

# 定在波分布測定による LINAC 電子ビーム微細構造

## パルス幅計測の研究

### 学位論文内容の要旨

近年、電子線形加速器は、高エネルギー物理現象の解明や、物質科学や光化学反応、医学治療などのさまざまな分野で利用されており、安定かつ高品位な電子ビームが要求されている。そのためには、ビーム位置やエミッタンス、パルス形状、エネルギー分布等を測定するさまざまな種類のモニタが必要であり、これまで多くの研究がなされてきたが、最近の加速器自体の性能の向上に対応して、より精度の良い、また容易に測定できるビームモニタの重要性が高まっている。

電子線形加速器で加速された電子ビームは、微細構造パルス列をなすが、そのパルス時間幅を測定する場合、ストリークカメラを用いた光計測がよく用いられているが、光の伝搬によりパルス幅が広がり、実際の時間分解能は劣化する。同時に電子ビームを物質中に衝突させる方法であるため、他の実験との併用測定が難しい。一方、非接触型として電子ビームの放射電界を直接測定する方法も試みられているが、微細構造パルスの時間幅が非常に短く、測定器に数十 GHz の広帯域が要求されるため、オシロスコープにより直接測定することは容易ではない。

本研究は、この微細構造パルス幅を非接触に計測する方法として、電子ビームのパルス列によって作られる電界の局所定在波分布からパルス時間幅を計測する方法を提案し、検討をおこなったものである。定在波分布は、ビーム進行軸に垂直に導体板を配置することで、放射電界である入射波と反射板からの反射波の干渉によって形成させることができる。また、この測定においては、各干渉位置で電界を検波して、そのピーク出力のみ測定すればよいので、広帯域の測定器は必ずしも必要とされず、測定が容易に行える。

本論文は、全 8 章より構成されている。各章の要旨は以下の通りである。

第 1 章は序論であり、線形加速器 (LINAC) の電子ビーム計測における本研究の位置付けと各章の概要について述べた。

第 2 章では、LINAC の概要と微細構造パルス列について述べた。また、Lienard-Wiechert ポテンシャルを用いると、自由空間中を進行する相対論的電子ビームの放射電界が、遠方界においてはビーム進行方向の 1 次元伝搬問題として扱えることについて述べた。

第 3 章では、微細構造パルスのパルス幅計測に現在使用されている代表的なビームモニタを挙げ、測定原理やその問題点についてまとめた。

第 4 章では、LINAC ビームラインへのビームモニタの配置を目的として、円筒導波管内に 2 枚の導体板を配置した定在波分布の測定について述べた。測定結果をフーリエ変換し

て波数スペクトルを求め、導波管内の電磁界モードを  $TM_{01}$  として周波数スペクトルに変換した。この結果から、加速周波数の各高調波成分が検出されることを示したが、導体板にあけるビーム通過孔の大きさや測定位置等の条件によってスペクトル特性が異なることを明らかにした。

第5章では、第4章の実験体系に対応させ、有限差分時間領域 (FD-TD) 法を使用して電磁界の数値解析を行った。2枚の導体板を配置した円筒導波管内に形成される定在波分布は高次の  $TM_{0n}$  モードまでの周波数分散を考慮して、第4章で測定結果から求めたスペクトルの場合と同様に、定在波分布から加速周波数およびその高調波成分を正しく求められることを示した。次に、孔あき導体板を1枚だけ配置した円筒導波管内において、電子ビームが導体板の近傍を通過するときに導体板から反射される放射電界と、開口部から発生する輻射波の伝搬過程を解析し、ビーム上流側に戻るそれら2つの波と後続の微細構造パルス列の放射電界との干渉について検討した。その結果、反射波と輻射波がそれぞれ異なる位置で入射波と干渉することを明らかにした。

第6章では、分散関係がパルス幅推定に影響することを避けるため、自由空間中を進行する電子ビームが進行軸に垂直な導体板の近傍を通過する場合について解析した。局所定在波分布が場所ごとに異なる波との干渉で得られることに注目して、1次元解析モデルで微細構造パルス幅と定在波分布の関係を解析した。放射電界であるパルス状の入射波と導体板からの反射波によって局在した定在波分布が作られ、干渉による出力の落ち込み (ディップ) が一定間隔に形成されることを示した。また、入射波が一定振幅のパルス列の場合、定在波比1の定在波分布において、ディップ幅が微細構造パルス幅に比例することを示した。更に、振幅がガウス分布で与えられる微細構造パルス列とした場合は、定在波比とディップ幅はディップ毎に変化するが、この場合にもディップ幅と定在波比が比例することを初めて見出した。このことより、定在波比が1に相当するディップ幅を推定できることから、微細構造パルス幅を求める方法を新たに提案した。また、定在波分布のディップには、検波器やオシロスコープ等測定系の周波数特性が影響を与えるが、それ等の影響も考慮して正しいパルス幅を推定できることを示した。

第7章では、本推定法の有効性を検証するため、LINAC ビーム取り出し窓周囲に電波吸収材を配置した周囲境界からの反射を抑えた体系で、1枚の導体板を用いて定在波分布を形成し、測定した。測定結果は、1次元解析モデルによって求められた定在波分布のディップと同様の周期分布が実験においても測定され、入射波と導体板からの反射波により定在波分布が形成されると仮定した1次元解析の妥当性が確認された。一方、1次元解析では考慮から除いた輻射波の影響もディップ位置からわずかにずれた位置で現れており、放射電界である入射波と同相で干渉するためにその位置の出力は大きく極大値をつくり、複雑な分布が観測された。しかし、導体板近傍における輻射波の影響が、各ディップから導体板側にずれた位置に現れていることから、反射波に較べて輻射波の到達に時間遅れがあること、分離できることを実験的に確認した。輻射波の影響は、ビームと導体板までの距離や、ビームと測定用アンテナまでの距離によって変化するが、輻射波の影響の異なる種々の測定結果に対し、本研究で提案したパルス幅推定法を適用した結果、輻射波の影響が変化しても推定値がよく一致することを確認した。推定結果は、実験に用いた北海道大学 45 MeV 電子 LINAC において予想されているパルス幅とほぼ一致し、本推定法の有用性を確認した。

第8章は結論であり、本論文で得られた成果について総括している。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 榎 戸 武 揚  
副 査 教 授 日 野 友 明  
副 査 教 授 成 田 正 邦  
副 査 教 授 沢 村 貞 史

学 位 論 文 題 名

## 定在波分布測定による LINAC 電子ビーム微細構造 パルス幅計測の研究

近年、電子線形加速器 (LINAC) の高品位化に関する研究が盛んに行われている。その多くはビームの短パルス化と高輝度化を目的としており、フェムト秒の時間スケールやナノメートルの空間スケールでの電子ビームの安定供給およびその計測方法の確立は未開拓の分野で、今後の発展が待たれている状況にある。

本論文は、このような状況にある LINAC 電子ビーム計測について、放射電界によって作られる定在波分布を用いて、時間パルス幅と干渉波形 (ディップ) の関係に関して解析的および実験的に研究し、時間パルス幅計測モニタの開発およびこの定在波分布測定法の有効性の確認を目的としたものであり、その主要な成果は次のように要約される。

電子ビーム微細構造パルス列の放射電界による定在波分布の形成は、ビームに垂直な導体板を配置することで容易に形成可能であり、さらに各測定位置においてピーク出力を求めるだけであることから、ピコ秒オーダーのパルス時間幅に対応した広帯域の測定器は必要なく、測定法自体も容易であることを説明している。

ただし、ビーム近傍に導体板を配置することにより、ビーム中心と導体板端との相互作用による輻射波の発生が問題となるが、有限差分時間領域法を用いた円筒導波管内の電磁界過渡解析より、ビーム進行方向に垂直に配置した孔あき導体板によりビーム上流側へ反射される反射波と、導体板開口部から発生する輻射波がそれぞれ異なる位置・時間で入射波と干渉することを明らかにし、入射波と反射波によって形成される定在波分布に対し輻射波の影響を空間的に分離可能であることを示している。

この結果から、輻射波の影響を除去した 1 次元解析モデルにより定在波分布を求め、電子ビーム微細構造パルス列がマクロパルスの場合に得られるディップ幅と定在波比が比例関係にあり、定在波比 1 に相当するディップ幅から直接にパルス幅を求められるこ

とを明らかにしている。

また、実測時に使用する検波器等の測定系の定在波分布に対する影響は、定数倍によって補正できることを明らかにしている。

さらに、定在波分布のスペクトル解析を行い、定在波分布全体よりも特定のディップに対する短区間フーリエ変換によるスペクトルの周波数成分の比からパルス幅を推定する方法が有効であることを見出している。

このことから、LINAC 電子ビーム微細構造パルス幅の新しい測定法として、干渉波形(ディップ)の幅から直接推定する方法と、ディップに対する短区間フーリエ変換によるスペクトル解析による推定法を提案している。

さらに本推定法の有効性を検証するために、自由空間中で LINAC 電子ビームの作る定在波分布を実測し、本推定法を適用した結果、輻射波の影響が変化してもパルス幅推定結果が変わらないことから、本推定法の有効性が確認している。また、特定のディップに対し短区間フーリエ変換によるスペクトル解析を試み、パルス幅について解析・実験に良い一致が得られることを明らかにしている。

これを要するに、著者は、電子ビーム微細構造パルス列によって形成された局在した定在波分布について、干渉波形とパルス幅との関係の新知見を得たものであり、さらに、それを用いて、LINAC 電子ビームの短時間パルス幅計測への有効性を示しており、加速器工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。