

DEVELOPMENT OF OPTICAL CONTROL TECHNOLOGY OF ELECTRON BEAM FOR MEDICAL APPLICATION

Hiroaki Kashima^{1,A)}, Takafumi Kondoh^{A)}, Jinfeng Yang^{A)},
Kimihiko Norizawa^{A)}, Yoichi Yoshida^{A)}, Seiichi Tagawa^{A)}

^{A)}The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University, 8-1 Mihogaoka, Ibaraki, Osaka, 567-0047

Abstract

Generating of the intensity modulated electron beam by controlling the laser for the cathode excitation with optical method was studied. To achieve an ideal radiation therapy and the breath synchronization, we studied of making the electron beam of a high resolution in an optical method by using the characteristic of the photocathode RF gun. For the electron beam not to extend to the feature of this photo cathode RF electron gun, because it is accelerated almost up to speed of light at once after the electron is generated unlike a past gun, and the pulse width and the shape of the electron beam depend on those of the incidence laser light.

医療応用のための電子ビームの光学的制御技術開発

1. はじめに

近年、放射線治療は、コンピュータ制御技術の進歩により、直線加速器リニアックに多葉絞り（マルチリーフコリメーター）と治療計画専用CT装置を装備した照射システムが開発され、標準外照射装置として普及してきた。これによって平面的な照射から三次元的な照射が可能になった。この放射線治療は、放射線の照射口に厚い鉛を取り付け、それを機械的に形状制御することにより、ガン細胞の形状に合わせて、照射方向、照射範囲、強さなどをコンピュータによる計算に基づき、複雑に調節できるようにしたものである。放射線治療の目指すことは、一貫して、よりがん組織を集中的に照射し、より周囲の正常組織への影響を少なくすることである。フォトカソードRF電子銃ライナックの特徴は、従来の熱電子銃と違い、電子が発生後すぐにほぼ光速まで加速されるため、電子ビームがあまり広がらず、電子ビームのパルス幅と形状は、入射レーザー光のそれらに依存することである。電子線発生に光を用いるために、入射光を光学的に加工する事により、電子線パルスの形状と強度分布を制御できると考えた。放射線を光学的に加工するため、機械的な絞りでは不可能な非常に高速かつ高精度な変調が可能である。発生した濃淡電子線をX線に変換し、次世代の強度変調放射線治療技術の開発を目指している。

そのため次世代の高機能強度変調放射線治療（IMRT: Intensity Modulated Radiation Therapy）照射技術の確立、応答速度、解像度の更なる向上、呼吸同期、心臓同期などの実現を目指して、フォトカソードRF電子銃の特性を利用して、電子ビームの強度変調を光学的に行う研究を行った。

2. 実験装置

大阪大学産業科学研究所のレーザーフォトカソードRF電子銃ライナック（図1）は、高性能のレーザーフォトカソードRF電子銃、S-バンド進行波型ライナック、磁気パルス圧縮装置、電子線パルス発生用の全固体Nd:YLFピコ秒レーザー、40MW、2.856GHzク

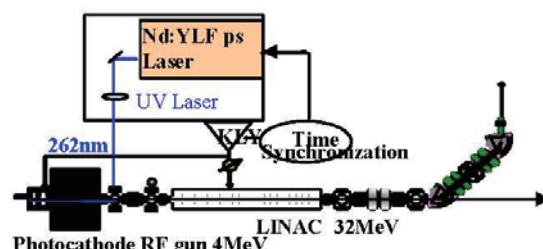


Fig.1 Chart of the entire Photo Cathode RF Gun LINAC, ISIR, Osaka Univ.

ライストロン、から構成される。RF電子銃はS-バンドの1.6セルの加速空洞をもち、カソードの材質は無酸素銅である。電子ビームの発生には、Nd:YLFレーザーの4倍高調波(266nm)を用いている。レーザーをカソードに照射すると、光電効果により発生した電子は空洞内の高電場で加速される。生成された電子ビームは電子銃下流に設置されたライナック

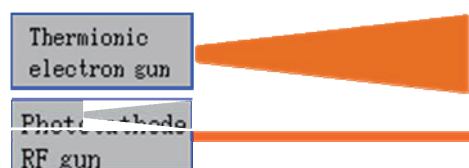


Fig.2 C Fig.2 The Feature of Photocathode RF Gun

¹ E-mail: kashim81@sanken.osaka-u.ac.jp

を用いてさらに32MeVまで加速され、エネルギー変調をかけられる。Fig. 2に示すように従来の熱電子銃と違い、フォトカソードRFガンは電子ビームが拡がらない。

電子ビームの形状は、ビームライン上に厚さ20 μ mのアルミナ蛍光板（デマルゲストCr:AL2O₃微結晶

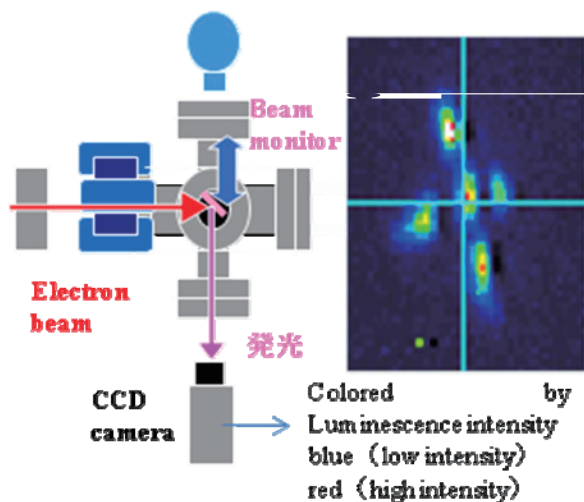


Fig.3 Monitoring system of electron beam

焼結体) 薄板をリニアモーションで挿入し、蛍光板の発光像をモノクロCCDカメラで撮影した (Fig. 3)。コンピュータ上で発光強度を色に変換し、電子ビーム像、強度分布をカラー表示している。青色は弱強度で、赤色から更に白色になると高強度であることを示している。

3. 実験と結果

3.1 加速器各部での電子ビーム像

下のFig. 4は、ビームプロファイルとそのビームプロファイルを測定した場所との関係を図にしたも

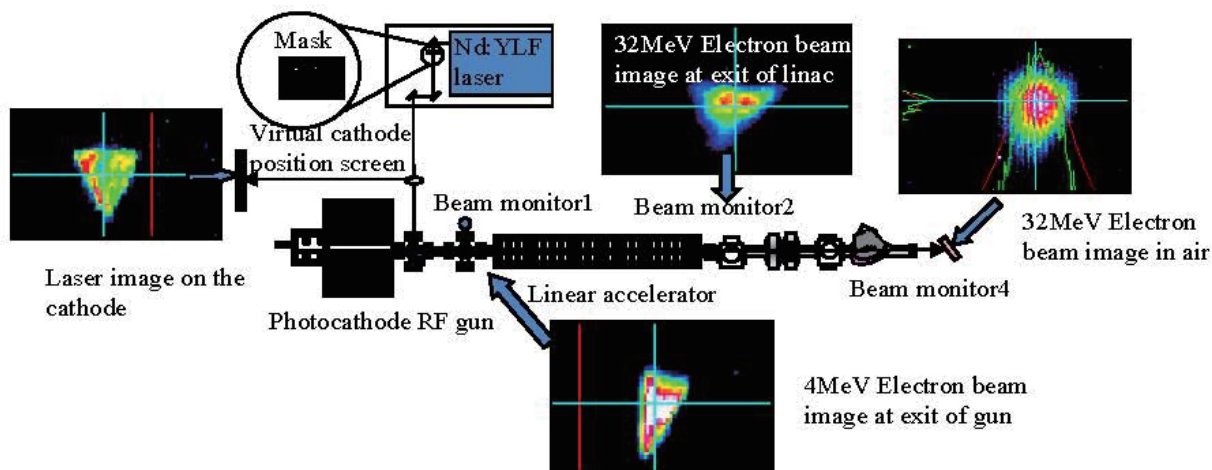


Fig.4 Electron beam images in each part of accelerator

のである。三角形のマスクを用い、カソード等価位置にマスクされたレーザー像が転送されていることを示した。このレーザー光をフォトカソードに入射したところ電子ビームが発生し、電子銃とソレノイドを出た場所で三角形の電子ビームが観測された。その後進行波型加速管に入射し、約32MeVまで加速される。加速管出口での電子ビーム像を示した。三角形は保たれているが、周辺部分が弱くコントラストが低い。その後100 μ m厚のチタン箔を通過して空気中で観測した。空気中での電子ビーム像である。三角形の角が無くなり、ほぼ円形の gaussian 様のビーム形状 (整形を何もしない場合のビーム形状) になった。

3.2 電子銃出口での種々の電子ビーム像

Fig. 5は、星型とY字型のマスクを使ってレーザー光をマスクして発生させた電子ビームの電子銃出口での像である。マスク形状とほぼ一致した。全体の大きさは同様に3.5mm程度であった。星型の

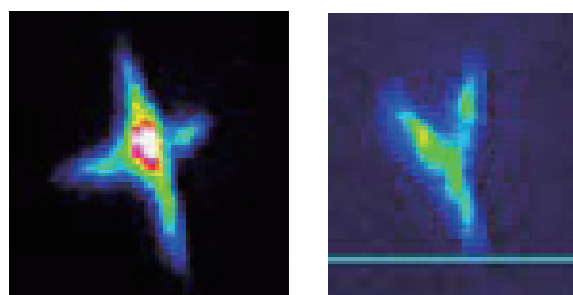


Fig.5 Star type electron beam image (left) and Y character type electron beam image (right)

ビームプロファイルには、中央と周辺部とで大きな強度差がついている。星型のマスクによって整形された入射レーザー光は、穴の大きい中央部分と、マ

スク前の強度の強い部分が重なり、狭くなっている周辺部位では強度が落ちる。このような入射レーザー光の強度分布が、直接電子ビームのプロファイルに反映されている。このことから、入射レーザー光の強度分布を制御することにより、電子ビームの強度分布の制御、すなわち、強度変調電子ビームの発生が可能である。Y字型は比較的均一な強度となった。

3.3 濃淡電子ビームの空間分解能

Fig. 6において、8ポイントの強度変調電子ビームプロファイルについて詳しく大きさを示した。全体の大きさが直径約3.2mmで、一つのスポットの大き

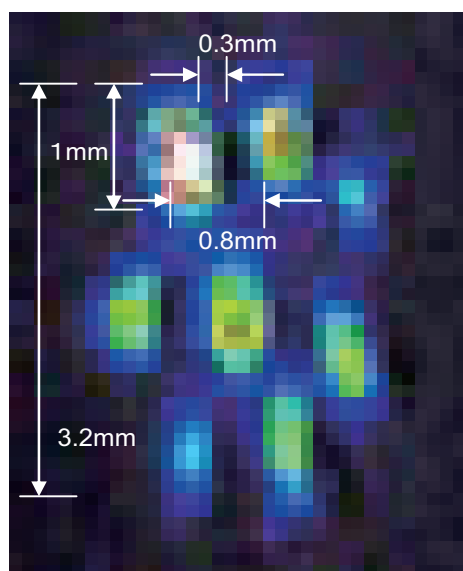


Fig.6 The scale of 8 points electron beam

さが直径1mm程度である。ポイント同士の間隔が約0.3mmであった。非常にコントラストが高く、強度の高いポイントの間にはっきりと強度の極めて低い領域が形成されている。

3.4 電子ビームムービー基礎実験

高速、高解像度かつコンピュータ制御の電子ビームの制御を行う方法としてデジタルマイクロミラーデバイス (DMD) を用いることを考えているのだが、その前の予備実験として、電子ビームの変調を光学的にコントロールできることを確かめるため次のような実験を行った。

リモートミラー (オプトマイク) は、二次元での動作が可能である。図7に示したように、ビームスプリッターで分割したふたつのレーザー光のうち、リモートミラー (オプトマイク) に入射する方のレーザーを、アイリスで径を絞って小さくした。他方は、径はそのままフィルターで強度を弱くした。この2つのレーザーをカソード上で合成・制御することで動的な強度変調電子ビームの制御を試みた。

続いて、次の図8の連続写真は、電子銃出口で電

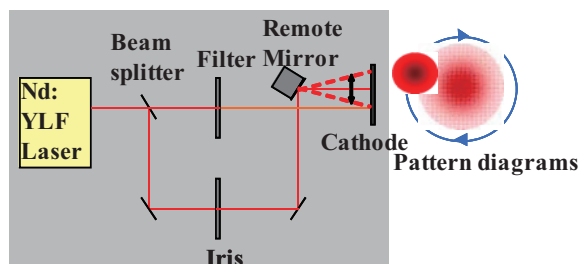


Fig.7 Optics system of electron beam modulating with remote mirror

子ビーム像をモニターしたものである。実際には動画 (ムービー) であるのだが、これを説明すると、強度の比較的弱い径の大きい電子ビームの周囲を、強度の強い径の小さい電子ビームが1周したものである。このような特殊な強度分布、形状をもった電子ビームを作り出すことは、従来の熱電子銃では到底不可能である。さらに、フォトカソードRF電子銃を用いてこのような光学的な方法をとらない限りは無理である。大きい電子ビームの径が約3mmで、小さいほうは1~1.5mm程度であり、細かい強度分布をもつ強度変調電子ビームムービーの作成、加えて、遠隔操作することにも成功した。

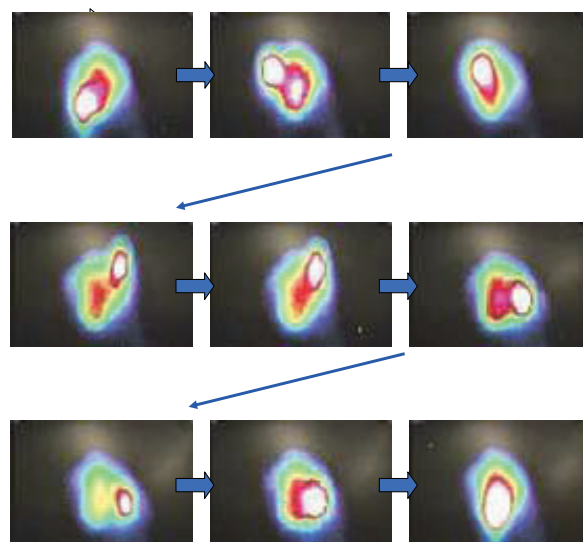


Fig.8 Strength modulating electron beam with remote mirror

4. まとめ

カソード励起用レーザー光をマスクで光学的に制御することによって強度変調電子ビームの発生に成功した。カソードに入射するレーザー光を操作することで、強度変調電子ビームの操作をし、電子ビームの強度変調を光学的に制御することに成功した。