

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	低エミッタンス電子銃システムのビームダイナミクス解析手法に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	水野明彦
Author(English)	Akihiko Mizuno
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第9524号, 授与年月日:2014年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:堀田 栄喜,堀岡 一彦,長谷川 純,高山 健,林崎 規託
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9524号, Conferred date:2014/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

(論文博士)

## 論 文 要 旨 (和文2000字程度)

(Summary)

報告番号	乙 第	号	氏 名	水野 明彦
------	-----	---	-----	-------

## (要 旨)

論文題目「低エミッタンス電子銃システムのビームダイナミクス解析手法に関する研究」

昨今の放射光源には低エミッタンスの電子源を要求されるため、電子銃部分のビームダイナミクス解析が重要である。この解析は、エミッタンスを精度良く計算することが主たる目的であるが、その意味において、解析法が十分には確立されていない。このため、本論文では新たな解析法を開発し、今後のビームダイナミクス研究に資することを目的とした。本論文の構成は以下のとおりである。

第2章では、ビームダイナミクス解析についての基礎理論を、RF電子銃を題材として述べた。RF電子銃空洞内ビームダイナミクスの内、ビームエネルギーについての解析的扱いを記し、また、電子バンチが周囲に誘起する電磁場の、遅延ポテンシャルを用いた解析的取り扱いについて示した。

第3章では、新規に開発した3次元のトラッキングシミュレーションコードについて、アルゴリズムをはじめ、計算手法を詳細に述べた。このコードは、実際の加速器の構造的な水平垂直非対称性に伴うビームダイナミクスの非対称性を計算できることを重視して開発した。また、出来るだけ仮定を排除して広範囲のエネルギー、ビーム形状に柔軟に対応できることを目標とした。また、加速器という巨大実験装置を扱うため、広い範囲のトラッキング計算が容易に出来ることも重視した。

第4章では、本コードをSPring-8のRF電子銃装置に適用し、特に3次元の非対称性に伴う効果を含めて、現実に即したダイナミクス計算を行うことが可能であることを示した。まず、RF電子銃装置のRF電子銃空洞部、およびそれに続くソレノイド集束コイル、進行波型加速管について、各デバイスの電磁場が水平垂直に対称であることを仮定して、RF電子銃装置全体としてのビームダイナミクスをシミュレーションコードの計算によって示した。次に、構造的な非対称性を伴う部分についてのビームダイナミクスを示した。当該RF電子銃装置では進行波型加速管を用いているが、RFパワーを入力するためのカップラー部の機械的構造が非対称となっている。この部分でプロジェクションエミッタンスが増加し、その増加量が水平垂直で非対称となる現象を示すことができた。このように、現実に即した計算が可能であることの反面、本コードは粒子トラッキングコードであることから、エミッタンスの粒子数依存性という問題が残った。精度良く計算するためには粒子数を増やせば良いが、計算時間は粒子数の2乗に比例して長くなり、現実的では無い。

第5章では、粒子数依存性を排除して、より正確なエミッタンス計算を行うため、シミュレーション的手法と解析的手法を組み合わせた多元連立ビームエンベロープ方程式の開発を行った。従来のエンベロープ方程式による手法では、シミュレーションコードに比べて計算時間は短いものの、電子バンチのRMSサイズを微分方程式によって解くものが主流であり、電子バンチの正確な形状が計算できない。このため、一般的にエミッタンス計算精度はシミュレーションコードに劣るものであった。これ

に対し、本手法は、電子バンチを長手および径方向に格子状に分割し、それぞれの交点に電子を置いて、各電子の軌道を、空間電荷効果を加味しながらエンベロープ方程式で解くものである。バンチ内の複数の位置での軌跡を解析的に解くことにより、電子バンチの形状が計算できることを示した。バンチ形状については、条件によっては長手方向分割数依存性が生じる場合があるものの、シミュレーションコードに比べてはるかに短い時間で正確にエミッタンスを計算することが可能となった。

エミッタンスを正確に計算できることから、多元連立ビームエンベロープ方程式を用いて、ビームダイナミクス上の新たな知見を得ることが可能となる。例えば、電子銃直後のスライスエミッタンスが、カソード鏡像効果を含む空間電荷効果によって減少する現象がある。このメカニズムを第6章において解明した。また、RF電子銃空洞出口でスライスエミッタンス、およびプロジェクションエミッタンスが減少する様子を、多元連立ビームエンベロープ方程式を用いて精度良く計算することに成功した。このようなエミッタンス減少の事実はこれまで知られていなかったものであり、今後の低エミッタンス電子銃システム的设计思想を変えていく可能性がある。

第7章では、本論文のまとめと、本研究の今後の展望について記した。

(論文博士)

## 論 文 要 旨 ( 英 文 )

(300語程度)

報告番号	乙 第 号	氏 名	水野 明彦
<p>( 要 旨 )</p> <p>The low emittance electron injectors are required for the fourth generation light sources such as XFELs, and the beam dynamics analyses for the injector become important. Though those analyses have not investigated sufficiently. Therefore, I described the method of beam dynamics analyses for the injectors. In the chapter 2, the analytical basic theories for beam dynamics especially for the RF gun injectors are described. In the chapter 3, I described newly developed three-dimensional particle tracking simulation code. This code can calculate asymmetrical beam dynamics, which is caused by the mechanical asymmetry of the devices in the beam-line. In the chapter 4, I calculated the beam dynamics for the SPring-8 RF gun injector with the simulation code, and demonstrated the asymmetrical analyses. The traveling-wave accelerator structure that locates after the RF gun cavity has asymmetrical RF-feeding couplers, which cause the asymmetry in the beam dynamics. The simulation code easily calculated these effects. Though one problem is remained that the emittance calculated by the code has dependency on number of particles used in the simulation. In the chapter 5, to overcome above problem, I developed the multiple beam envelope equations by combining analytical method with numerical method. The electron bunch is divided in grid-like fashion, and the electron is positioned at each intersection point. Each electron orbit is calculated by envelope equations. Using this method, the emittance can be successfully obtained with high accuracy and short calculation time. With the high accuracy calculation techniques, new results in beam dynamics are expected. For example in chapter 6, I described emittance reduction phenomena immediately after the cathode. The reduction mechanisms were investigated and the reduction examples in the practical RF gun cavity were shown by using the multiple beam envelope equations. These phenomena have not been revealed and thus new developments in designing the injector are expected. The summary is given in the chapter 7.</p>			