄与率の値の分布を表示している。 $s = 0$ および $s = 91$ は CCD 素子の両端付近のサンプル点であり、 $s = 45$ は CCD 素子の中央付近のサンプル点である。

さらにこれらの円管内部の 4 対の針状対向電極間に放電を起こし、その断面の発光強度分布を映像化した再構成像が図 12 (b)、図 13 (b) である。ここでは比較のため、従

図 1 4 U字型低圧水銀灯

Fig. 14 Experimental object
which is a low pressure mercury lamp of U

図 1 5 レイトレーシングの一例

Fig. 15 Examples of ray-tracing

来法に基づいて作成された寄与率を像再構成に用いた再構成像も各々図 1 2 (a), 図 1 3 (a) に示した. ただし図 1 2 が図 1 0 中に示される容器 A を, 図 1 3 が図 1 0 中に示される容器 B を用いた場合の結果である. これより, 実測で作成した寄与率による再構成像が大きな劣化を受けているのに対して, 本論文で提案した手法が, 屈折と反射により劣化した投影データからの像再構成に, 有効に働いていることが確認できる.

さらに本手法の有効性を確かめるために, 図 1 4 に示す U 字型低圧水銀灯を被検体とした実験を行なった. このガラス管の肉厚は 1.2mm であり, 投影データの劣化はあまり大きくないが, 図 1 5 (U 字型の容器内の任意の位置の単位点発光 (強度 1.0) から放射される光線の中の一線を追跡した様子を示す) に示すように, 投影データの測定方向によっては容器管壁で何度も屈折しを繰り返した光や, 管壁において全反射した光が投影データを劣化させることがある. ここでは, 投影データの方向によっては, 光の屈折, 反射の影響が異なるため, 各投影方向に対応する寄与率を作成し, これを像再構成に用いた. この実験では測定した投影データは 3.6 度おき 100 方向, 投影データのサンプル数は 1 方向につき 46 点, 再構成画像は 40×40 pixel (1 pixel = $1.0\text{mm} \times 1.0\text{mm}$) である. 図 1 6 に $\theta = 43.2^\circ$ に対する寄与率の分布を示した. また U 字管の断面の発光強度分布を映像化した再構成画像が図 1 7 (b) である. 劣化を考慮していない図 1 7 (a) の画像に比べて, 被検体領域周辺部の画質劣化が改善されている.

(a) 投影方向

(b) 寄与率

図 1 6 寄与率の分布の一例

Fig. 16 An example of contribution rate

(a) Direction of projection (b) Contribution rate

(a) 考慮なし (b) 考慮あり

図 1 7 再構成画像

Fig. 17 Reconstructed image

(a) without consideration (b) with consideration

このように, 本手法の有効性は確認されたが, 本論文で提案した投影データの劣化を含めた寄与率による像再構成法では, その寄与率を計算機で作成している故に起こる問題点も考えられる. まず, CCD 素子のアレイ個々の特性など, システム固有の特性の影響が像再構成に考慮されなくなるため, これが画像劣化の要因になってしまうことが考えられる. また測定対象となる放電管の位置が, 計算機による寄与率の作成の際に用いた設定値と異なると, 光の屈折, 反射の影響が変わるため, 正しい像再構成を行なう

ことができなくなることが考えられる。よって、さらに高画質化を目指す際には、システム固有の特性までも考慮に入れた寄与率の作成及びデータ収集を行なう際の放電管容器の位置精度の高さが要求される。

5. まとめ

本論文では、データ収集部にレンズ系を用いた光 ECT 法の実用化のために不可欠である、放電管容器の管壁での光の屈折、反射により劣化した投影データから、高画質の再構成画像を得る手法について述べた。これは、放電管容器における屈折、反射を考慮して作成した寄与率を用いて像再構成を行なうものである。本論文では、さらに肉厚の容器を持つ放電管を用いて、大きく劣化した投影データから像再構成を行う実験により、本手法の有効性を検証した。その結果、本手法のプラズマ計測への応用の可能性が示された。

また、本研究を行なうにあたりご援助頂きました、(株)東芝ライテック 弓削洋二氏、湯浅邦夫氏、本田いつ子氏に深謝します。

(平成 5 年 10 月 25 日受付)

文献

- (1) 西村 裕司, 藤本 孝: "低圧水銀灯 2537Å 発光線と水銀蒸気によるその吸収-プロファイルと吸収効率-", 分光研究, **34**, 2, pp. 88-95, (1985).
- (2) Tallents C. J., Burgess M. D. J. and Luther-Davies B.: "The Determination of Electron Density Profiles from Refraction Measurements Obtained Using Holographic Interferometry", *Opt. Commun.*, **44**, pp. 384-387, (1983).
- (3) Lee H. U., Deneufville J. P. and Ovshinsky S. R.: "Laser-Induced Fluorescence Detection of Reactive Intermediates in Diffusion Flames and in Glow-Discharge Deposition Reactors", *J. Non-Cryst. Solids*, **59/60**, pp. 671-674, (1983).
- (4) Gottscho R. A. and Miller T. A.: "Optical Techniques in Plasma Diagnostics", *Pure Appl. Chem.*, **56**, pp. 189-208, (1984).
- (5) Hata N., Matsuda A. and Tanaka K.: "Neutral Radical Detection in Silance Glow-Discharge Plasma Using Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy", *J. Non-Cryst. Solids*, **59/60**, pp. 667-670, (1983).
- (6) Glasser J., Chapelle J. and Boettner J. C.: "Abel Inversion Applied to Plasma Spectroscopy; A New Interactive Method", *Appl. Opt.*, **17**, 23, pp. 3750-3754, (1978).
- (7) 田中栄一: "投影からの CT 画像再構成", *Medical Imaging Technology*, **3S-1**, pp. 51-59, (1985).
- (8) Hino M., Aono T., Nakajima M. and Yuta S.: "Light

Emission Computed Tomography System for Plasma Diagnostics", *Appl. Opt.*, **26**, pp. 4742-4746, (1987).

- (9) 久保田孝介, 寺田賢治, 稲森稔, 中島真人: "レンズ系を用いた光 ECT システムの開発", 信学論, **J92-D-II**, 12, pp. 2018-2026, (1992).

寺田賢治

(正員)1967 年 5 月 25 日生まれ。平成 2 年 3 月慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。現在、同大学院博士課程在学中。ロボットビジョン、パターン計測に関する研究に従事。平成 4 年度より日本学術振興会特別研究員。

久保田孝介

(正員)1967 年 2 月 14 日生まれ。平成元年 3 月慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。平成 3 年 3 月同大学院修士課程修了。同年松下技研株式会社入社。在学中は、画像処理の研究に従事。

三井麻水

(非会員)1968 年 12 月 10 日生まれ。平成 3 年 3 月慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業。同年東芝ライテック株式会社入社。在学中は、画像処理の研究に従事。

中島真人

(正員)1943 年 6 月 29 日生まれ。昭和 43 年 3 月慶應義塾大学工学部電気工学科卒業。昭和 48 年 3 月同大学院博士課程了。昭和 47 年慶應義塾大学工学部助手。昭和 56 年同大工学部助教授。昭和 63 年同大理工学部教授。画像処理、画像計測、超音波画像技術などの応用に関する研究に従事。工博。