

平成 21年 6月 1日現在

研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19760608  
 研究課題名(和文)医療用ピンポイントX線の実現に向けたレーザープラズマビーム源の高度化  
 研究課題名(英文)Upgrade of laser plasma beam source towards pinpoint X-ray generation for medical treatment  
 研究代表者  
 山崎淳 (YAMAZAKI ATSUSHI)  
 東京大学・大学院工学系研究科・助教  
 研究者番号：10436537

## 研究成果の概要：

これまでに、ガスターゲットに 0.2T の外部磁場を印加する事により、発生電子ビームの指向性及び、発生安定性が飛躍的に向上する事が確認されている。これは、電子発生時のプラズマ計測の結果及び、シミュレーションの結果から、レーザーのプリパルスによって生じるプリプラズマ形状が外部磁場によって制御されている為であると考えられる。しかし、発生する電子ビームのエネルギースペクトルは熱的なエネルギースペクトルな為、実用上に問題がある。この問題については、シミュレーションの結果から、より高強度な外部磁場を印可する事により、チャンネル状のプリプラズマが形成され、単色の電子ビームの発生が可能である事がシミュレーションの結果より示唆されている。そこで、新たに 1T の磁場を発生させる磁気回路の設計、製作を行い、1T 外部磁場印加実験を行った。その結果、チャンネル状のプリプラズマの発生が確認された。また、1T の外部磁場をガスターゲットに印加する実験を行う際、意図的にレーザーの圧縮用グレーティングへの入射角をずらし、レーザーのプリパルスレベルを変化させる事により、準単色電子ビームの発生が確認された。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,900,000	0	2,900,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	150,000	3,550,000

研究分野：レーザープラズマ加速

科研費の分科・細目：(分科)総合工学(細目)加速器・ビーム工学

キーワード：レーザー航跡場加速、プラズマカソード、プラズマ計測

## 1. 研究開始当初の背景

現在、光線力学療法(PDT)が、悪性腫瘍などの低侵襲的治療法として臨床応用されてい

る。PDT は、ポルフィリンやフタロシアニンなどの光増感剤が可視光照射下で産生する一重項酸素(活性酸素の一種)の強力な酸化反応により悪性腫瘍を死滅させる治療法で

ある。この光増感剤に生体に無害である有機シンチレータを包含させることにより、X線を用いてPDTが行えるようになる。このX線を用いたPDTの概念図を図1に示す。まず静脈注射により有機シンチレータを包含した腫瘍親和性のある光増感剤を投与し、その後、腫瘍組織にX線を照射する。有機シンチレータによりX線エネルギーが可視光に変換され、光増感剤が光化学反応を引き起こし、腫瘍組織を変性・壊死させる。このトリガーとなるX線照射の空間分解能を向上させる事はガン治療の空間分解能の向上になり、周辺正常部の被爆を押さえる事ができる。

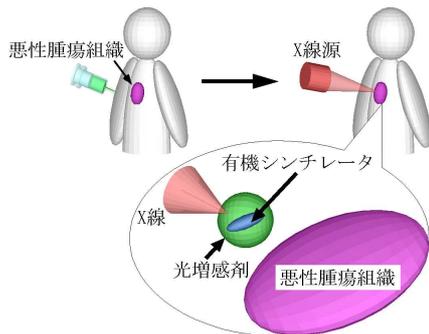


図1 .X線を用いた光線力学療法(PDT)の概念図

## 2. 研究の目的

本研究ではレーザープラズマカソードを用い、極小空間( $\mu\text{m}$  オーダー)までスポットサイズが絞られるような実験室規模のコンパクトなピンポイントX線源の開発を目指す。レーザープラズマカソードとはレーザー航跡場加速という従来型加速器とは異なる新しい加速方式を用いた電子ビーム源である。図2にレーザープラズマカソードの原理図を示す。レーザー航跡場加速では、ヘリウム等のガスターゲットに超短パルスレーザーを入射し、レーザーパルスの前部でガスターゲットをプラズマ化すると同時に、レーザーパルスのもつ動重力によってプラズマ電子を押しつけ、光速程度の位相速度をもつプラズマの疎密波を励起する。この様にレーザーパルスによって生じたプラズマの疎密波はレーザー航跡場と呼ばれ、このレーザー航跡場によって電子を加速する方式をレーザー航跡場加速と呼んでいる。レーザー航跡場加速の最大の特徴はその大きな加速勾配である。現在では、従来型加速管の1000倍にも達する100 GV/mの加速勾配が実験的に実証されている。このレーザー航跡場によって加速されるべき種電子をガスターゲットの外

部から供給するのではなく、ガスターゲットの内部で生じるプラズマ電子から供給する方式はレーザー航跡場加速の中でも特にレーザープラズマカソードと呼ばれている。

これまでレーザープラズマカソードの研究は、日本、アメリカ、フランス、イギリスなどで精力的に行われている。特に近年では単色電子の発生が各研究室から報告されている。我々東京大学原子力専攻のグループでもこれまでに、5 - 12 TW 程度のレーザーシステムを用いてレーザープラズマカソード実験を行ってきた。その結果、焦点距離180 mmと比較的短い集光系を用いた実験で20 MeVの単色電子発生に成功している[1]。また平成18年にはガスターゲットに外部磁場を印加する事により、これまでのレーザープラズマカソードで問題となっていた電子発生の指向性及び安定性を飛躍的に向上させる事に成功した(図2、3参照)[2]。この指向性と安定性はまぎれもなく世界一の成果であり、他の研究所の指向性、安定性とは一線を画している。

本研究ではこの外部磁場印加を用いたレーザープラズマカソードからの電子ビームをターゲット形状の最適化を行ったX線ターゲットに照射する事により、ピンポイントX線の発生を目指す。既に本施設で所有する線形加速器を用いた予備実験により、電子ビームサイズとほぼ等しいサイズのX線発生に成功している。レーザープラズマカソードではレーザーを10  $\mu\text{m}$ 程度まで絞って実験してお

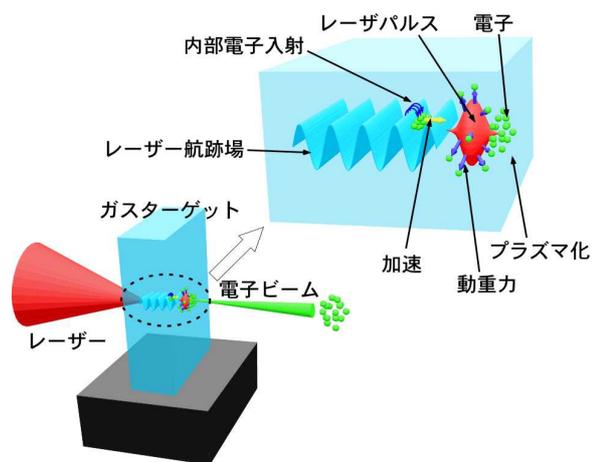


図2 .レーザープラズマカソードの原理図

り、電子ビームサイズはその発生点において

レーザースポットサイズと同程度であることが予想されている。したがって、レーザープラズマカソードにおいて予備実験で用いたX線ターゲットを用いる事によりマイクロサイズのX線発生が期待される。

### 3. 研究の方法

レーザーのメインパルスは軸外し放物面鏡 ( $f=178$  mm) によってガスジェット上に集光される。レーザーのメインパルスの1%程度をビームスプリッターによって切り出し、プラズマ観測用プローブパルスとして用いている。メインパルスとプローブパルスの時間差は行路上に設けられた時間遅延行路によって変える事が可能である。この時間差を生じさせる事によって電子発生時のプラズマ状態を詳細に調べる事ができる。発生した電子ビームはレーザーメインパルス下流に設置された蛍光スクリーン (DRZ) に照射される。電子分布に対応したスクリーンからの発光は画像増幅器付きCCDカメラによって観測される。電子エネルギースペクトルを取得する際は、ガスジェットと蛍光スクリーンの間に偏向磁石を設置する。また、蛍光スクリーン手前に積分電流トランス (ICT) を設置する事で電荷量の測定も可能である。これらの計測は一発ごとに同時計測される。また、ノズルの前後に永久磁石を挟み込むように設置する事により外部磁場をガスターゲットに印加している。現在ガスターゲットに設置している磁石によって印加している磁場よりも強い磁場を印加し、磁場強度と発生電子特性の相関を調査すると共に、磁場強度の違いによる電子発生時のプラズマ状態の変化を観測する。プラズマ観測の体系は既に完成しているので、より強い外部磁場を印加する為の磁気回路の開発を行う。また、この磁気回路の形状に合うような新型ガスノズルの設計、製作も平行して行う。

### 4. 研究成果

1.0T の磁場強度を発生させる小型磁気回路の設計、製作を行い、高強度外部磁場印加によるレーザープラズマ加速実験を行った(図3参照)。その結果、チャンネル状のプリプラズマの発生が確認された。この強磁場中におけるチャンネル状プリプラズマ形成はシミュレーションによる計算結果とも一致する。

また、この高強度外部磁場印加実験を行う際に、意図的にレーザーの圧縮用グレーティングへの入射角をずらし、レーザーのプリパルスレベルを変化させる事により、これまで外部磁場(0.2T)印加実験では発生しなかった準単色電子ビームの発生に成功した。これらの研究結果を論文にまとめ現在、学術雑誌に投稿中である。

これらの外部磁場印可実験と平行し、よりレーザーの集光強度を高めるべく、デフォーダブルミラーの導入準備を行った。その際、デフォーダブルミラーの高圧制御系の開発を行い、従来に比べ非常に安価な制御系の開発に成功した。

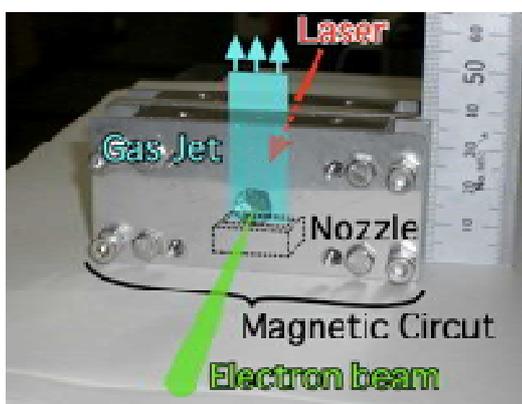


図3. 1.0T 磁気回路

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

A. Yamazaki, A. Maekawa, R. Tujii, M. Uesaka, K. Kinoshita, T. Hosokai, A. Zhidkov, "Manipulation of Electron Beam Generation with Modified Magnetic Circuit on Laser Wakefield Acceleration", Proceedings of PAC2007, Particle Accelerator Conference 2007, Accelerator Science and Technology, 2790-2792, (2007), 査読無

Akira Maekawa, Ryosuke Tsujii, Kennichi Kinoshita, Atsushi Yamazaki, Kazuyuki Kobayashi, Mitsuru Uesaka, Yukio Shibata, Yasuhiro Kondo, Takeru Ohkubo, Tomonao Hosokai, Alexei Zhidkov, Toshiharu Takahashi, "Ultra short electron beam bunches from a laser plasma cathode", Nuclear Instruments and Methods in Physics

Research B, 261, 5-8, (2007), 査読有

〔学会発表〕(計4件)

"東京大学原子力専攻におけるレーザープラズマカソード実験",  
山崎淳, 前川陽, 辻井良介, 上坂充, 細貝知直, アレクセイ・ジドコフ  
第4回日本加速器学会年会/第32回リニアック技術研究会(和光市民文化センター),  
2007/8/1-3

"プラズママイクロオプティクスを用いた2段階レーザー航跡場電子加速低エミッタンス, 準単色電子ビームの安定発生に向けて2", 山崎淳, 細貝知直, アレクセイ・ジドコフ, 根本孝七, 堀田栄喜, 上坂充  
日本物理学会2008年秋季大会(岩手大学),  
2008/9/20-23

"Manipulation of Electron Beam Generation with Modified Magnetic Circuit on Laser wakefield Acceleration",  
Atsushi Yamazaki, Tomonao Hosokai, Kenichi Kinoshita, Akira Maekawa, Ryouzuke Tsujii, Mitsuru Uesaka, Alexei Zhidkov  
Particle Accelerator Conference '07 (Albuquerque, New Mexico, USA),  
2007/6/25-29

"Upgrade of the laser plasma cathode by external magnetic field of 1.0 T",  
Atsushi Yamazaki, Tomonao Hosokai, Alexei Zhidkov, Akira Maekawa, Mitsuru Uesaka  
20th International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry (Renaissance Worthington Hotel Fort Worth, Texas USA), 2008/8/10-15

〔図書〕(計1件)

上坂充, 山崎淳, 坂本文人, "超短パルスレーザーを用いた単色X線発生",  
116,17-23(2007)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山崎 淳 (YAMAZAKI ATSUSHI)  
東京大学・大学院工学系研究科・助教  
研究者番号: 10436537