

環状アンテナを用いた高周波放電に
おける可視光のトモグラフィ

平成 18 年 度

張 君 鋒

**環状アンテナを用いた高周波放電に
おける可視光のトモグラフィ**

2007 年 2 月

**三重大学大学院教育学研究科
教科教育専攻技術教育専修
張 君鋒**

指導教員 松岡 守

目次

1. はじめに.....	- 1 -
1. 1 概要.....	- 1 -
1. 2 背景	- 2 -
1. 3 本研究の目的.....	- 3 -
1. 4 研究方法	- 3 -
1. 5 本論文の構成.....	- 3 -
2. 解析対象の高周波プラズマ.....	- 5 -
2. 1 高周波プラズマの概要.....	- 5 -
2. 2 実験装置.....	- 6 -
2. 3 実験方法.....	- 10 -
2. 4 実験結果	- 13 -
2. 4. 1 圧力, 高周波パワー依存性.....	- 13 -
2. 4. 2 カメラの γ 特性とその測定.....	- 16 -
2. 4. 3 実験データの γ 逆補正.....	- 18 -
2. 5 解析対象としての実験結果の考察.....	- 18 -
2. 6 実験のまとめ	- 19 -
3. コンピュータトモグラフィのアルゴリズム	- 20 -
3. 1 コンピュータトモグラフィの概要.....	- 20 -
3. 2 本研究で用いた計算手法.....	- 20 -
3. 2. 1 計算アルゴリズム選択について.....	- 20 -
3. 2. 2 ART法 ^{1,2}	- 20 -
3. 2. 3 MLEM法 ^{3,4}	- 22 -
4. 高周波プラズマのトモグラフィ.....	- 25 -
4. 1 解析手順の概要.....	- 25 -
4. 2 通常のア​​ルゴリズム.....	- 25 -
4. 2. 1 計算フロー.....	- 25 -
4. 2. 2 計算結果.....	- 30 -
【ART法】	- 30 -
【MLEM法】	- 32 -

4. 2. 3まとめ.....	- 34 -
4. 3 計算アルゴリズムの改良.....	- 35 -
4. 3. 1 改良の概要.....	- 35 -
4. 3. 2 計算フロー.....	- 37 -
【ART法】	- 40 -
【MLEM法】	- 41 -
ART法とMLEM法計算結果の比較.....	- 43 -
4. 3. 4まとめ.....	- 43 -
4. 4 高周波プラズマのトモグラフィ解析	- 44 -
4. 4. 1 解析の概要.....	- 44 -
4. 4. 2 圧力依存性.....	- 44 -
4. 4. 3 投影データと断層分布.....	- 45 -
4. 4. 4 まとめ.....	- 48 -
5. まとめ.....	- 49 -
謝辞.....	- 49 -
参考文献.....	- 50 -
付録I ガンマ変換プログラム.....	- 51 -
付録II データ前処理プログラム.....	- 51 -
付録III 主プログラム	- 52 -
付録IV ARTプログラム	- 63 -
付録V MLEM法のプログラム.....	- 67 -

1. はじめに

1. 1 概要

高周波放電は熱電子放出を要する電極を要さないことから、電極の劣化に伴う装置の寿命の問題がないことや放電プラズマへの電極材料の混入の問題が少ないという利点がある。こうしたことから前者については超長寿命の光源、後者としては半導体プロセシングのためのプラズマ源といった応用がされている。

より良いプラズマ源を得るにはその特性をよく知ることが重要であるが、高周波放電についてはまだまだ未解明の部分がある。より良い理解のために理論的な研究と、放電分布を詳細に測定する実験的な方法との両面から研究が進められている。後者に関しては、放電プラズマの電子温度、密度等の諸量の分布計測には様々な手段が開発されてきている。静電プローブ法はプラズマ中に探針を差し込みその電気的特性から電子温度、密度、電位を算出するものである。空間分布を測定するためには静電プローブを必要な空間に亘り移動させて計測しなければならないこと、静電プローブを差し込むことによりプラズマが影響を受けて放電が変わってしまう場合がある等の問題がある。他にも受動的電磁波法、外部から電磁波を供給しその応答を見る能動的電磁波法など様々な手法が開発されている。それぞれ特定のパラメータしか測定できないなど一長一短があり、その特徴を理解して選択、あるいは複数の計測法を併用する必要がある。受動的電磁波法の一つである放電プラズマからの電磁波を周囲から観測し、電磁波放出の分布の断層画像を計算で求めるコンピュータトモグラフィ (Computed Tomography, CT) 法は、対象とするプラズマに影響を与えず電磁波放出の分布を得ることができる。

工学的に応用されている環状のアンテナによる高周波プラズマは、通常球状あるいは円筒状の限られた空間に生成される。本研究ではその生成メカニズムをより良く理解するために広い真空容器中に環状のアンテナを挿入し、その周りの事実上自由空間に生成される放電プラズマからの発光分布を観測した。真空容器の観測ポートは数方向に限られるが、環状アンテナで得られるプラズマはほぼ軸対称のドーナツ状であり、その軸対称性を利用すれば限られた方向の観測データから発光の断層分布が推定できると考えられる。

高周波放電 (プラズマ) 内部の様子を観測するには、通常は空間分解能をもつ計測系を空間走査するか、多数を周りに並列配置するなどの方法が用いられる。プラズマからの発光量を外部から観測する場合、得られる量は視線方向の積分量 (投影データ) になる。この積分量からもとの発光量空間分布を推定する方

法 (CT) としていくつかのアルゴリズムが提案されてきている。

磁界中プラズマで軸対称性あるいは磁気面一様性が仮定できる場合には、一方向からの観測データだけからアーベル変換により断層分布を得ることができる¹⁾。このような仮定ができないより一般的なプラズマ CT の手法には ART 法、最大エントロピー法、Cormack 法、スプライン関数法などが用いられている。CT は医療分野でもよく使われてきている。プラズマの場合は何らかの対称性の仮定ができること、あまり微細な構造は存在しないのが普通であるのに対し、医療分野では小さな病巣の早期発見など、対称性等がなく、かつ微細構造の再現を要するなど、プラズマ CT とは異なる要求がある。そこで観測は 360 度全方向から行い、それから得られる大量のデータに基づき微細な断層画像を得るための CT 法が開発されてきている。

本研究では特定の環状アンテナを用いた高周波放電という、対称性があり、構造もシンプルと想定される対象について、プラズマに対し時折用いられる ART 法^{1,2)}と、現在医療上よく使われている MLEM 法^{3,4)}の両方について計算し、両者から断層再生画像の妥当性の検討を行うと共に、両者の特性について比較検討した。

1. 2 背景

三重大学教育学部技術教育講座電気工学研究室では従来からプラズマ放電についての研究が続けられている。そのうち環状アンテナを用いた高周波放電については次のような研究がある。長谷川⁵⁾や門手⁶⁾はアルゴンを封入した直径 130mm の球形放電管の周囲にコイルを巻き、周波数 13.56MHz の高周波電流を流すことによってプラズマを生じる実験を行った。そして、パワーを上げるにつれて、コイル (アンテナ) 付近でのプラズマ密度が、コイルから離れているところのプラズマ密度の増加に比べて大きくなるという結果を得ている。春名⁷⁾や松尾⁸⁾は同様の物理機構モデルについて解析を行って、実験に近い結果を得た。この物理機構モデルは次のように想定されている。誘導される高周波は静電誘導と電磁誘導の両方から構成される。静電界はコイル電流の端子付近で最も大きく、端子から離れるにつれて小さくなる。一方、電磁誘導はコイルの付近で最も大きく、コイルから離れるにつれて小さくなる。そして放電の中心において、その値は 0 になる。松尾の論文ではこの物理機構モデルの有効性が示された。

吉田⁹⁾は発振器の出力を上げていくと、無電極高周波放電が急激に強くなる現象 (モード変化) が起こることを実験で観測した。

トモグラフィについての研究は中村¹⁰や脇田¹¹がART法の有効性を示した。中村は3方向の固定角度から観測する場合のART法のプログラムを開発した、脇田はこれを任意角で観測する場合に拡張した。プログラムの作成後、簡単な模擬入力データを用いて、プログラムの特性を詳細に調べた。いずれも、この方法の有効性を示した。

1. 3 本研究の目的

環状のアンテナにより生成される高周波プラズマをより良く理解するのが本研究全体の目的である。具体的には工業的に応用されている形態とは異なり、大きな真空容器中に環状のアンテナを挿入し、事実上自由空間内での放電を観察し、有限空間に制限されない高周波放電の仕方の知見を実験的に得る。さらに得られた可視光データを元にCT解析を行い、可視光の発光分布の断層画像を得て生成プラズマ分布のより詳しい知見を得る。放電プラズマでは一般に、観測ポートが限られていて観測方向が限られる。これは360度の方向から観測するのが普通の医学用のCTとは大きな違いがある。そのため、環状のアンテナにより生成される高周波プラズマに適したCT法の選択／開発／改良も本研究の大きな目的である。

1. 4 研究方法

工業的な応用では通常の放電容器壁により放電空間が制約されている。その制約の状況は利用の形態により様々となる。本研究では簡単のために環状アンテナを真空容器に挿入し、事実上自由空間で放電をさせ、その可視光の発光分布を観測ポートから観測した。

観測は2方向だけであるが、その限られた情報から対象プラズマの対称性を利用してのCTを試みた。すでにこれに似た試みは本研究室でもされてきているが、環状アンテナによる生成プラズマを対象にしたCTは初めてである。CTアルゴリズムへの対称性の組み込み方、アンテナ部分に関わる例外処理の仕方等についてアルゴリズムの改良を進め、より妥当な断層画像が得られるように工夫した。得られた断層画像について、プラズマ生成、計算アルゴリズムの妥当性の両面から考察した。

1. 5 本論文の構成

本論文は次のような構成になっている。

第2章では高周波プラズマの概要、自由空間における環状アンテナを用いたプラズマ生成の実験方法とその結果、及び用いたデジタルカメラの特性測定の方法とその結果について示した。後者は得られた可視光データを後でCT解析するために必要となるものである。第3章では一般的なCTのアルゴリズムについての説明と、第2章で得たデータに対し使用したCT法について示した。第4章では使用したCTの計算フローとそれを用いた初期的な結果、及び改良方法とその結果をまず示した上で、第2章で示したいくつかの実験結果についてCT解析をし、評価した。第5章にはまとめを記した。なお付録に本研究で用いた計算プログラム（MATLAB用）を付けた。

2. 解析対象の高周波プラズマ

2. 1 高周波プラズマの概要

プラズマ (plasma) は一般には電離した気体のことを指す。通常、気体を構成する中性分子が電離し、正の電荷をもつイオンと負の電荷をもつ電子とに別れて自由に飛び回っている、全体として電氣的に中性な物質である。プラズマは荷電粒子と中性粒子とにより構成され、集団的ふるまいをする。気体にエネルギーを加えて気体中の分子をイオンと電子に電離することによってプラズマをつくることができる。

環状アンテナを用いた高周波放電は、超長寿命の照明器具など工業的に応用されている¹²。その放電はアンテナ形状、封入圧力、高周波電力によって電界結合 (E 放電) と磁界結合 (H 放電) 間を遷移するといった現象が知られている¹³。プラズマの特徴として、中に多数の自由電子があるため電流が極めて流れやすいという点が挙げられる。電流が流れればその近辺に電磁場を生じ、それがまたプラズマ自身の行動に大きく影響する。そのためプラズマ中では粒子は集団行動をとりやすく、全体として集団的な挙動が観測される。外部から電磁場を掛ければそれに強く反応する。こうした挙動のひとつの現れとして、プラズマ中には通常、気体中には存在しない、電場を復元力とする縦波であるプラズマ振動が存在する。

2. 2 実験装置

図 2. 2. 1 は実験に用いたアンテナの写真である。このアンテナは、直径 1. 5mm の銅線に絶縁被覆を付けて直径 100mm、密着して 3 ターン巻いたものである。反射光を低減するために、環状アンテナ部の絶縁被膜には黒色のものを用いた。



図2.2.1 環状アンテナ

図2. 2. 2に実験装置の写真を、また図2. 2. 3は実験の配置と接続状況を示したものである。左側の観測ポートの付いた部分を用いて実験を行った。真空容器全体は左側の拡散ポンプで常時排気しており、拡散ポンプの下流は図2. 2. 3に示したロータリーポンプで引いている。真空容器の到達真空度は約 5 Pa程度であった。環状アンテナは上部のポートから挿入し、正面及び左側面のポートから観測、放電の様子をデジタルカメラで撮影した。用いたカメラはOlympus E100RSで、約 1メートル離れたところから行った。真空容器内の反射光を低減するために環状アンテナの背部には黒色のシートを設置した。

13. 56MHzの高周波は図2. 2. 5の発振器の非対称出力（同軸出力）を図2. 2. 6の整合器を経由して対称に変換した上でアンテナに供給した。

アルゴンガスはボンベから同じく上部ポートから供給した。上部ポート付近

に取り付けた電離真空計により真空度をモニタして圧力を調整した。図2. 2. 7は用いた電離真空計コントローラである。

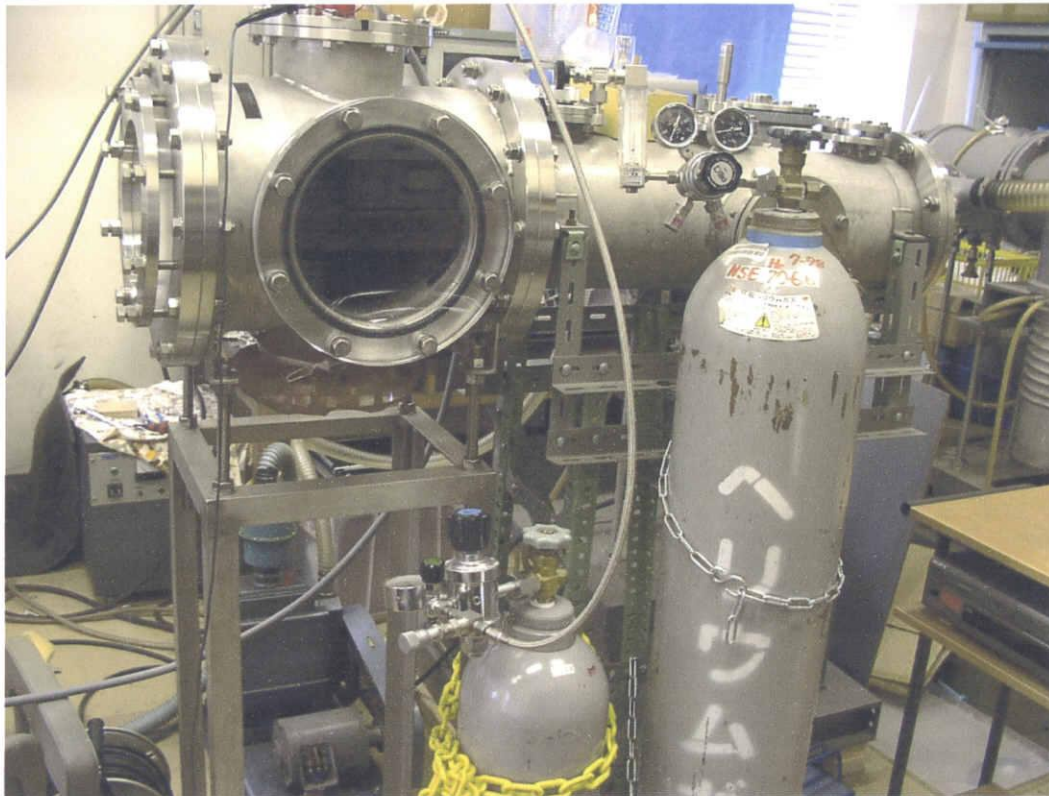


図2.2.2 真空装置

実験の配置

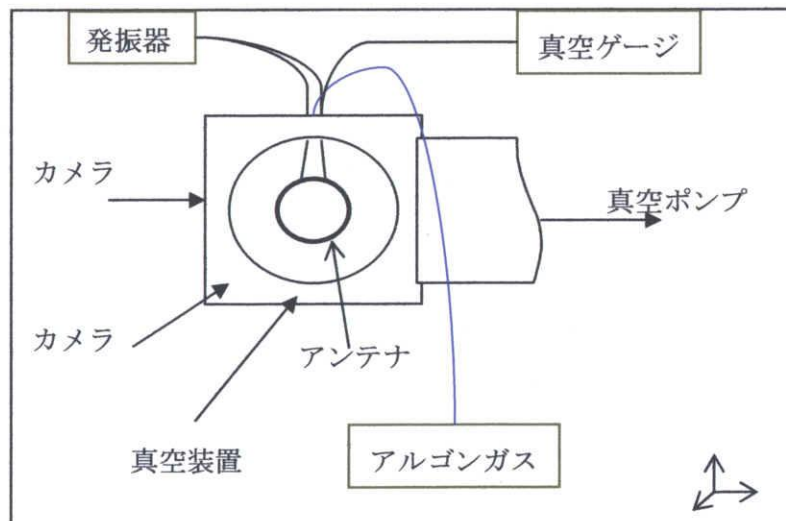


図 2. 2. 3 実験の配置図

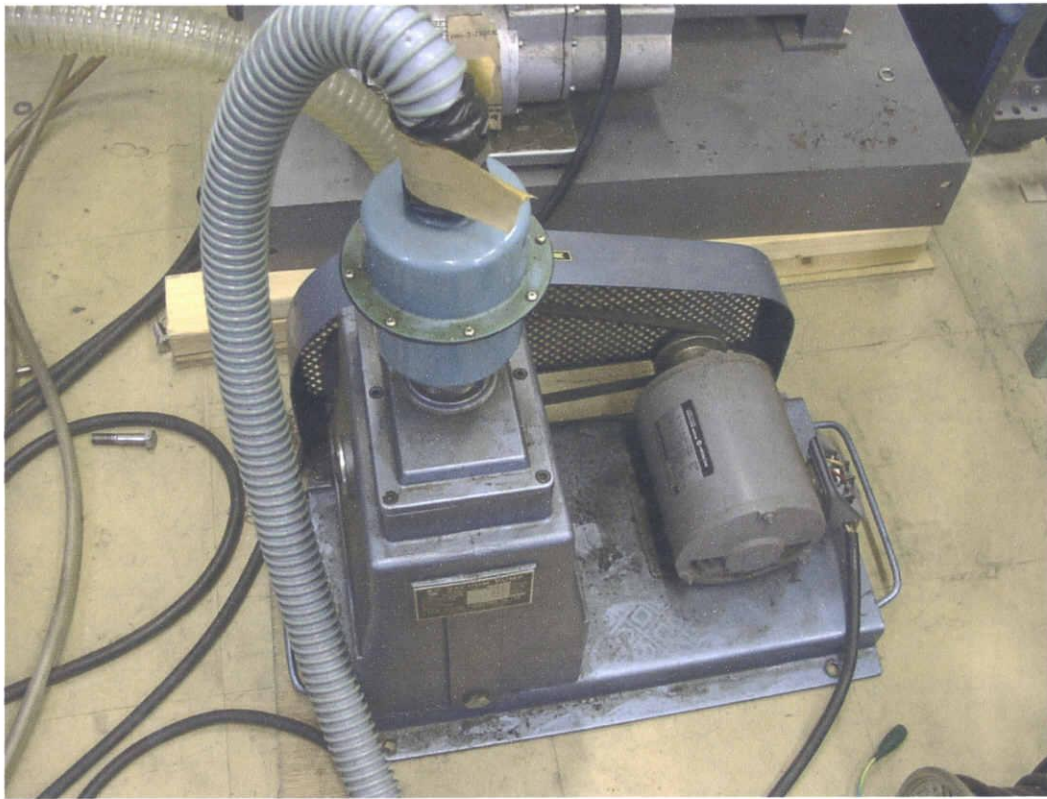


図2.2.4 真空ポンプ



図2.2.5 発振器



図2.2.6 整合器

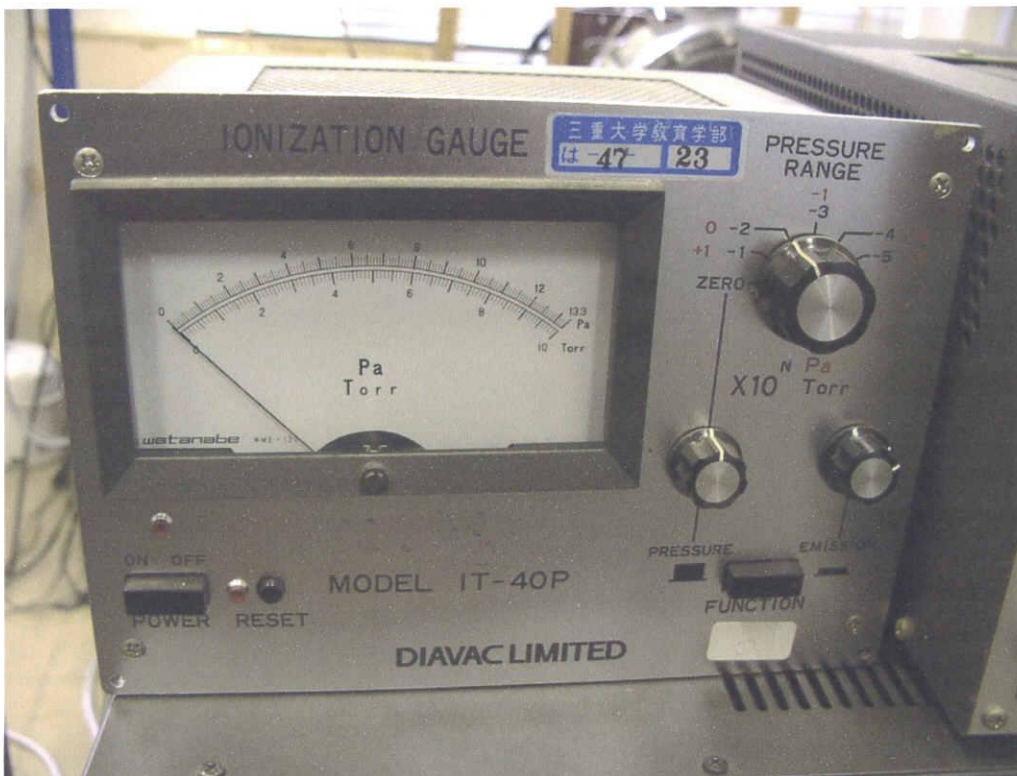


図2.2.7 電離真空計コントローラ

2. 3 実験方法

【高周波実験】

2. 2に記載した実験装置を用いて高周波プラズマを発生させ、その様子をデジタルカメラで2方向の観測ポートから撮影した。最初に放電可能な範囲（供給パワー、圧力）を求め、放電可能な範囲で供給パワー、圧力を変化させ放電の変化を求めた。高周波の環状アンテナへの結合状況は得られるプラズマにより変わる。実験では整合器を調整し、SWRが最小になる状態で行った。

なお、発振器から高周波を環状アンテナに供給されるパワーは整合器にある（進行）電力指示、及びSWRの指示を用いて次式で求められる。

$$SWR = \frac{1 + |R|}{1 - |R|}$$
$$R = \frac{V_2}{V_1} = \frac{\sqrt{P_2}}{\sqrt{P_1}}$$
$$P_2 = \left(\frac{SWR - 1}{SWR + 1} \right)^2 P_1$$

P2 は反射電力、P1 は進行電力

SWR=1.8 の場合は P2=0.082*P1

SWR は全実験を通じてほぼ 1.8 であった。つまり、電力指示が 50W の場合はアンテナ部分で約 46.2W が実際に消費されていたこととなる。

【カメラのガンマ測定】

撮像管や CCD を用いたカメラや、CRT や液晶等を用いたディスプレイは一般に信号電圧と光の強度間で非線形な関係を持っている。その関係はカメラの場合、光入力強度(x)と出力信号強度(y)は $y = a * x ** \gamma$ で表される。この式中の γ （ガンマ）が通常 1 ではなく、メーカーや機種毎に少しずつ異なるが、その値は一般に公開されていない。CT 解析のためには線形なデータがまず必要である。実験で用いたカメラも公開していないため、 γ 値測定も付随して行った。

測定方法は次のとおりである。図 2.2.8 に実験配置を示した。デジタルカメラの自動明るさ調整を考慮して、明るさ一定の固定光源と、明るさが規定の比率で変化できる変動光源の 2 種を用意し、その両方が一枚の画面に入るように撮影する。これを変動光源の明るさを変えて多数回測定し一連のデータから計算により γ 値を推定した。固定光源としてはホワイトボード上に取り付けた蛍

光灯（表面に白紙を巻き明るさを低減したもの）を設置した。変動光源としてはホワイトボードの固定光源以外の部分をプロジェクタで照らすことによった。これにより、例えばホワイトボードとプロジェクタとの距離を倍にすればホワイトボードの明るさは $1/4$ というように明るさの比率が求められる。デジタルカメラはホワイトボードから約 3 m の距離に固定とした。

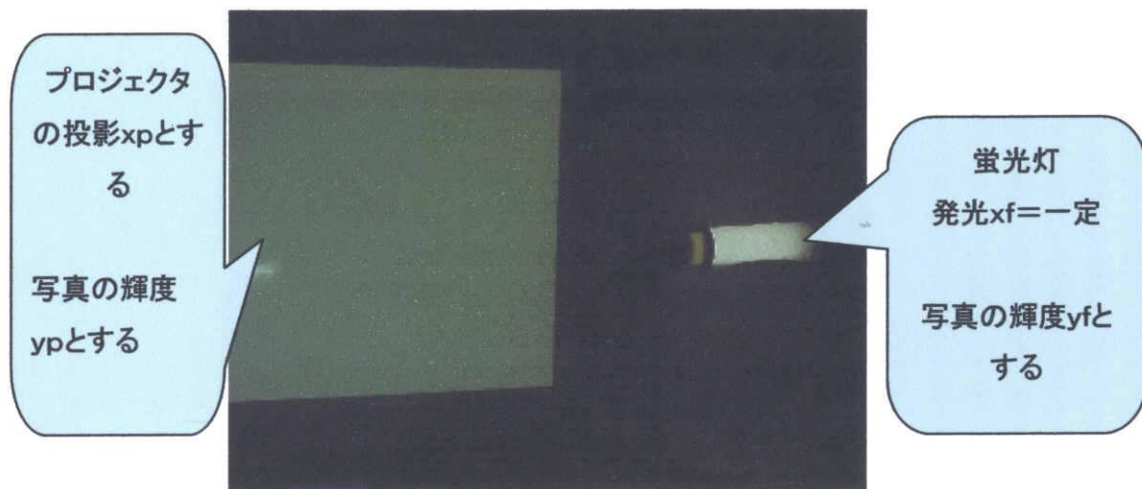


図 2.2.8 γ 値測定の際の実験配置

以上で得られるデータから次のようにして γ 値を得ることができる。まず、 $y = a * x ** \gamma$ を変形する。 y_{fi} を固定光源（蛍光灯）に対するデジタルカメラからの出力信号強度、 x_{fi} を固定光源からのカメラへの入力光強度（本実験では一定値）、 y_{pi} を変動光源（プロジェクターで照らされたホワイトボード面）の出力光強度、 x_{pi} を変動光源からの入力光強度とする。 x_{pi} の値はホワイトボードとプロジェクタの間の距離 L_i の 2 乗に反比例している。

$$\frac{y_{fi}}{y_{f1}} = \frac{a_i}{a_1}; (i = 1, 2, 3 \dots)$$

$$\frac{y_{pi}}{y_{p1}} = \frac{a_i}{a_1} \left(\frac{x_{pi}}{x_{p1}} \right)^{\gamma} = \frac{y_{fi}}{y_{f1}} \left(\frac{L_1}{L_i} \right)^{2\gamma}$$

$$\frac{y_{pi}}{y_{fi}} = \frac{y_{p1}}{y_{f1}} \left(\frac{L_1}{L_i} \right)^{2\gamma}$$

$$y_i \equiv \frac{y_{pi}}{y_{fi}};$$

$$x_i \equiv \frac{L_i}{L_1};$$

$$\log(y_i) = \log(y_1) + 2\gamma \log\left(\frac{1}{x_i}\right)$$

$$\log(y_i) = -2\gamma \log(x_i) + \log(y_1) \dots \dots \dots .2.1$$

2.1 式より x_i と y_i の関係を両対数のグラフに描くとその直線関係の傾き (-2γ) から γ 値が求められることがわかる。

2. 4 実験結果

2. 4. 1 圧力、高周波パワー依存性

【放電可能域】

13.56MHz、100W出力の発振器でどの圧力域、高周波パワーで放電が得られるか調べた。その結果、圧力については5Paから80Paの間で放電を得ることができた。ただし、圧力が高いと放電領域がアンテナ近傍にあまりに集中することから断層画像を得るのに適切な対象とはならないことから、以降の実験では圧力範囲を5Paから40Paの範囲とした。後者の圧力域で放電を開始するに要する最低の放電パワーは圧力によらず、ほぼ21Wであった。一旦放電が確立すると発振器出力を2.5W程度まで下げても放電は維持された。

【放電観測例】

図2. 4. 1は高周波パワーを50Wに固定し、圧力を5Paから40Paまで変化させた場合の放電の様子（正面写真）である。同様に側面から撮影したものを図2. 4. 2に示した。

放電は環状アンテナを中心にドーナツ状に生じている。ドーナツの太さは圧力上昇と共に小さくなり、発光はアンテナに近づき、かつ発光強度が増している。放電はフィーダ線部にも生じている。また金属（ステンレススチール）性の放電容器近く（観測ポートの周辺）でも生じているかも知れない。またアンテナ自身を黒い絶縁物で覆い、かつアンテナの後方に黒いシートを置き反射光を抑えるように試みたが完全ではないようである。これは後のCT解析の誤差要因になることに注意する必要がある。

図2. 4. 2の側面写真5Paの環状アンテナの上部及び下部の発光からわかるように、アンテナの極く近傍ではプラズマの発光が弱まっており、中空のような発光分布になっているらしいことがわかる。これは生成されたプラズマが事実上自由空間の真空容器に拡がると共に、アンテナ表面でプラズマが損失されることを考えれば当然といえは当然であるが、発光分布の詳細はその断層画像が得られればより詳細な議論ができることが期待される。

実験写真(50W, 正面写真)

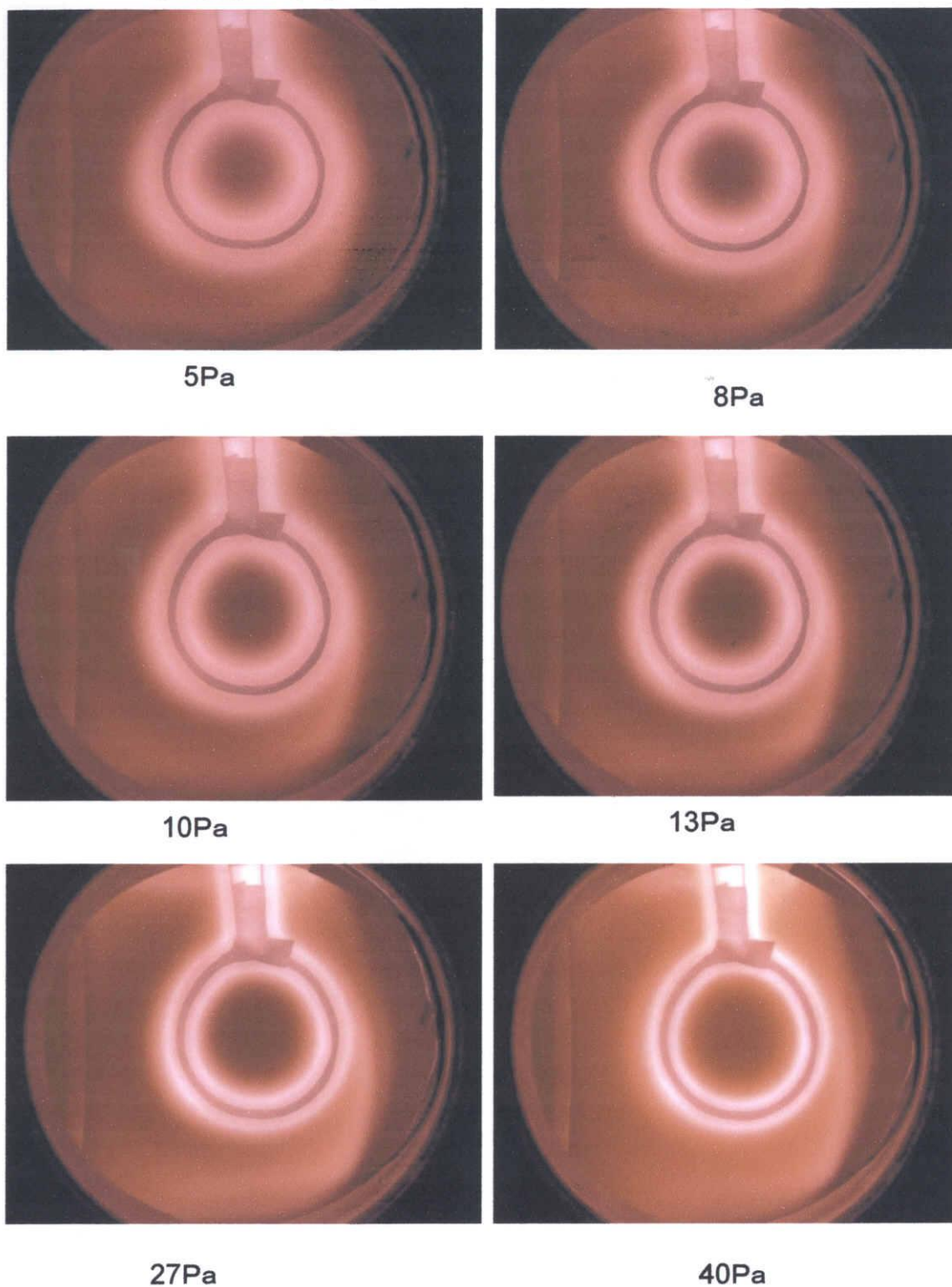
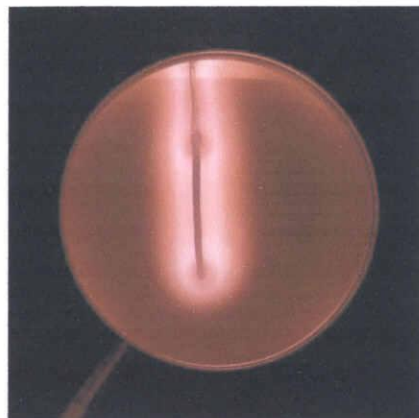
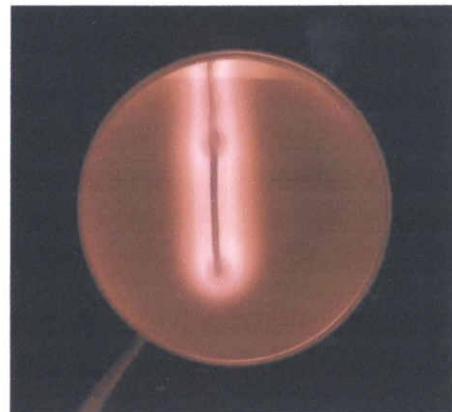


図 2.4.1 正面写真 (圧力を変化)

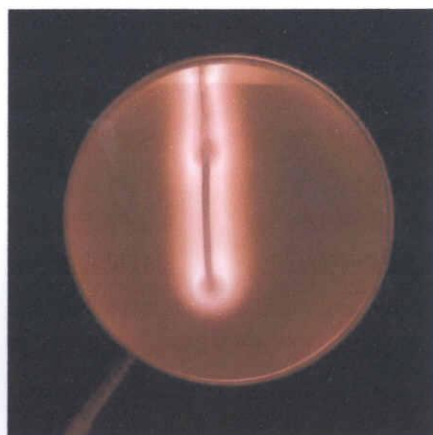
実験写真(50W, 側面写真)



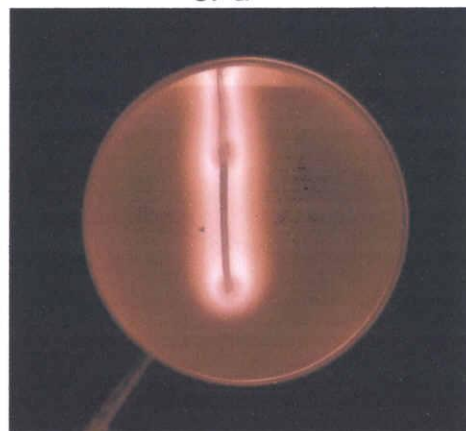
5Pa



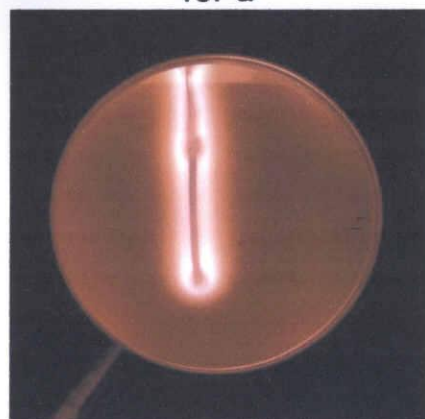
8Pa



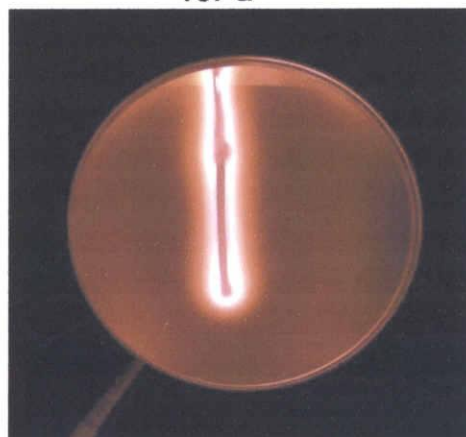
13Pa



10Pa



27Pa



40Pa

図 2.4.2 側面写真 (圧力を変化)

2. 4. 2 カメラの γ 特性とその測定

図 2.4.3 は図 2.2.8 の実験配置で得られた水平方向の輝度分布図である。図の左部分の変動光源（プロジェクタで照らされているホワイトボード）、右部分は固定光源（ホワイトボード上に置いた蛍光灯）部分に対応するデータである。右部分の蛍光灯の明るさは実際には変わっていないが、デジタルカメラの自動明るさ調整機能のため、プロジェクタにより照らし出されたホワイトボードの明るさの変化に伴い、変動していることがわかる。

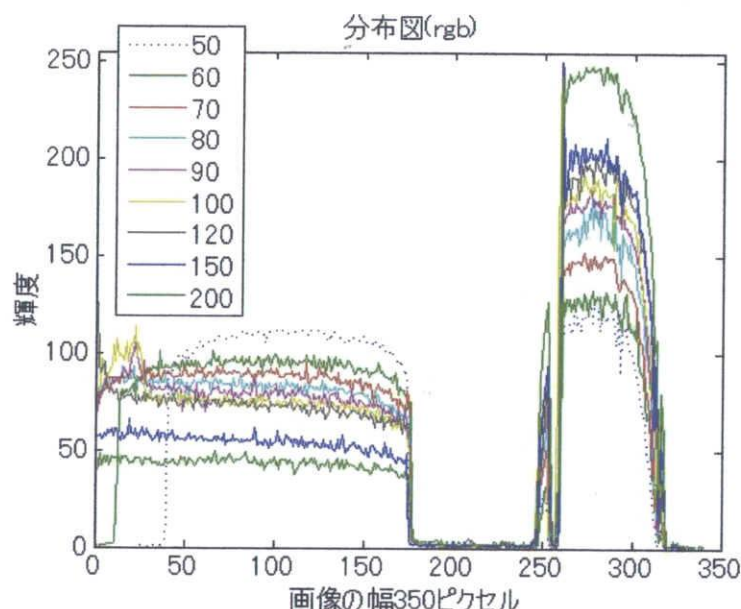
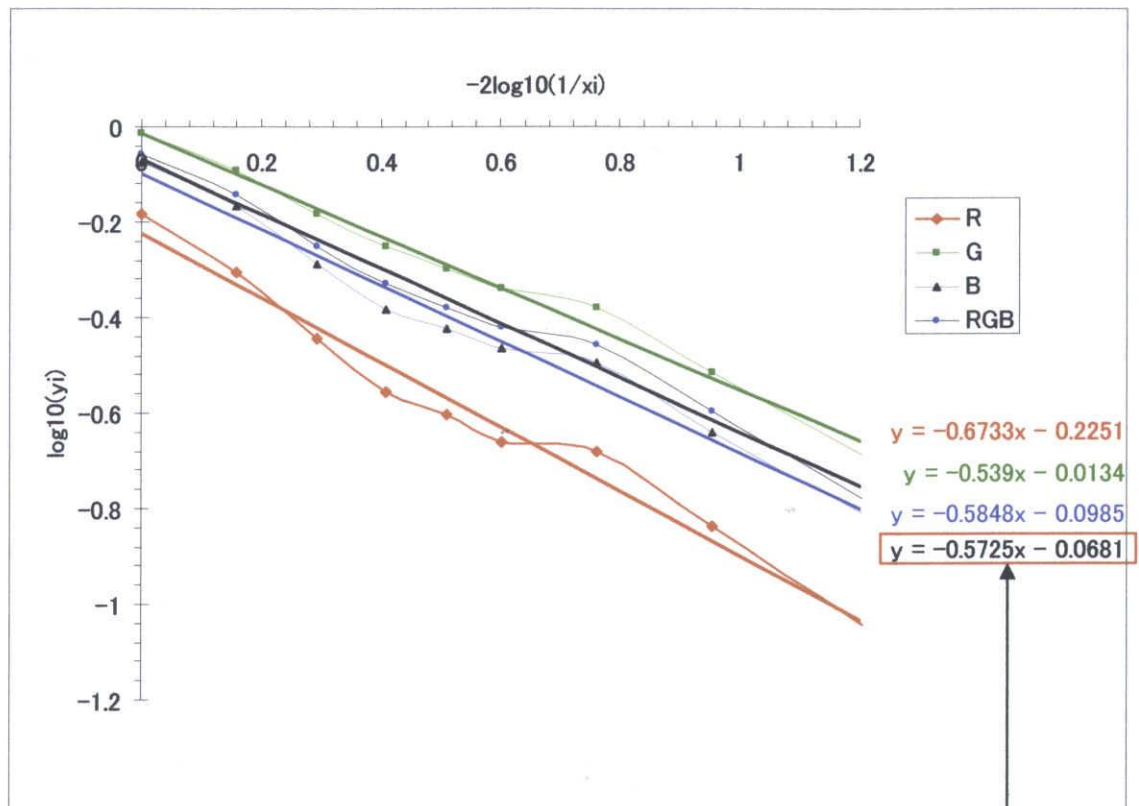


図 2.4.3 輝度分布図

プロジェクタで照らされている部分、及び蛍光灯の発光部分の平坦部分の平均値を、ホワイトボードとプロジェクタとの間の距離をパラメータにしてプロットした結果が図 2.4.4 である。R、G、B、及び輝度それぞれについて最小二乗法に基づき、フィットする直線を求めた。得られた γ 値少しずつ異なるが、以降の CT の計算では簡単に $\gamma=0.6$ とした。



$$R'G'B' \Rightarrow YIQ$$

輝度(Y) $Y = 0.299 \times R' + 0.587 \times G' + 0.114 \times B$

色調(I) $I = 0.596 \times R' - 0.274 \times G' - 0.322 \times B$

彩度(Q) $Q = 0.211 \times R' - 0.522 \times G' + 0.311 \times B$

圖 2.4.4 γ 值測定結果

2. 4. 3 実験データの γ 逆補正

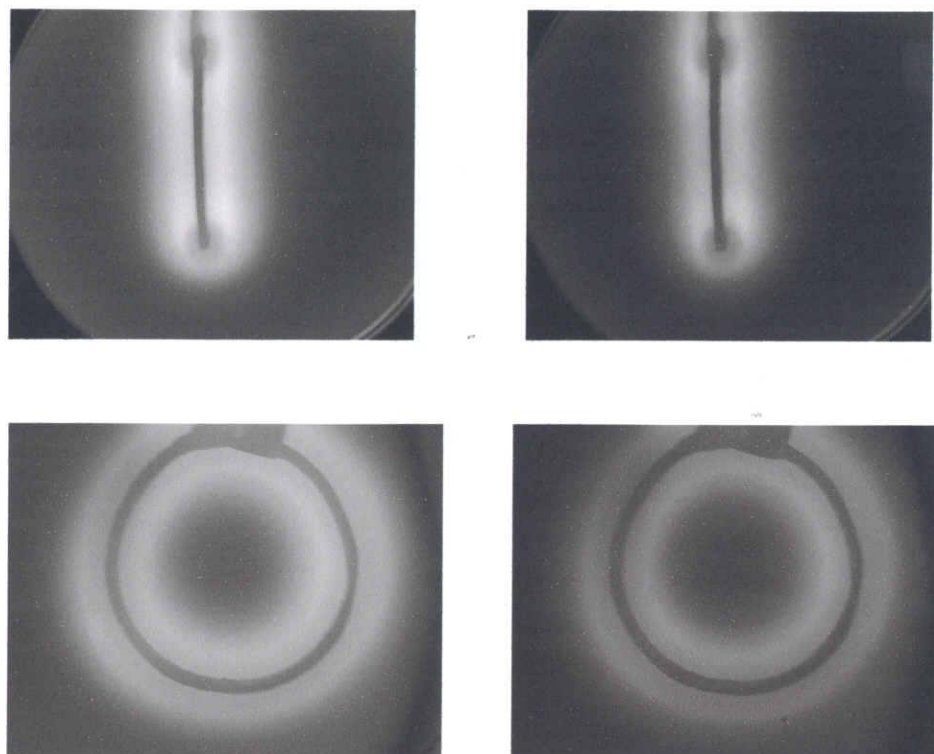


図 2.4.5 γ 値の補正例（左：補正前、右：補正後）

実験で得た γ 値約 0.6 に基づき、補正した例が図 2.4.5 である。左は実験データのグレイ写真（輝度）である。右部分は γ 値を 0.6 にして、逆補正した写真である。 γ が 1 より小さいということは、本来もっと暗い部分をより明るく、とても明るい部分を押さえて記録しているということであり、アンテナ付近の暗い部分は γ 補正を考慮しない画像より実際の方がもっと暗いことがわかる。

2. 5 解析対象としての実験結果の考察

【対称性】

環状アンテナにより生成されたプラズマであることから、環状アンテナの中心軸を中心とした軸対象プラズマであることを想定し、解析することを意図している。図 2.4.1 の正面写真を見る限り、この仮定はかなり正しい。しかしながらアンテナフィーダー線（写真上部）の周りも環状アンテナと同等に発光しており、よく見ると環状アンテナ部分も完全には対称となっていない。これらは軸対称を仮定した CT 解析が厳密でないことに注意を要すると共に、H 放電（電磁誘導に伴う放電）と考えていた当初の予想が正しいとは言えず E 放電（静電

誘導に伴う放電)が部分的に関与、ないしは支配的になっている可能性を示唆していることに注意する必要がある。

【反射光の影響】

アンテナは黒色の絶縁物を表面に巻き、かつ環状アンテナの背後には黒色のシートを配置したが、図 2.4.1、2.4.2 の写真を見ると完全に黒色になっていない。また特に図 2.4.2 の側面写真でより顕著になっているように観測ポート周辺が発光している。これはおそらく金属製の真空容器付近でもプラズマが発生し、発光しているものと見られる。高周波の給電は対称的にしているが、完全ではなく、アンテナと真空容器との間での高周波放電が生じ、真空容器付近でも発光している可能性がある。これらは CT 解析上系統的な誤差となる背景発光であることに注意する必要がある。

【 γ 測定】

使用したデジタルカメラの γ 測定結果は R、G、B について 0.67、0.54、0.58、その合成である輝度について 0.57 という結果が得られ、以降の解析では丸めて 0.6 という値を採用することとした。図 2.4.4 からの対数グラフ上の直線関係からのずれ、R、G、B ごとの γ 値の測定結果の違いは測定上のエラーか、デジタルカメラの特性そのものなのかははっきりしない。また丸めて標準的とされる 0.6 を採用することについて、解析への影響があることに留意する必要がある。

2. 6 実験のまとめ

以上の実験より得られた結果を箇条書きで示す。

- 直径 100mm、3T の環状アンテナを真空容器中に差し込み、13.56MHz、100MW までの発振器で放電が得られるのはアルゴンの圧力が 5Pa から 40Pa の範囲であった。
- 放電が維持できる最低の発振器出力は圧力によらずほぼ 10W 一定であった。ただし放電開始に要するのは数十ワットである。
- 放電は環状アンテナの周りにドーナツ状にほぼ軸対称についた。その太さは圧力が低いほど太く、圧力上昇に連れて細くなり、アンテナに近づいた領域で濃い発光を得た。
- アンテナフィーダー線の周りにも同様の発光があり、ドーナツ状の発光も厳密に軸対称にはなっていない。
- 観測ポート周辺も発光しているようであり、金属製の真空容器も放電に一部関与しているようである。

3. コンピュータトモグラフィのアルゴリズム

3. 1 コンピュータトモグラフィの概要

コンピュータトモグラフィ (CT) は医療向けの X 線 CT がよく知られている。X 線 CT では身体を中心にして多方向から得た大量の投影データを元に精細な断層画像を得ている。CT の技術はプラズマの研究にも用いられてきている。医療向けと異なり、プラズマ研究で用いる CT では観測窓に制約があることから、限られた方向からの観測したデータを元に物理的に知られている対称性等を駆使して断層画像を得ることが多い。医療用 CT とは条件が異なることによる、プラズマ CT の手法にはアーベル変換、ART 法、最大エントロピー法、Cormack 法、スプライン関数法などが用いられている。¹ 医療向けは主に小さな病巣の発見など微細構造を目的としているのに対し、プラズマは通常あまり微細な構造はなく、プラズマ全体の大まかな分布を求めることを目的としている場合が多いという違いがある。その極端な例として、軸対称性等により、たった一方向からの見た積分データを元にプラズマ密度分布を求めるアーベル変換がある。

3. 2 本研究で用いた計算手法

3. 2. 1 計算アルゴリズム選択について

CT のアルゴリズムとして ART 法と MLEM 法の 2 種を採用、改良した。ART 法はプラズマ CT に時折使われる手法であり、三重大学教育学部技術教育講座電気工学研究室でもこれまで使用してきた実績がある。一方、MLEM 法は医療分野でよく使われている方法である。本研究では同データに対してこの 2 種の計算法で断層画像の再生を試み、比較することによって断層画像推定の妥当性を見ると共に、両手法で得られる結果の違いを考察した。以下両手法のアルゴリズムを示す。

3. 2. 2 ART 法^{1,2}

ART (Algebraic Reconstruction Technique) 法は反復計算から誤差の修正を逐次行うことで正しい発光分布に漸近させる方法である。

発光を周囲のカメラで撮影する場合、投影データ S_{pq} は、次式で表される。

$$S_{pq} = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K L_{pq,kl} E_{kl} + \varepsilon_{pq} \quad \text{①}$$

以下図 3.1 を用いて ART 法を説明する。 $L_{pq,kl}$ は画素 (k, l) を通る光路の長さである。添字 p はカメラの位置、 q は各カメラからの離散化された視線を示している。 E_{kl} は断面上の画素 (k, l) における放射強度分布で、 ε_{pq} はノイズである。

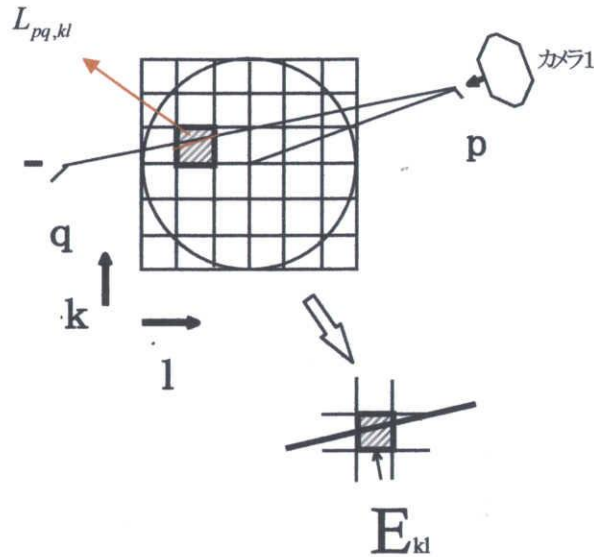


Fig 3.1 ART 法の説明図

今ノイズを 0 とすると、(1) 式は連立方程式

$$S_{pq} = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K L_{pq,kl} E_{kl}$$

の解を求めることになる。 E は一般には初期値として投影データの様子を考慮して適当な分布を用いる。本研究ではすべて 1 とした。

i 回目の近似解を $E_{kl}^{(i)}$ とし、再生投影を $S_{pq}^{(i)}$ とする

画素中の光路の長さに比例するので、修正量 $\Delta E_{kl}^{(i)} = w \cdot L_{pq,kl} (S_{pq} - S_{pq}^{(i)})$ の w 倍
① としておく。 ΔE_{kl} による再生投影の修正量
とすると

$$w \cdot (S_{pq} - S_{pq}^{(i)}) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^K L_{pq,kl} \Delta E_{kl}^{(i)} \quad \text{②}$$

w は収束の速さを決める重みである。①を②に代入すると

$$w \cdot (S_{pq} - S_{pq}^{(i)}) = \sum_{k=1}^k \sum_{l=1}^k L_{pq,kl} \Delta E_{kl}^{(i)} = \sum_{k=1}^k \sum_{l=1}^k L_{pq,kl} \cdot w^l \cdot L_{pq,kl} = \sum_{k=1}^k \sum_{l=1}^k L_{pq,kl}^2 \cdot w^l$$

$$\Delta E_{kl}^{(i)} = \left\{ w \cdot (S_{pq} - S_{pq}^{(i)}) / \sum_{k=1}^k \sum_{l=1}^k L_{pq,kl}^2 \right\} L_{pq,kl}$$

w' を求めて、①に代入すると

(i+1)回目の逐次近似解は

$$E_{kl}^{(i+1)} = E_{kl}^{(i)} + \Delta E_{kl}^{(i)}$$

で与えられる。

3. 2. 3 MLEM法^{3,4}

最尤推定期待値最大化法 (Maximum likelihood expectation maximization, MLEM) は投影データから元の分布を確率論的に最も確からしいように推定する手法の一つである。MLEM 法は再構成像から計算された投影像と実際の投影像が一致するように繰り返し補正する逐次近似法の一つである。

MLEM 法による画像再構成の式を図 3.2 に示す。K は繰り返し回数を表す。 E_j は断面上の画素 (j) における放射強度分布で S_i は検出器 i に入射した投影カウント、 C_{ij} は画素 (j) から出た光子が検出器 i に到達する割合 (確率) である。 S_i が実際に測定される投影データである。

すべての角度の
データを加算

検出器*i*からピクセルに
対する逆投影の計算

変更された解

$$E_j^{K+1} = \frac{E_j^k}{\sum_{i=1}^n c_{ij}} \sum_{i=1}^n \frac{S_i c_{ij}}{\sum_{l=1}^m c_{ij} E_l^k}$$

ピクセル*j*が検出器
i=1...*n*に入る総確率

ピクセル*j*を通り検出器に
入る光子の投影の計算

図 3.2 MLEM 法の式の構造

計算手順は以下のとおりである。

- (1) 検出確率 c_{ij} を決定する（視線方向にある画素の c_{ij} は 1、視線方向以外の画素は 0 とした）。
- (2) 初期画像 を仮定する（一様分布とした）。
- (3) 検出器 *i* から画素 *j* に対する逆投影 (back-projection) を計算する。
- (4) 画素 *j* を通り検出器 *i* に入る光子の投影 (forward-projection) を計算する。
- (5) ステップ (3) (4) をすべての投影角度について計算し、両者の比を取って加算する。
- (6) 全確率で規格化する。
- (7) 以上の計算値を初期画像の画素 *j* に掛け算して更新画像 を作成する。
- (8) 次の画素 (*j*+1) に移ってステップ (3) に戻る。すべての画素の計算が終わったら更新画像を初期画像としてステップ (3) に戻る。

以上の計算ループを繰り返すことによって分布画像が得られる。計算ループの打ち切りに関しては一般に明確なルールは存在しない。本研究でも収束状況を見て計算回数を決めた。初期値についても一般に「正の値であること」という以外特に制限はない。本研究ではまず、一様分布を仮定して計算することとした。

検出確率 C_{ij}

検出確率 C_{ij} に実際の測定系で起こりうる物理現象を織り込んでおけば、この影響を考慮して画像再構成することができる。これが MLEM 法の柔軟性を高くしている理由である。 C_{ij} の計算で考慮すべき項目としては、大体、次のようなものがある。

- (1) 画素 j と検出器 i との位置関係から決定される幾何学的な面積割合
- (2) 画素 j から出た光子が検出器 i に到達するまでの吸収の割合
- (3) コリメータの有限な開孔径によって画素 j から出た光子が実質的に広がりを持つので、それも考慮した割合（分解能補正）。項目 2、3 を考慮に入れるとそれぞれ吸収補正、分解能（コリメータのボケ）補正ができる。このようにあらかじめ分かる情報をアルゴリズムに組み込んでいくことによって MLEM 再構成法は応用範囲を広いものとしている。ただし、本研究では光学的に十分薄い対象であることから吸収補正は不要である。デジタルカメラで撮影する場合のコリメータの開孔径はカメラの瞳径が対応すると考えられるが本研究では無視した。他に対象からの光を平行光線に変換することなくデジタルカメラに取り込んでいるので、カメラは扇状に光を取り込んでいることとなるが、計算では平行光線を取り込んでいるとして処理した。

4. 高周波プラズマのトモグラフィ

4. 1 解析手順の概要

代表的な放電時の発光分布同一データについて、ART 法と MLEM 法の2法を用いて計算した。いずれの場合も各画素の輝度の初期値を1とした。なお繰り返し計算の収束状況を評価するのに用いた誤差の計算の計算式は次のとおりである

$$\text{誤差} = \sum (\text{元の投影データ} - \text{計算の投影データ}) / \text{データ数} \times 100\%$$

4. 2 通常のアプローチ

4. 2. 1 計算フロー

ART 法と MLEM 法とも主プログラムの計算流れは同一で、図4.2.1のようである。

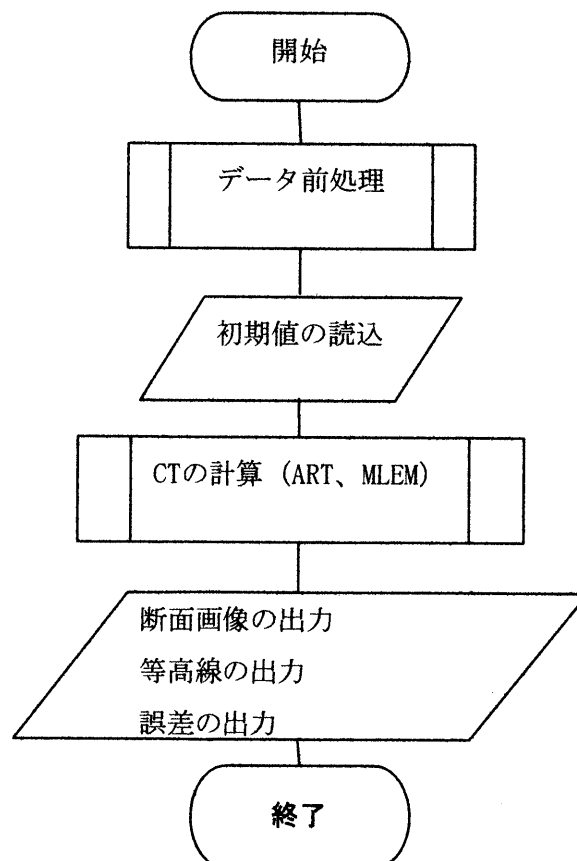


図 4.2.1 主プログラムの流れ

まず

- データ前処理を行う

データ前処理で行うのは図 4.2.3 に示すとおり、 γ 逆変換と 2 方向からのデータの光量比の調整、線形補間である。明るさは各方向のデータの明るさの積分値が等しくなるようにした。次いで

- 全画素に初期値を与える（初期値は 1 とする）
- CT の本計算（ART ないし MLEM）
- 断面画像、等高線、誤差などの出力処理

の計算処理を行い、終了する。

データ前処理の計算流れは図 4.2.2 のとおりである。

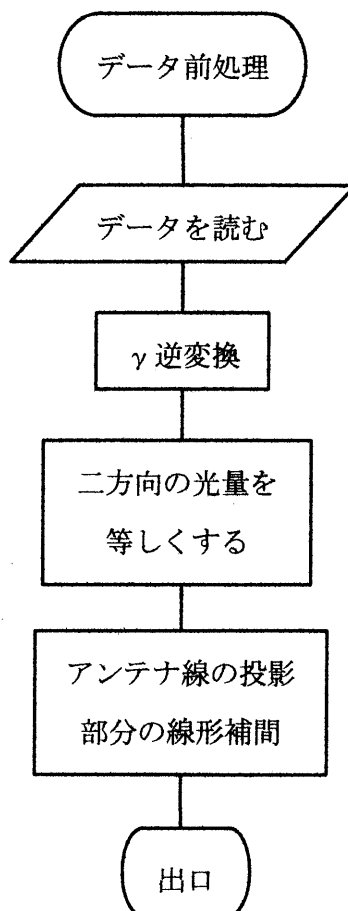


図 4.2.2 データ前処理の計算流れ

データ前処理では次の計算処理を行う。

- ① 写真データの読み込み

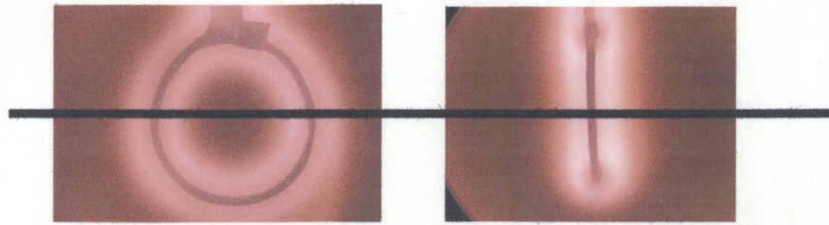


図 4.2.2.1 入力データ

入力データの取る図 4.2.2.1 の示す通りである。まず、正面写真を基準として、アンテナの太さ一致するようにリサイズした。そして、写真は 1360×1024 ピクセル撮った為に、真空容器などを除いて両写真は $566 \times ???$ ピクセル (??? 中心の辺り適当の範囲) を変換した。計算した断面画像は 566×566 ピクセルのなる。最後はアンテナの中心の辺りで、連続 10 本データの平均値の四捨五入して、入力データとして使った。

② r 逆変換

③ 2 方向のデータの光量調整

カメラの絞りを固定し、同距離から撮影すれば 2 方向のデータの光量の積分値は等しくなるはずである。実験ではカメラが明るさを自動調節しているのでその補正を行った。補正の方法は、一つの方角の総データを $S1$ 、他方の総データは $S2$ とする。 $S1$ の各データをそのままとし、 $S2$ の各データに $S1/S2$ を掛けた。

④ アンテナの投影部分の線形補間

アンテナの手前部分の発光はデータとして得られているが、アンテナの絶縁被膜は黒色ではあるが反射があり、光量が多くなっている。そこでこの部分のデータは無効とし、代わりにアンテナの両側の光量を元に線形補間することとした。

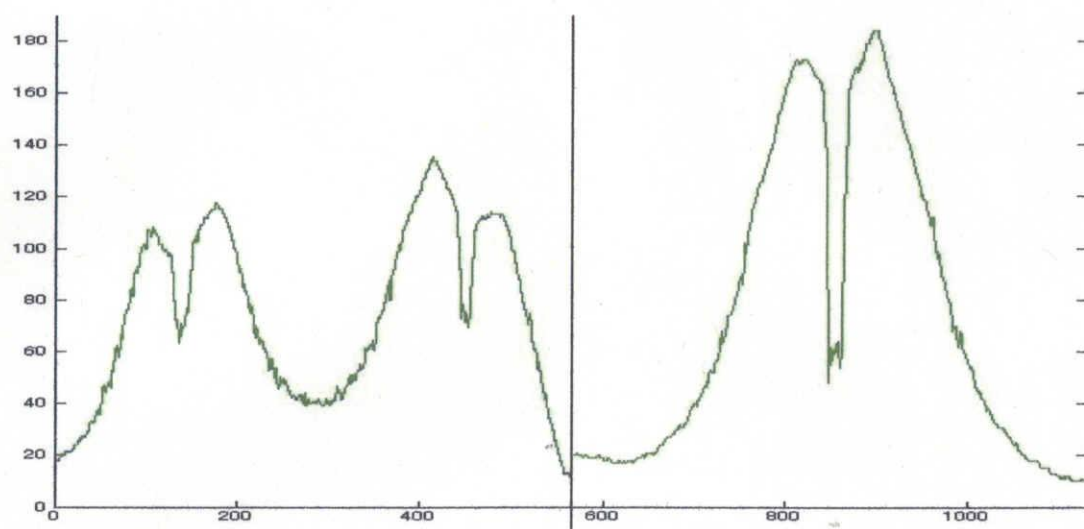


図 4.2.2.2 入力データ（線形補間前）左：正面データ、右：側面データ

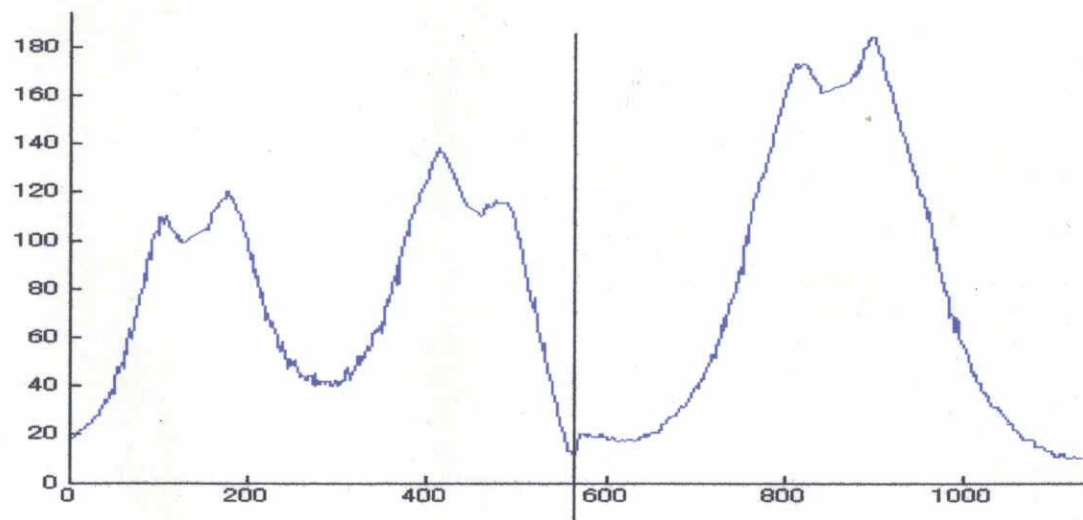


図 4.2.2.3 入力データ（線形補間後）左：正面データ、右：側面データ

CT コア部の計算のフロー

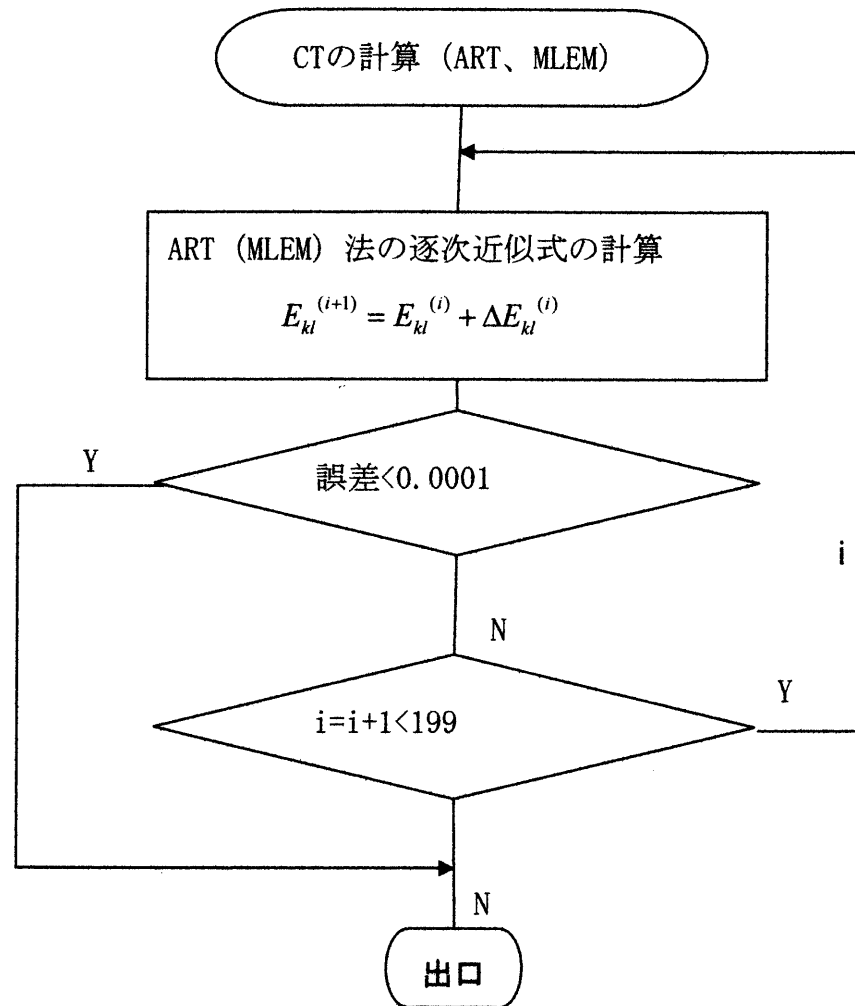


図 4.2.3 CT コア部の計算フロー

CT コア部では次の計算処理を行う。

- ① 主プログラムの命令に従い、データ前処理後のデータを受け継ぐ。
- ② 逐次近似式に従い計算。
- ③ 指定した誤差と比べて、大きい場合は続ける、小さい場合は終了して、主プログラムに戻る。
- ④ 実行回数は 199 より小さい場合元に戻る、その以外の場合は主プログラムに戻る。

4. 2. 2 計算結果

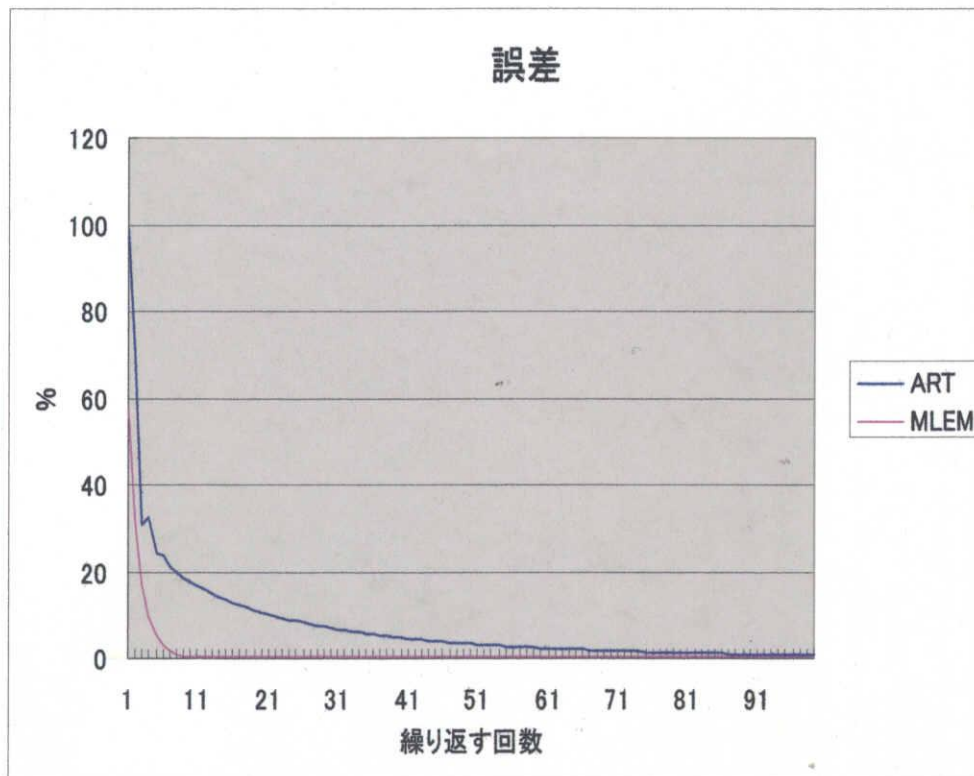


図 4. 2. 4 繰り返し計算に伴う誤差の推移

【計算の収束】

実験条件：圧力 8Pa、パワー 50W に対する計算について、図 4. 2. 4 に収束状況を示す。ART、MLEM 法とも収束してゆくのがわかる。MLEM 法のほうが収束が早くなっているが、計算上の加速係数の調整を行っていないので一般的に言えることなのかどうかはわからない。実施した計算条件では 100 回繰り返し計算をすればほぼ収束していると言える。

得られた断層発光分布と発光強度に関する等高線を以下に示す。

【ART 法】

図 4. 2. 5 に ART 法で得られた断層画像と発光分布の等高線を示す。

- 断面がほぼ円形のドーナツ状の発光分布であることが想定されるのにたいし、角のとれた正方形断面に近い形状になっていること
- アンテナ部分（断面内部）は実際は発光がゼロであるのに対し、発光のある断層画像となっていること

- アンテナ投影部分が縦横とも少し暗い発光部分になっていること

といった点が、期待される断層画像分布からずれており、断層画像推定アルゴリズムの改良、あるいはより多方向から撮影した情報、ないしその両方が求められる。

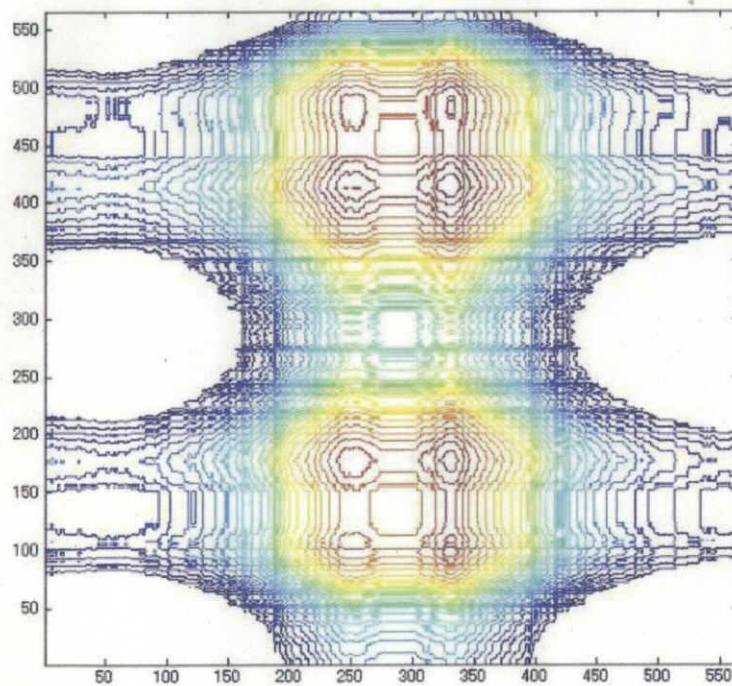
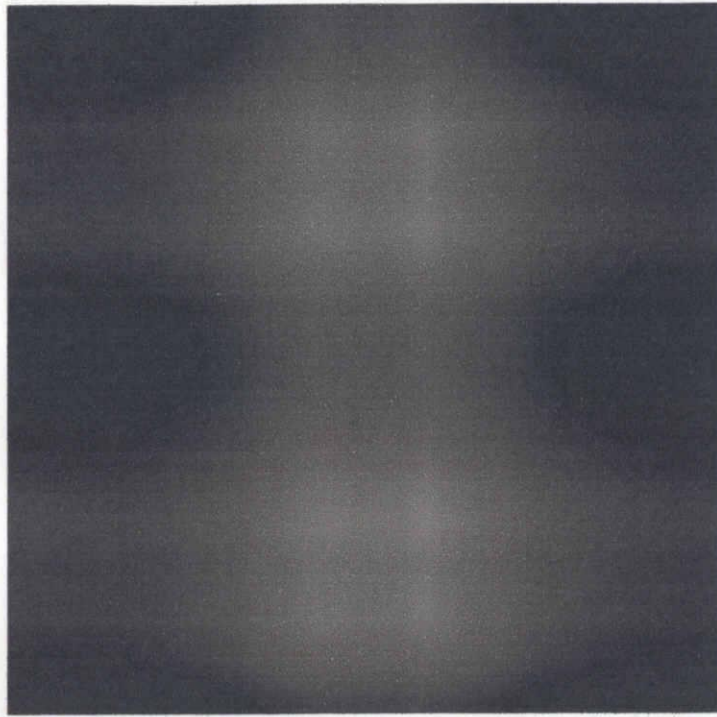


図 4.2.5 ART 法の計算結果

【MLEM法】

MLEM 法の場合も ART 法の場合と同様の問題がある。2 つの独立した方法で得た

断層画像は似ており、2 法間の断層画像推定は相互には矛盾がない。

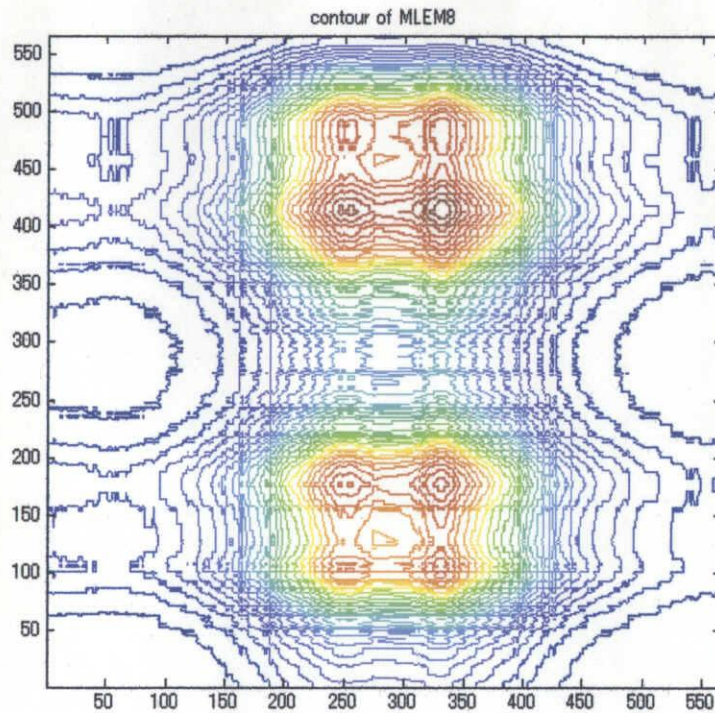
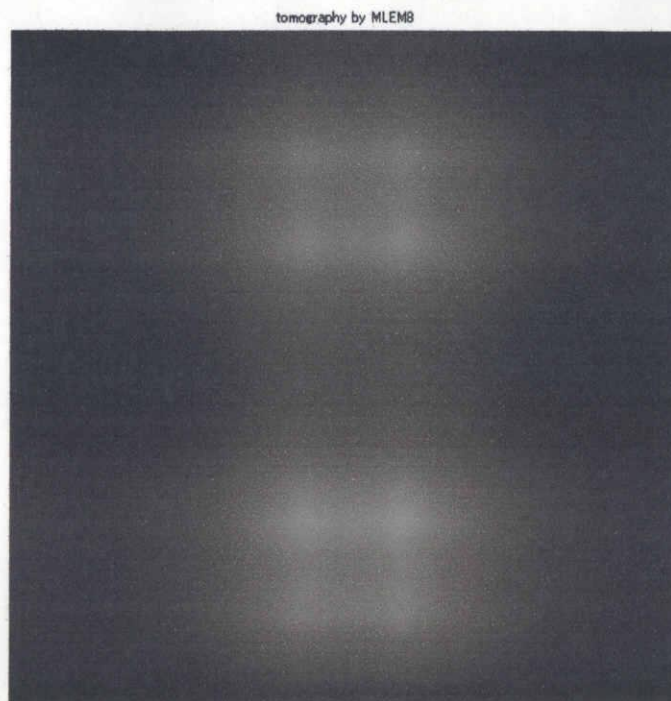


図 4. 2. 6 MLEM 法の計算結果

4. 2. 3 まとめ

以上の計算より、2つの独立した計算結果は似ており、相互には矛盾がないが、以下に示す改善すべき点がある。

- アンテナ内部は発光ゼロ
- 想定される分布はアンテナを中心にほぼ軸対称であるのに対し得られた結果はほぼ正方形状。

次にこれらに関するアルゴリズムの改良案を示す。

4. 3 計算アルゴリズムの改良

4. 3. 1 改良の概要

4. 2で得た結果を踏まえ、2点について以下に示すように改良した。

アンテナ及びアンテナ投影部についての改良：

毎回の繰り返し計算の中に図 4. 3. 1に示すような追加処理を加えた。

- ① アンテナ内部に対応する位置の値を強制的に0にする。
- ② アンテナ投影部分（図の赤いストライプの部分）については、赤いストライプの部分の両側の値から線形補間で得た値を代入する。

なお、データ前処理で行った線形補間はCT計算を行う前の投影データに対するものであり、ここで追加した線形補間は繰り返し計算毎に得られる断層画像に対するもので、全く別のもの（前者は1次元データ、後者は2次元データに対する線形補間）である。

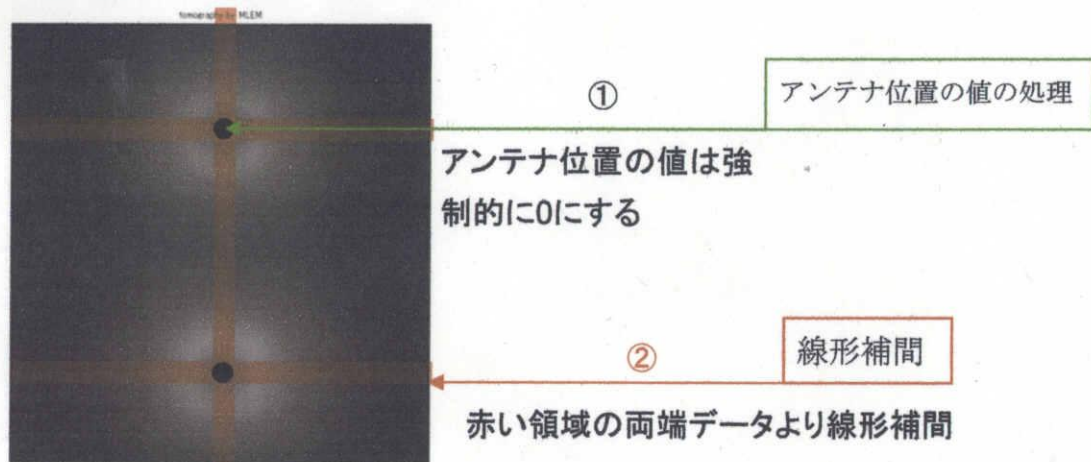


図 4.3.1 アンテナ部分とその投影部分の処理

軸対称性に関する改良：

アンテナを中心に軸対称に近い発光分布であると推定されるが完全には軸対称でないことに注意する必要がある。そこで図 4.3.2 に示すように、ある程度計算の収束が進む目安：50 回毎に、アンテナを中心にアンテナ付近の発光を同じ半径毎に平均化する処理を追加した。全体の繰り返し計算数は、このような計算処理を追加してもほぼ収束する回数：199 回とした。つまり最後は 49 回繰り返し計算をし、その後軸対称平均化処理を行わないで出力、非軸対称性が残るような処理とした。なお、軸対称平均化処理は 2 個のアンテナ断面中心間距離の半分の半径の範囲までとした。

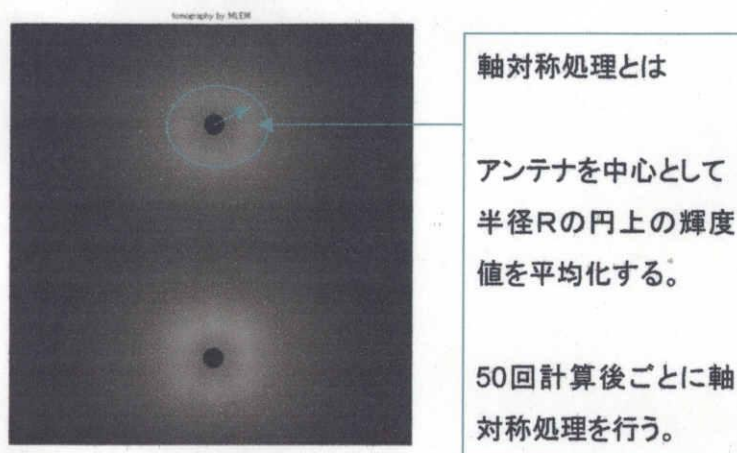


図 4.3.2 軸対称処理

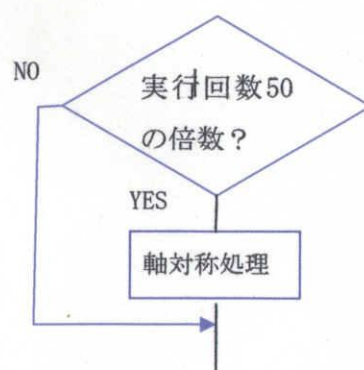


図 4.3.3 軸対称処理の流れ図

図 4.3.3 は、追加した軸対称処理の流れ図である。

4. 3. 2 計算フロー

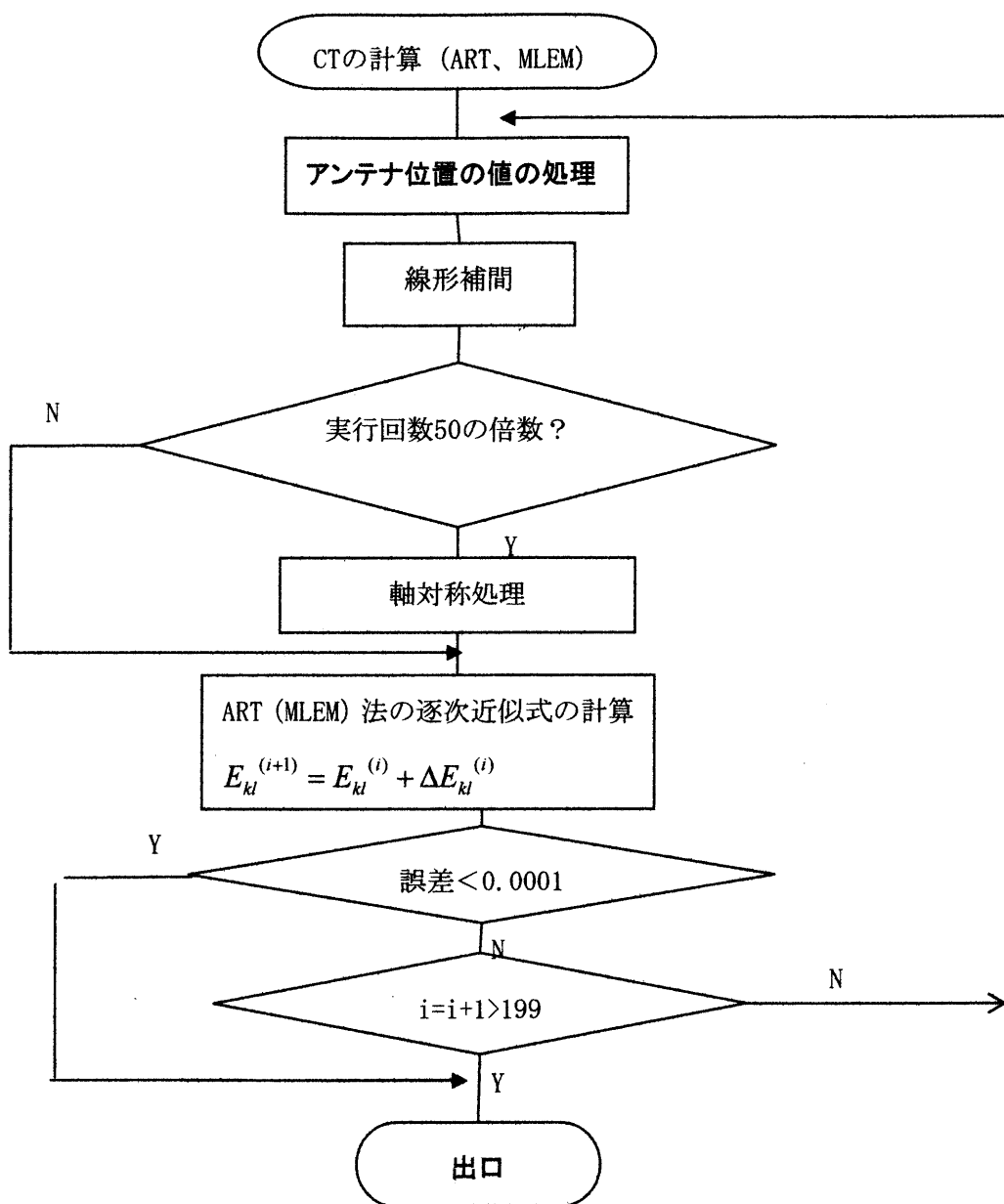


図 4.3.4 改良後の全体の計算フロー

4.3.1 に示した改良を加えた全体の計算フローを図 4.3.4 に示す。

- ① 主プログラムからデータを読み込む。
- ② 主プログラムから読み込んだデータのうち、アンテナ位置のデータを強制的に 0 にする。
- ③ アンテナの影の部分線を線形補間する。

- ④ 実行回数をチェックして、50の倍数の場合は軸対称処理を行う。それ以外の場合は軸対称処理を行わない。
- ⑤ 逐次近似式を利用して計算する。
- ⑥ 指定した誤差と比べて、大きい場合は続ける、小さい場合は終了して、主プログラムに戻る。
- ⑤ 実行回数が199より小さい場合元に戻る、それ以外の場合は主プログラムに戻る。

最終結果は、最後の軸対称処理後、49回計算を繰り返した結果とし、部分的な非対称成分が残るようにした。

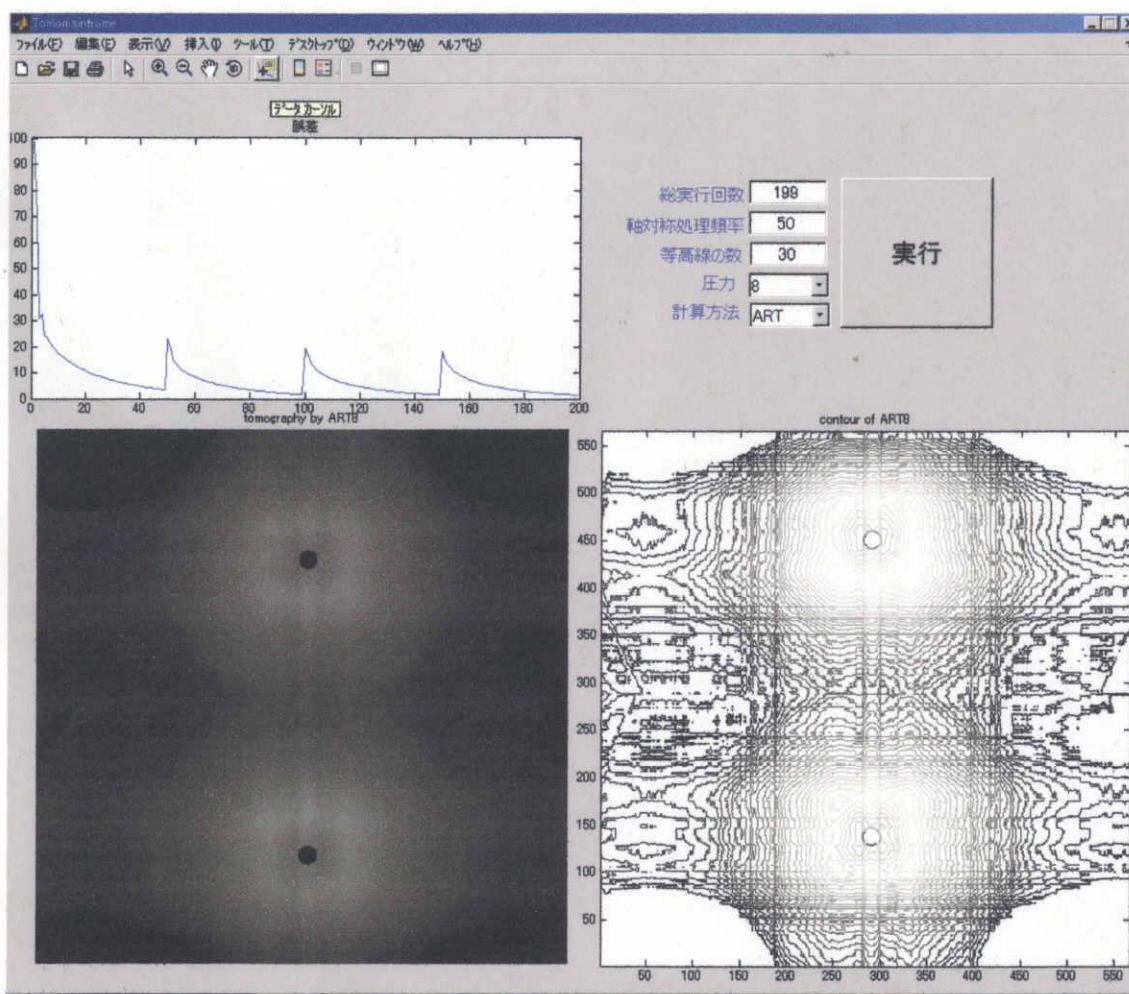


図 4.3.5 改良プログラムの実行画面

プログラムの実行画面を図 4.3.5 に示す。このプログラムは3つの画像表示部分がある、左上は誤差の変化を表す図、左下は計算した断面写真、右下は等高線表示である。右上の部分は条件入力（選択）部分である。上から総実行回数

の入力、軸対象処理頻率の入力、等高線の本数の入力、圧力の選択、計算方法の選択ができるようになっている。全ての条件を入力（選択）したら、実行ボタンを押すことにより計算を開始する。図 4.3.5 は総実行回数 199 回、50 回毎に軸対象処理、等高線 30 本、圧力は 8 Pa で ART 法において計算した場合の例である。

4. 3. 3 計算結果

【ART法】

図 4.3.6 に圧力を変化させた場合の断層画像と等高線表示を示す。高周波出力は 50W 一定とした。アンテナ近傍で発光が弱まっていること、圧力上昇に伴い、発光の範囲がアンテナに近づいてゆく様子が再現されている。

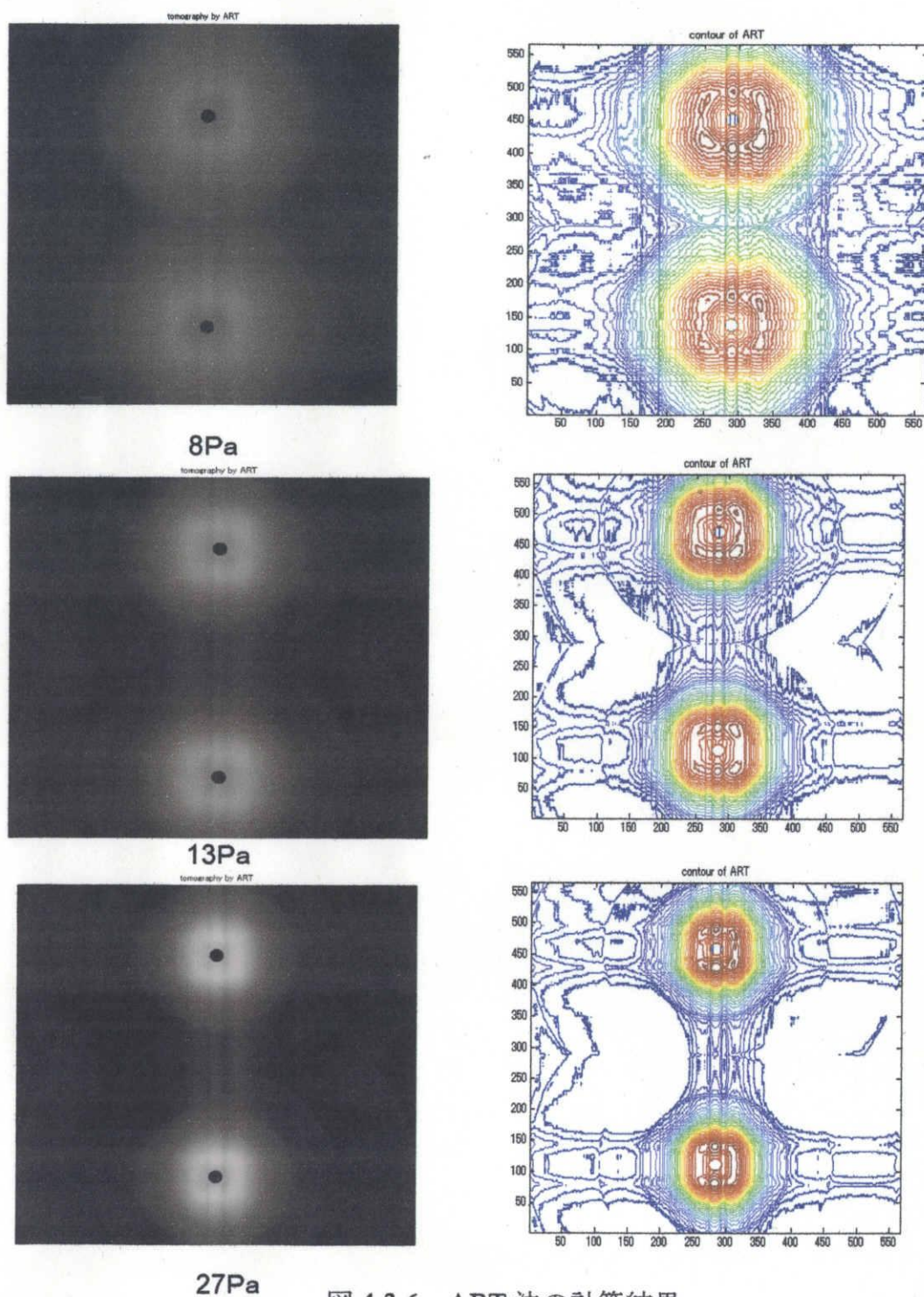


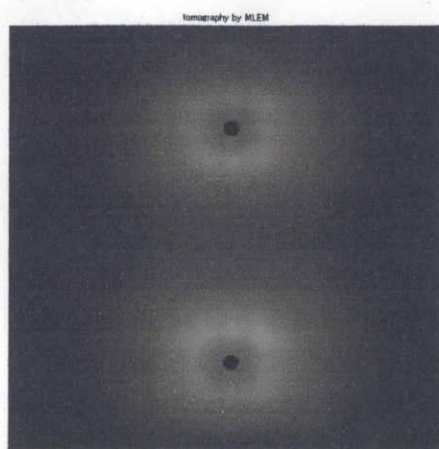
図 4.3.6 ART 法の計算結果

【MLEM 法】

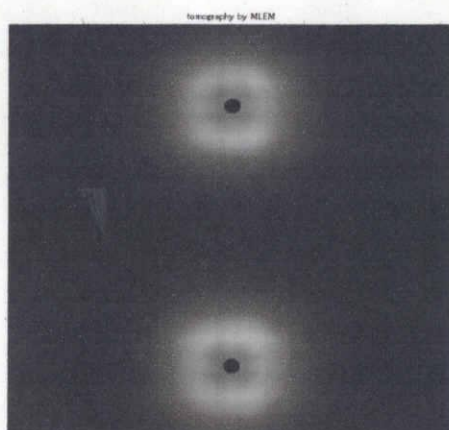
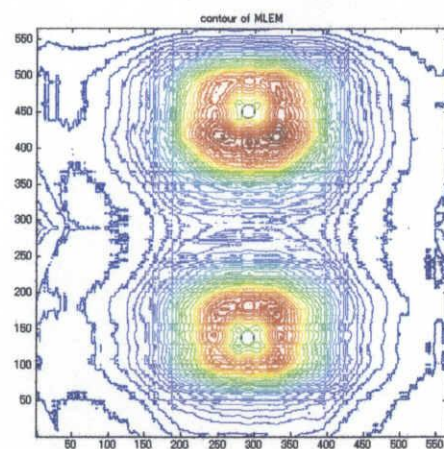
同様に MLEM 法で計算した場合の結果を図 4.3.7 に示す。計算条件は ART 法と同一である。傾向は ART 法と同様であるが

- 軸対称性があまりなく、四角さが残っている
- ART 法では強制軸対称とした部分とそうでない部分とで不連続さが残っているが、MLEM 法ではなめらかにつながっている

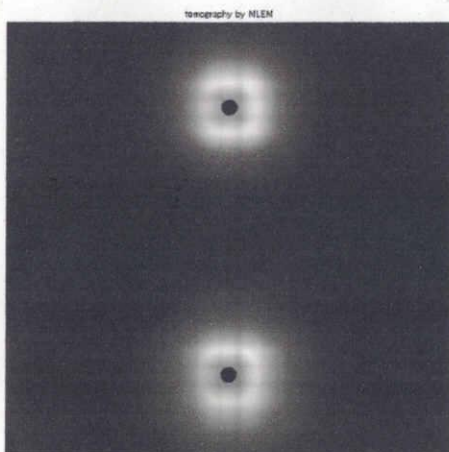
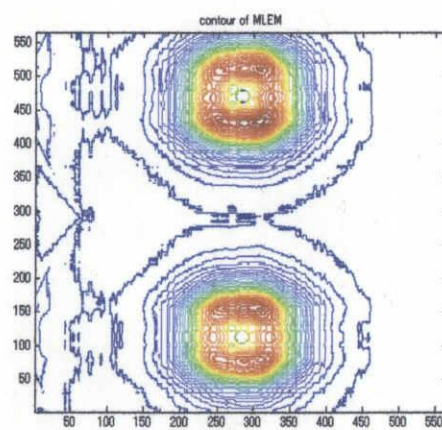
という違いが見られる。この違いは、計算した条件では MLEM 法の収束が早いのに、どちらも最終回に 49 回の繰り返し計算としたことによるものと考えられる。



8Pa



13Pa



27Pa

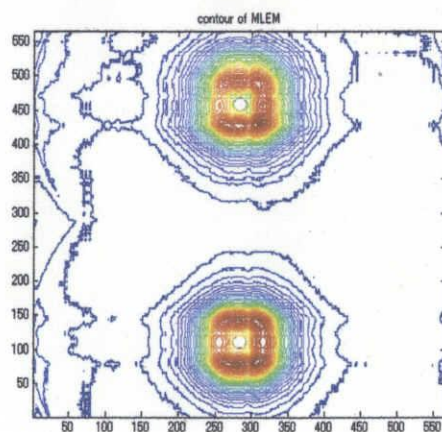


図 4.3.7 MLEM 法の計算結果

ART 法と MLEM 法計算結果の比較

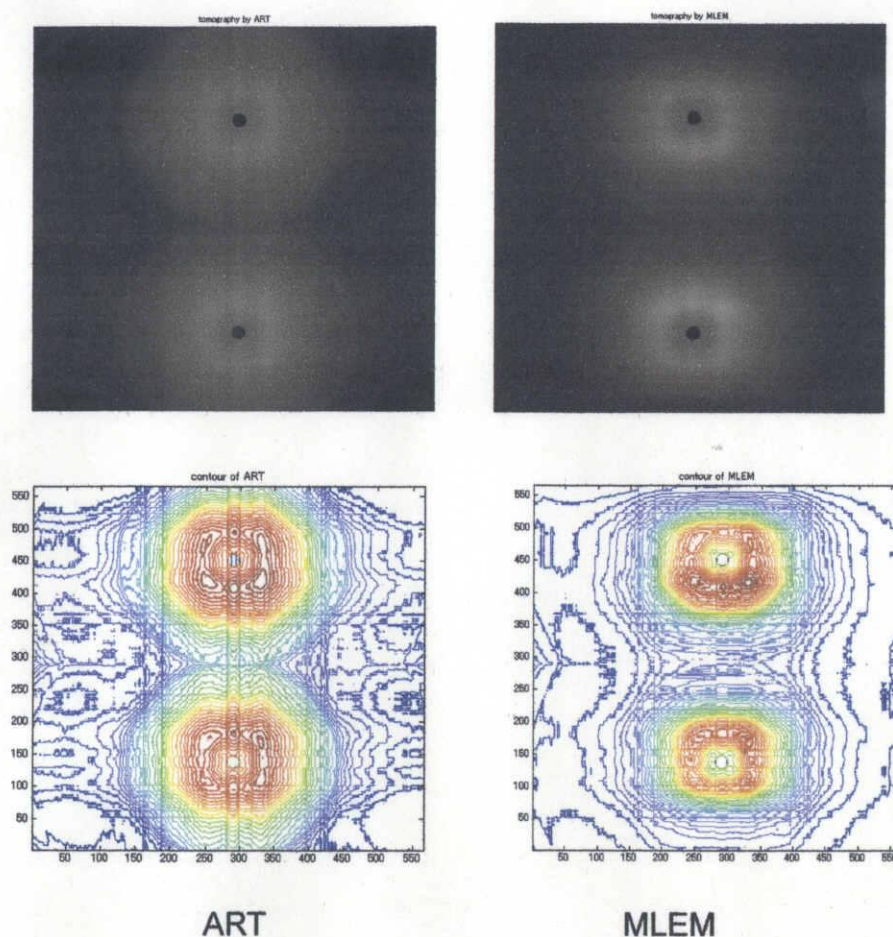


図 4.3.8 比較図

図 4.3.8 に 8Pa、50W の同一のデータについて改良した ART 法、MLEM 法により得た発光の等高線表示を比較のために並べて再掲した。すでに書いたように、ART 法の方が軸対称性が出ており、よりもっともらしい分布となっている。ただし、最終の繰り返し計算数を調節すれば MLEM 法でもよりもっともらしい結果が得られる可能性がある。MLEM 法では逆に四角っぽくなっている以外は発光の分布に不自然さがない。両者の良い点を併せた断層画像推定の更なる改良の余地のあることがわかる。

4. 3. 4 まとめ

ART 法と MLEM ともによく似ている断面写真が得られた。しかし、両方法の比較図から見ると、ART 法で計算結果は円く見えるが、MLEM 法の計算では実施した範囲では四角っぽさが残ってしまっている。

4. 4 高周波プラズマのトモグラフィ解析

4. 4. 1 解析の概要

CT 計算結果も含めて、以下の二点について分析する。

- 圧力依存性
- 投影データと断層分布の比較

4. 4. 2 圧力依存性

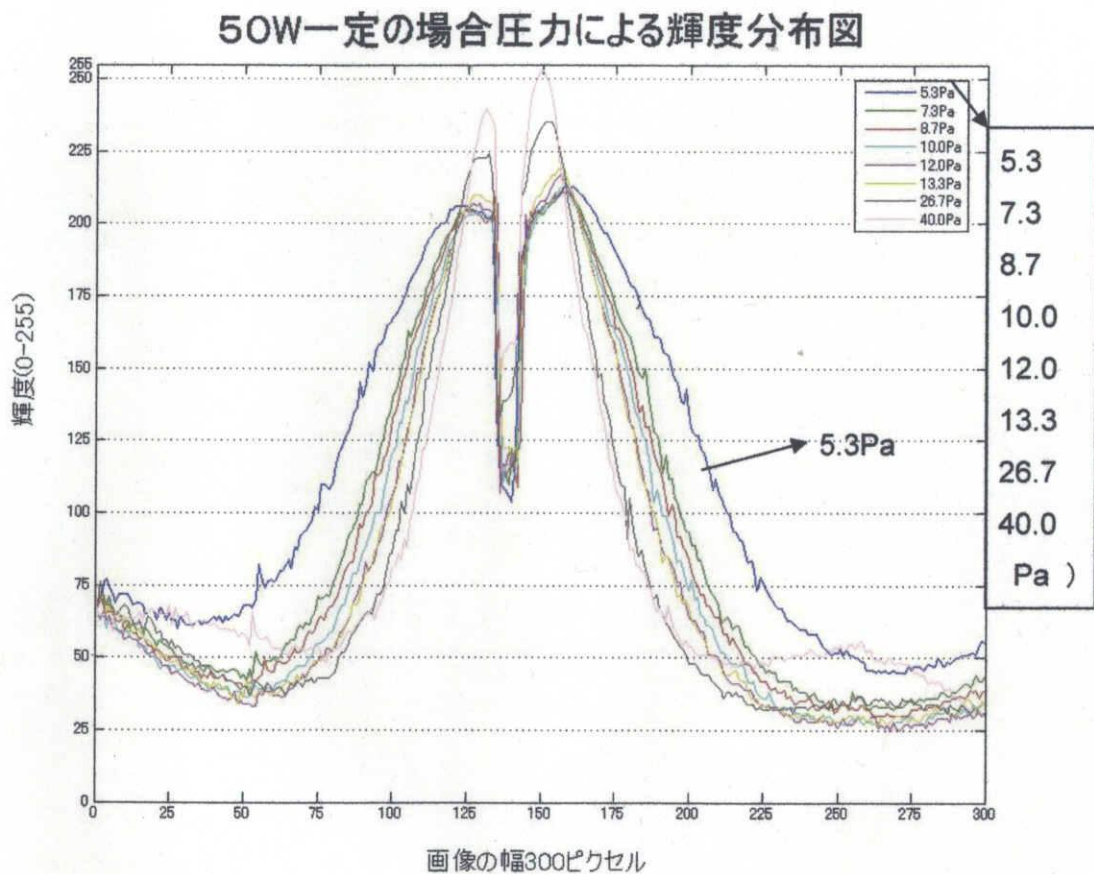


図 4. 4. 1 輝度分布図

図 4. 4. 1 に圧力を変化させた場合の側面から見た場合の発光分布をまとめて示す。輝度データは γ 補正済みで、アンテナ表面の位置の明るさが等しくなるように絶対値を修正した。圧力の増加につれて、発光範囲が狭くなり、アンテナ近傍で発光強度が強くなることが良くわかる。ただし、視線方向に平均化されているためアンテナごく近傍で発光が弱まっていることについては後述のとおり断層画像の方がより明確にわかる。

4. 4. 3 投影データと断層分布

断層分布の説明：

図 4. 4. 2 に示した赤い線のように断層推定画像を輪切りにし、かつアンテナ中心をとる直線上の発光分布を図 4. 4. 4 の下図に示す。また、図 4. 4. 2 に示した赤い線について同様の処理をしたものを図 4. 4. 5 の下図に示す。図 4. 4. 4、5 図の上図はいずれも元となる写真データの分布、及び ART、MELM 両方で得た断層画像についてあらためて写真と同様に視線方向に積分して得た投影データをまとめて示したものである。

いずれも投影データについては元の写真データとほぼ重なるほどに計算は収束していることがわかる。一方断層画像中のアンテナをとる直線上の発光分布は ART 法と MLEM 法で有意な差が見られる。特にアンテナから少し離れた一番明るい部分の明るさが異なる。しかしそのピークの位置は投影データも含めてほとんど変わらない。またいずれにしても投影データよりもアンテナ付近で暗くなっている程度は大きくなっており、投影データから推察するよりもアンテナ近傍の発光が弱いことが CT 計算からわかる。

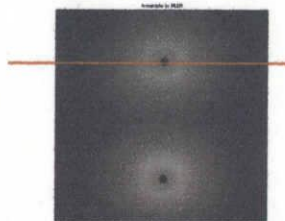


図 4. 4. 2 分布データ A 方向説明図 (図 4. 4. 4 下図に対応)

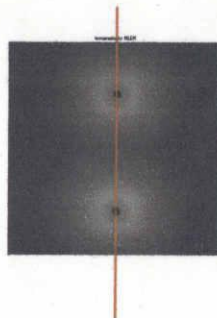


図 4. 4. 3 分布データ B 方向説明図 (図 4. 4. 5 下図に対応)

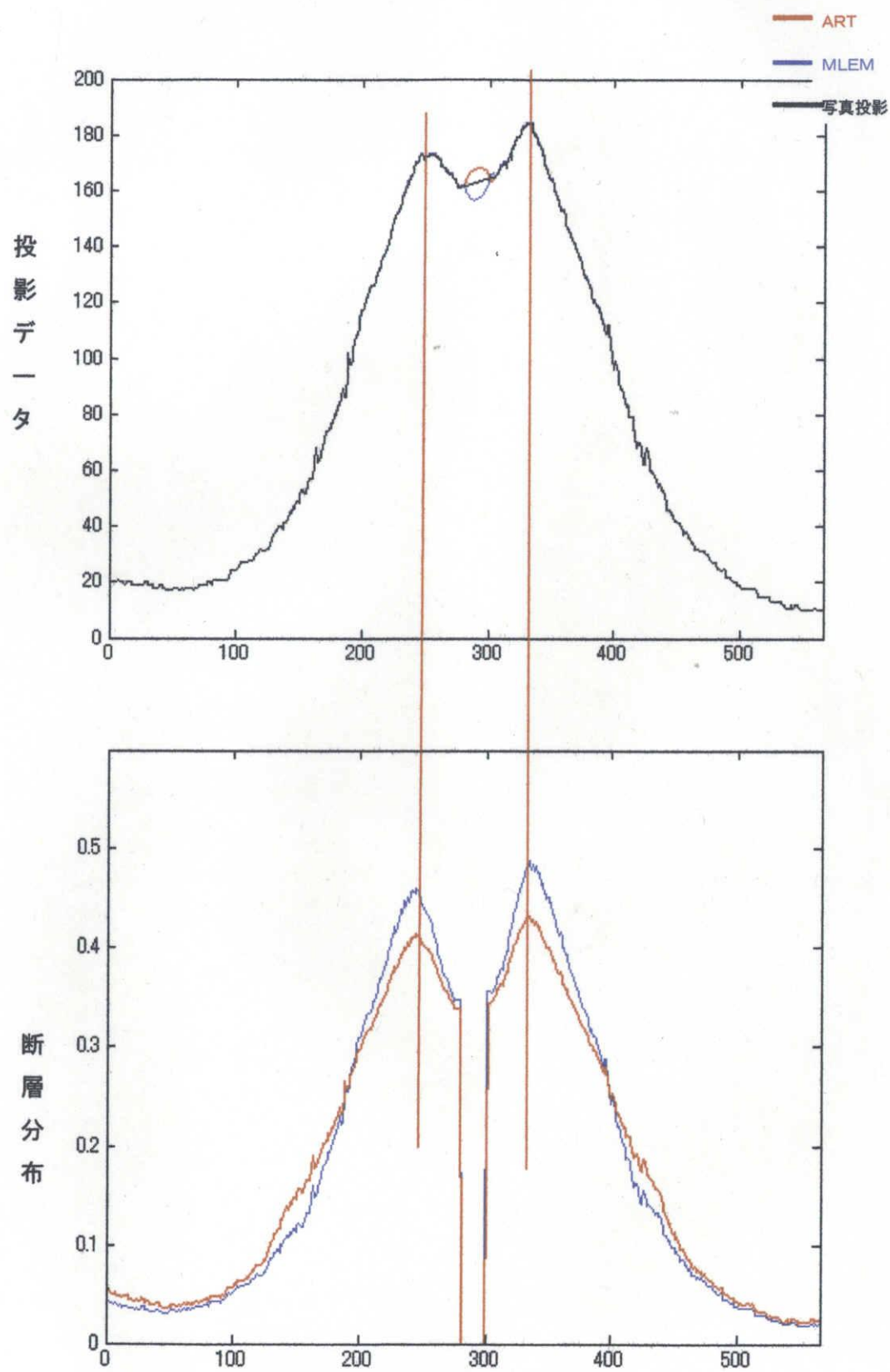


図 4.4.4 分布データ A 方向比較図

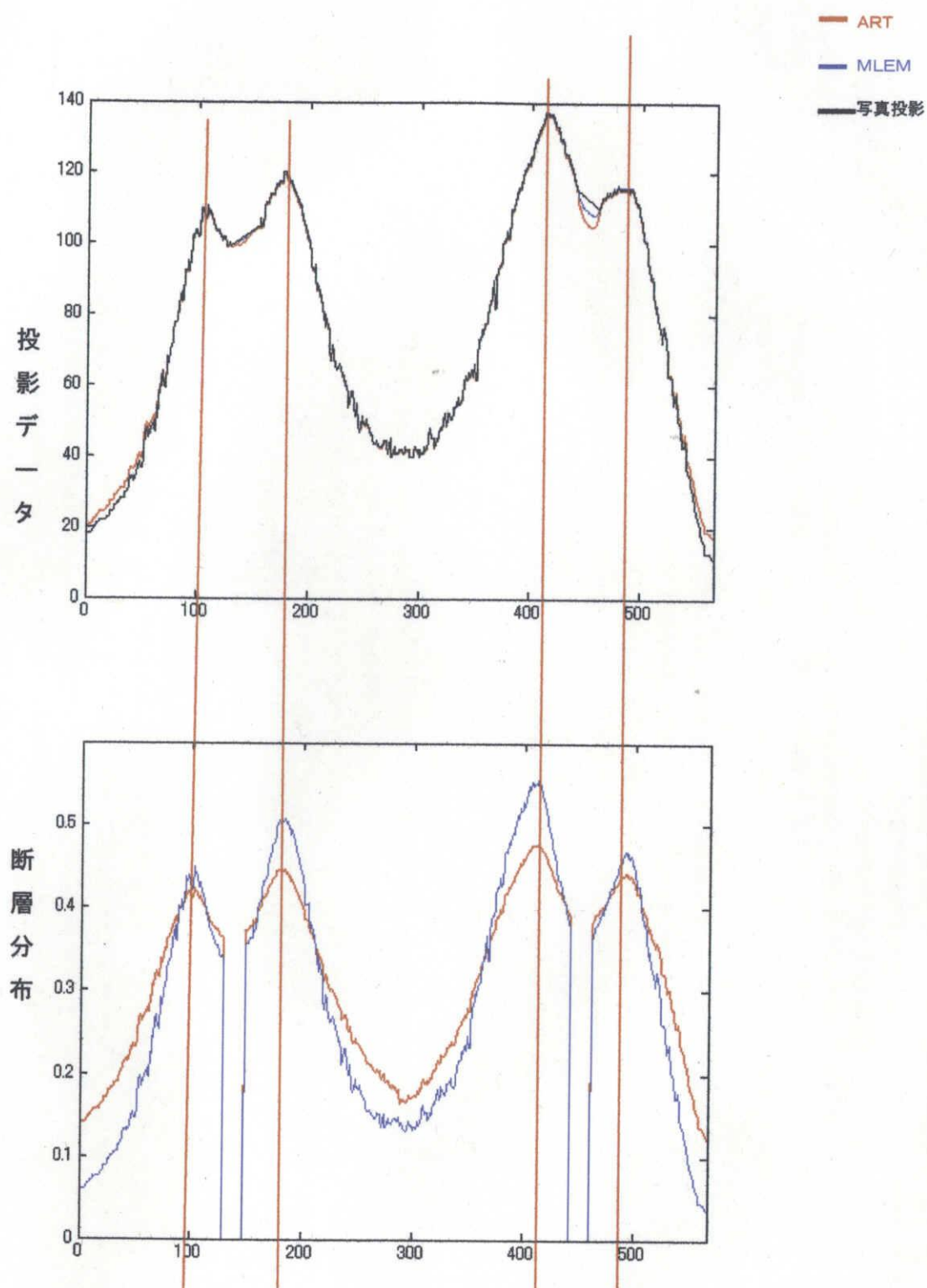


図 4.4.5 分布データ B 方向比較図

4. 4. 4 まとめ

投影データは両方法とも元データとよく一致し（収束している）、よく似ている結果がえられた。

断層分布ではアンテナ近傍で発光が弱まっていることがより明確になった。一方 ART 法と MLEM 方とで一番明るい部分の明るさの程度が有意にことなっている。一番明るい部分の位置はほとんど変わっていないので位置の推定には問題ないが、明るさの分布についてはより妥当な推定分布が得られるよう、アルゴリズムにさらなる改良の余地のあることがわかった。

5. まとめ

まとめ

1. 環状アンテナにより生成された高周波プラズマの生成のメカニズムをより良く理解するために、プラズマの発光分布を2方向からの観測データに基づきCTにより再生することを試みた。
2. 対象とするプラズマはドーナツ状でほぼ軸対象であるのでCTアルゴリズムにそれを取り入れることでたった2方向からのデータでもある程度信頼できる断層画像が得られた。
3. CTにより投影データのみかけ以上にアンテナ近傍で発光が弱まっていることがわかった。
4. ART法とMLEM法で収束の速さ、軸対称性の保持、得られた断層分布に差異が見られた。実際の断層画像は2方向ではこの程度のあいまいさが残るものと思われる。

今後

- 発光密度とプラズマ密度が最大となる位置とその傾向がほぼ一致するという初期的な結果が得られつつあるが、その詳細な検討は今後の課題である。
- ここではART法とMLEM法しか使っていないが、計算方法を増えて、例えば最初的に軸対称を想定したアーベル変換という方法を使って計算して、もし一致な結果が得られれば、この計算の有効性が示される。これも今後の課題である

謝辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり、終始熱心にご指導いただいた三重大学教育学部松岡守教授、川口元一名誉教授に心から感謝いたします。

また、様々な面でご協力いただいた、電気工学研究室の方々に感謝いたします。

参考文献

1. 辻 敬一郎 「プラズマ診断の基礎」名古屋大学出版会 pp. 138～145
1990 年
2. Aninash G. Kak, Malcolm Slaney 「Principles of Computerized Tomographic Imaging」 P275～295 (2001)
3. 「Positron Emission Tomography 講座」(入門編) 大阪大学医学部
4. 横井孝司 「OSEM 法による画像再構成」 第 40 回核医学分科会基礎講座
5. 長谷川 元洋 無極高周波放電 —プラズマ球の特性について—
1993
6. 門手 正昭 無極高周波放電プラズマの相転移に関する研究 1995
7. 春名 隆行 無極高周波放電球 Ar プラズマの解析 1994
8. 松尾 幸輝 無極高周波放電球における プラズマ密度・温度分布の解析
1996
9. 吉田 満有子 無電極高周波放電の特性 ～モード変化の観測～
1997
10. 中村 亜実 プラズマ可視光のトモグラフィ 2000
11. 脇田 圭造 トモグラフィに関する研究 2001
12. M. Shinomiya et. al, J. Illum. Eng. Soc., 2-1, p. 44 (1991).
13. D. O. Wharmby, IEE Proc. -A, 140, p. 465 (1993).

付録Ⅰ ガンマ変換プログラム

```
function Correction = gammacorrection(Image, GammaValue)
%
%   Function to calculate the Gamma Correction for a particular image
% Usage:
% Correction = gammacorrection(InputImage, GammaValue)
% Outputs:
%           Correction = gamma correction for the input image
% Inputs:
%           Image = input image data of unit8

Image = double(Image);

Correction = floor(255 * (Image./255).^(1/GammaValue));
Correction=uint8(Correction);
```

付録Ⅱ データ前処理プログラム

```
function [yokoCo, tateCo]=modifydata(yoko, tate, s1, e1, s2, e2, s3, e3)
stepyoko1=double((yoko(1, s1)-yoko(1, e1)))/double(e1-s1);
stepyoko2=double((yoko(1, s2)-yoko(1, e2)))/double(e2-s2);
steptate=double((tate(1, s3)-tate(1, e3)))/double(e3-s3);
yokoCo=double(yoko);
tateCo=double(tate);
for i=(s1+1):e1,
    yokoCo(1, i)=yokoCo(1, s1)-stepyoko1*(i-s1);
end;
for i=(s2+1):e2,
    yokoCo(1, i)=yokoCo(1, s2)-stepyoko2*(i-s2);
end;
for i=(s3+1):e3,
    tateCo(1, i)=tateCo(1, s3)-steptate*(i-s3);
end;
```

```

function [p1,p2]=datapreprocessa(pic1,pic2);
p27=rgb2gray(pic1);
p27s=rgb2gray(pic2);
p27=imresize(p27,0.80);
p27=imcrop(p27,[110 150 565 200]);
p27s=imcrop(p27s,[10 20 565 400]);
p1=gammaCorrection(p27,0.6);
p2=gammaCorrection(p27s,0.6);
% figure, imshow(p27);
% figure, imshow(p27s);

```

付録Ⅲ 主プログラム

```

function varargout = Tomomainframe(varargin)
% TOMOMAINFRAME M-file for Tomomainframe.fig
%     TOMOMAINFRAME, by itself, creates a new TOMOMAINFRAME or raises the
existing
%     singleton*.
%
%     H = TOMOMAINFRAME returns the handle to a new TOMOMAINFRAME or the
handle to
%     the existing singleton*.
%
%     TOMOMAINFRAME('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls
the local
%     function named CALLBACK in TOMOMAINFRAME.M with the given input
arguments.
%
%     TOMOMAINFRAME('Property','Value',...) creates a new TOMOMAINFRAME
or raises the
%     existing singleton*. Starting from the left, property value pairs
are
%     applied to the GUI before Tomomainframe_OpeningFunction gets called.
An
%     unrecognized property name or invalid value makes property

```

```

application
%      stop. All inputs are passed to Tomomainframe_OpeningFcn via
varargin.
%
%      *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only
one
%      instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Copyright 2002-2003 The MathWorks, Inc.

% Edit the above text to modify the response to help Tomomainframe

% Last Modified by GUIDE v2.5 18-Jan-2007 11:30:44

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @Tomomainframe_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @Tomomainframe_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

```

```

% — Executes just before Tomomainframe is made visible.
function Tomomainframe_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin    command line arguments to Tomomainframe (see VARARGIN)

% Choose default command line output for Tomomainframe
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Tomomainframe wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% — Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Tomomainframe_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% — Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB

```



```

% handles      structure with handles and user data (see GUIDATA)
global nn T vv bb1 bb2 e co;

load data1030;

us= get(findobj(gcf,'Tag','popupmenu1'),'value');
switch(us)
    case 1,
        sumyoko=sum(yokoCopy(1,:));
        sumtate=sum(tateCopy(1,:));
        yoko1(1,:)=sumtate/sumyoko*double(yokoCopy(1,:));%two mountain
        tate1(1,:)=1.0*double(tateCopy(1,:));%one mountain
    case 2, %% 13p
        sumyoko=sum(p13YCopy(1,:));
        sumtate=sum(p13TCopy(1,:));
        yoko1(1,:)=sumtate/sumyoko*double(p13YCopy(1,:));%two mountain
        tate1(1,:)=1.0*double(p13TCopy(1,:));%one mountain
    case 3, %% 27p
        sumyoko=sum(p27YCopy(1,:));
        sumtate=sum(p27TCopy(1,:));
        yoko1(1,:)=sumtate/sumyoko*double(p27YCopy(1,:));%two mountain
        tate1(1,:)=1.0*double(p27TCopy(1,:));%one mountain
end

bb1=double(cat(2,yoko1,tate1));
%vv tomograpy initial data
bb2=bb1;
vv=ones(length(yoko1),length(tate1));
% [vv]=initdata;
[a,b]=size(vv);
c=length(bb1);
if abs(c-a-b)>0,
    error('data wrong');
end;

```

```

% run times
nn = str2double(get(handles.edit1, 'string'));
T=str2double(get(handles.edit2, 'string'));

e=1;
co= str2double(get(handles.edit3, 'string'));
us= get(findobj(gcf, 'Tag', 'popupmenu1'), 'value');
moth=get(findobj(gcf, 'tag', 'popupmenu2'), 'value');
switch(us)
    case 1,
% %8P

        if moth == 1,

[Wart, Aerr, Aqq]=ARTauto(vv, bb1, bb2, nn, e, T, 133, 143, 441, 460, 276, 303);
            axes(handles.axes3);
            set(gcf, 'CurrentAxes', findobj(gcf, 'Tag', 'axes3'));
            plot (Aerr, 'DisplayName', 'Aerr', 'YDataSource', 'Aerr'), title('
            誤差');
            hold on;
            axes(handles.axes1);
            set(gcf, 'CurrentAxes', findobj(gcf, 'Tag', 'axes1'));
            imshow(Wart), title('tomography by ART8');
            hold on;
            axes(handles.axes2);
            set(gcf, 'CurrentAxes', findobj(gcf, 'Tag', 'Axes2'));
            contour (Wart, co), title('contour of ART8');
        else,

[Wmlem, Merr, Mqq]=MLEMauto(vv, bb1, bb2, nn, e, T, 133, 143, 441, 460, 276, 303);
            axes(handles.axes3);
            set(gcf, 'CurrentAxes', findobj(gcf, 'Tag', 'axes3'));
            plot (Merr, 'DisplayName', 'Aerr', 'YDataSource', 'Aerr'), title('

```



```

誤差');
    hold on;
    axes(handles.axes1);
    set(gcf,'CurrentAxes',findobj(gcf,'Tag','axes1'));
    figure,imshow(Wmlem),title('tomography by MLEM8');
    hold on;
    axes(handles.axes2);
    set(gcf,'CurrentAxes',findobj(gcf,'Tag','Axes2'));
    figure,contour(Wmlem,co),title('contour of MLEM8');
end;
case 2,
% %13P
    if moth==1,
[Wart,Aerr,Aqq]=ARTauto(vv,bb1,bb2,nn,e,T,98,127,459,482,268,299);
        axes(handles.axes3);
        set(gcf,'CurrentAxes',findobj(gcf,'Tag','axes3'));
        plot(Aerr,'DisplayName','Aerr','YDataSource','Aerr'),title('
誤差');
        hold on;
        axes(handles.axes1);
        set(gcf,'CurrentAxes',findobj(gcf,'Tag','axes1'));
        set(gcf,'CurrentAxes',findobj(gcf,'Tag','axes1'));
        imshow(Wart),title('tomography by ART13');
        hold on;
        axes(handles.axes2);
        set(gcf,'CurrentAxes',findobj(gcf,'Tag','Axes2'));
        contour(Wart,co),title('contour of ART13');
    else
[Wmlem,Merr,Mqq]=MLEMauto(vv,bb1,bb2,nn,e,T,98,127,459,482,268,299);
        axes(handles.axes3);
        set(gcf,'CurrentAxes',findobj(gcf,'Tag','axes3'));
        plot(Merr,'DisplayName','Aerr','YDataSource','Aerr'),title('
誤差');
        hold on;

```

```

axes(handles.axes1);
set(gcf,'CurrentAxes',findobj(gcf,'Tag','axes1'));
imshow(Wmlem),title('tomography by MLEM13');
hold on;
axes(handles.axes2);
set(gcf,'CurrentAxes',findobj(gcf,'Tag','Axes2'));
contour(Wmlem,co),title('contour of MLEM13');
end;
case 3,
%27P
if noth == 1,
[Wart,Aerr,Aqq]=ARTauto(vv,bb1,bb2,nn,e,T,97,125,447,472,270,296);
axes(handles.axes3);
set(gcf,'CurrentAxes',findobj(gcf,'Tag','axes3'));
plot(Aerr,'DisplayName','Aerr','YDataSource','Aerr'),title('
誤差');
hold on;
axes(handles.axes1);
set(gcf,'CurrentAxes',findobj(gcf,'Tag','axes1'));
imshow(Wart),title('tomography by ART27');
hold on;
axes(handles.axes2);
set(gcf,'CurrentAxes',findobj(gcf,'Tag','Axes2'));
contour(Wart,co),title('contour of ART27');
else
[Wmlem,Merr,Mqq]=MLEMauto(vv,bb1,bb2,nn,e,T,97,125,447,472,270,296);
axes(handles.axes3);
set(gcf,'CurrentAxes',findobj(gcf,'Tag','axes3'));
plot(Merr,'DisplayName','Aerr','YDataSource','Aerr'),title('
誤差');
hold on;
axes(handles.axes1);
set(gcf,'CurrentAxes',findobj(gcf,'Tag','axes1'));

```

```

imshow(Wmlem), title('tomography by MLEM27');
hold on;
axes(handles.axes2);
set(gcf, 'CurrentAxes', findobj(gcf, 'Tag', 'Axes2'));
figure, contour(Wmlem, co), title('contour of MLEM27');
end;
end

```

```

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject, 'String') returns contents of edit1 as text
%        str2double(get(hObject, 'String')) returns contents of edit1 as
a double

```

% — Executes during object creation, after setting all properties.

```

function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.

% See ISPC and COMPUTER.

```

if ispc && isequal(get(hObject, 'BackgroundColor'),
get(0, 'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject, 'BackgroundColor', 'white');
end

```

end

```

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)

```



```
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit2 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit2 as
a double
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
function edit3_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of edit3 as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of edit3 as
a double
```

```
% — Executes during object creation, after setting all properties.
function edit3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to edit3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
```

```
% See ISPC and COMPUTER.
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
% — Executes on selection change in popupmenu1.
```

```
function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
```

```
% Hints: contents = get(hObject,'String') returns popupmenu1 contents as
cell array
```

```
% contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from
popupmenu1
```

```
% — Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function popupmenu1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
```

```
% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
```

```
% See ISPC and COMPUTER.
```



```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

% — Executes on button press in pushbutton2.

```
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```

% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

% — Executes on selection change in popupmenu2.

```
function popupmenu2_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```

% hObject    handle to popupmenu2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

```

% Hints: contents = get(hObject,'String') returns popupmenu2 contents as cell array

% contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from popupmenu2

% — Executes during object creation, after setting all properties.

```
function popupmenu2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
% hObject    handle to popupmenu2 (see GCBO)
```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

付録IV ART プログラム

```

function [W, errdata, qq]=artexp(W, b1, b2, Niter, e, t, s1, e1, s2, e2, s3, e3);
% [X, err, br]=artexp(W, b, Niter, e);
% Input:
% -----
% W.....| The initial matrix. [N*M]
% b1.....| modified measurement matrix . [1*N]
% b2.....| The measurement matrix. [1*N]
% Niter...| Number of iterations
% e.....| Relaxation factor.
%
% Output:
% -----
% W.....| Reconstructed matrix. [N*M]
% err....| Error committed in the reconstruction
% qq.....| Final solution ;project data [1*(N+M)]
% s1,e1... start point and end point
% -----
b=b1;
[N, M]=size(W);
qq=ones(1, M+N);
errdata=zeros(1, Niter);
averW1=zeros(2, 356);
averW2=zeros(2, 356);

```

```

modifytimes=t;
% % (n-1) times run
for ii=1:Niter,
% especial
    for t1=(s1+1):e1,
        W(t1,:)=W(s1,:)+(W(e1+1,:)-W(s1,:))*(t1-s1)/(e1-s1-1);
    end;
    for t2=(s2+1):e2,
        W(t2,:)=W(s2,:)+(W(e2+1,:)-W(s2,:))*(t2-s2)/(e2-s2-1);
    end;
    for t3=(s3+1):e3,
        W(:,t3)=W(:,s3)+(W(:,e3+1)-W(:,s3))*(t3-s3)/(e2-s2-1);
    end;

    for xrow=1:288,
    for ycol=1:566,

x1=round(((xrow-round((e1+s1)/2))^2+(ycol-round((e3+s3)/2))^2)^0.5);
    if x1<10
        W(xrow,ycol)=0;
%     elseif x1<367
    else
        averW1(1,x1-9)=averW1(1,x1-9)+W(xrow,ycol);
        averW1(2,x1-9)=averW1(2,x1-9)+1;
    end;
end;
end;
if rem(ii,modifytimes)==0,
for xrow=1:288,
    for ycol=1:566,

x1=round(((xrow-round((e1+s1)/2))^2+(ycol-round((e3+s3)/2))^2)^0.5);
    if (x1>9)&&(x1<367),
        W(xrow,ycol)=averW1(1,x1-9)/averW1(2,x1-9);

```

```

        end;
    end;
end;
end;
for xrow=289:566,
    for ycol=1:566,

x2=round(((xrow-round((e2+s2)/2))^2+(ycol-round((e3+s3)/2))^2)^0.5);
    if x2<10,
        W(xrow,ycol)=0;
    else
%         if x2<367
            averW2(1,x2-9)=averW2(1,x2-9)+W(xrow,ycol);
            averW2(2,x2-9)=averW2(2,x2-9)+1;
        end;
    end;
end;
if rem(ii,modifytimes)==0,
for xrow=289:566,
    for ycol=1:566,

x21=round(((xrow-round((e2+s2)/2))^2+(ycol-round((e3+s3)/2))^2)^0.5);
    if (x21>9)&&(x21<367)
        W(xrow,ycol)=averW2(1,x21-9)/averW2(2,x21-9);
    end;
end;
end;
end;
% ART
    for jj=1:N,
        Q = sum(W(jj,:));
        delta=(b(jj)-Q)/N;
        W(jj,:)=W(jj,:)+0.08*delta;
    end;
end;

```

```

for kk=1:M,
%      kk=jj;
      Q = sum(W(:, kk));
      delta=(b(kk+N)-Q)/M;
      W(:, kk)=W(:, kk)+1.5*delta;
end;
W= W.*(1+sign(W))/2.*abs(sign(W));
% ART

for xrow=1:288,
    for ycol=1:566,
%      x1=round(((xrow-139)^2+(ycol-288)^2)^0.5);
x1=round(((xrow-round((e1+s1)/2))^2+(ycol-round((e3+s3)/2))^2)^0.5);
        if x1<10
            W(xrow, ycol)=0;
        end;
    end;
end;
for xrow=289:566,
    for ycol=1:566,
%      x2=round(((xrow-451)^2+(ycol-288)^2)^0.5);
x2=round(((xrow-round((e2+s2)/2))^2+(ycol-round((e3+s3)/2))^2)^0.5);
        if x2<10,
            W(xrow, ycol)=0;
        end;
    end;
end;

% New project data
for jj=1:N,
    qq(jj) = sum(W(jj, :));
end;
for kk=1:M,
    qq(N+kk)= sum(W(:, kk));

```



```

        end;
    %    if err<=0.0001,
    %        break;
    %    end;
    %    err=sum(abs(1.-qq./b2)*100)/length(b2);
    errdata(1,ii)=sum(abs(1.-qq./b)*100)/length(b);
end;
disp(strcat(' Art
iterations:', num2str(ii), ' error:', num2str(errdata(1,ii))));

```

付録V MLEM 法のプログラム

```

function [W, errdata, qq]=artexp(W, b1, b2, Niter, e, t, s1, e1, s2, e2, s3, e3);
% [X, err, br]=artexp(W, b, Niter, e);
% Input:
% -----
% W.....| The initial matrix. [N*M]
% b1.....| modified measurement matrix . [1*N]
% b2.....| The measurement matrix. [1*N]
% Niter...| Number of iterations
% e.....| Relaxation factor.
%
% Output:
% -----
% W.....| Reconstructed matrix. [N*M]
% err....| Error committed in the reconstruction
% qq.....| Final solution :project data [1*(N+M)]
% s1,e1... start point and end point
% -----
b=b1;
[N, M]=size(W);
qq=ones(1, M+N);
errdata=zeros(1, Niter);
averW1=zeros(2, 500);
averW2=zeros(2, 500);

```

```

modifytimes=t;
% % (n-1) times run
for ii=1:Niter,
% especial
    for t1=(s1+1):e1,
        W(t1,:)=W(s1,:)+(W(e1+1,:)-W(s1,:))*(t1-s1)/(e1-s1-1);
    end;
    for t2=(s2+1):e2,
        W(t2,:)=W(s2,:)+(W(e2+1,:)-W(s2,:))*(t2-s2)/(e2-s2-1);
    end;
    for t3=(s3+1):e3,
        W(:,t3)=W(:,s3)+(W(:,e3+1)-W(:,s3))*(t3-s3)/(e2-s2-1);
    end;
    for xrow=1:288,
    for ycol=1:566,

x1=round(((xrow-round((e1+s1)/2))^2+(ycol-round((e3+s3)/2))^2)^0.5);
        if x1<10
            W(xrow,ycol)=0;
%         elseif x1<367
        else
            averW1(1,x1-9)=averW1(1,x1-9)+W(xrow,ycol);
            averW1(2,x1-9)=averW1(2,x1-9)+1;
        end;
    end;
end;
if rem(ii,modifytimes)==0,
for xrow=1:288,
    for ycol=1:566,

x1=round(((xrow-round((e1+s1)/2))^2+(ycol-round((e3+s3)/2))^2)^0.5);
        if (x1>9)&&(x1<367),
            W(xrow,ycol)=averW1(1,x1-9)/averW1(2,x1-9);
        end;
    end;
end;

```

```

        end;
    end;
end;
for xrow=289:566,
    for ycol=1:566,

x2=round(((xrow-round((e2+s2)/2))^2+(ycol-round((e3+s3)/2))^2)^0.5);
        if x2<10,
            W(xrow,ycol)=0;
        else
%            if x2<367
                averW2(1,x2-9)=averW2(1,x2-9)+W(xrow,ycol);
                averW2(2,x2-9)=averW2(2,x2-9)+1;
            end;
        end;
    end;
end;
if rem(ii,modifytimes)==0,
for xrow=289:566,
    for ycol=1:566,

x21=round(((xrow-round((e2+s2)/2))^2+(ycol-round((e3+s3)/2))^2)^0.5);
        if (x21>9)&&( x21<367)
            W(xrow,ycol)=averW2(1,x21-9)/averW2(2,x21-9);
        end;
    end;
end;
end;
end;
%MLEM
for y1=1:566,
    ycount(1,y1)=sum(W(y1,:));
    ycount(1,y1+566)=sum(W(:,y1));
end;
for y2=1:566,
    for y3=1:566,

```

```

        ken=b(1,y2)/ycount(1,y2)+b(1,y3+566)/ycount(1,y3+566);
        W(y2,y3)=W(y2,y3)/2*ken;
    end;
end;
W= W.*(1+sign(W))/2.*abs(sign(W));
%end MLEM

    for xrow=1:288,
    for ycol=1:566,
%        x1=round(((xrow-139)^2+(ycol-288)^2)^0.5);

x1=round(((xrow-round((e1+s1)/2))^2+(ycol-round((e3+s3)/2))^2)^0.5);
        if x1<10
            W(xrow,ycol)=0;
        end;
    end;
end;
    for xrow=289:566,
    for ycol=1:566,
%        x2=round(((xrow-451)^2+(ycol-288)^2)^0.5);

x2=round(((xrow-round((e2+s2)/2))^2+(ycol-round((e3+s3)/2))^2)^0.5);
        if x2<10,
            W(xrow,ycol)=0;
        end;
    end;
end;
% New project data
    for jj=1:N,
        qq(jj) = sum(W(jj,:));
%        end
    end;
    for kk=1:M,
        qq(N+kk)= sum(W(:,kk));

```

```

        end;
    %     if err<=0.0001,
    %         break;
    %     end;
    % % error
    % err=sum(abs(1.-qq./b2)*100)/length(b2);
    errdata(1,ii)=sum(abs(1.-qq./b)*100)/length(b);
end;
disp(strcat(' MLEM
iterations:',num2str(ii),' error:',num2str(errdata(1,ii))));
% save(tmp_file,'W','qq','err');

```