

早稲田大学における電子ビーム診断

工藤経生^{A)}、川合啓^{A)}、黒田隆之助^{A)}、坂上和之^{A)}、濱義昌^{A)}、鷲尾方一^{A)}、柏木茂^{B)}

早野仁司^{C)}、浦川順治^{C)}

^{A)} 早稲田大学理工学総合研究センター

〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1

^{B)} 大阪大学産業科学研究所量子ビーム発生科学研究分野

〒567-0047 大阪府美穂ヶ丘 8-1

^{C)} 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0081 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

フォトカソード RF 電子銃を用いた高品質電子ビーム生成及びそれを用いた応用実験を行う上で、加速器の最適パラメータを把握しておくことはきわめて重要な問題である。早稲田大学では、約 4MeV という電子ビームのエネルギーに適した電子ビーム診断技術の開発を目指して研究を行っている。現在までに、特にエミッタンスに注目して、空間電荷効果の影響が比較的少ないスリット法を採用し、電子ビームの横方向エミッタンスを測定してきた。今年度 6 月からは、新たに電子ビームのバンチ長を測定するために RF キッカー開発を行っている。本学会では、スリット法による横方向エミッタンスの測定結果と RF キッカーの開発過程について報告する。

1 はじめに

現在、早稲田大学では、フォトカソード RF 電子銃から生成された電子ビームを X 線発生などの応用実験に用いることを目的として、電子ビームの高品質化を行っている。フォトカソード RF 電子銃によって生成された電子ビームの品質は、レーザー入射位相、ソレノイド電磁石の磁場強度、ビーム電荷による空間電荷効果などに大きく左右され、高品質電子ビーム生成のためには加速器の最適パラメータを把握することが重要である。

エミッタンスの測定法としては、Q スキャン法が広く用いられているが、早稲田大学の電子ビームのエネルギーは約 4MeV とあまり高くなく、空間電荷効果の影響が無視できなくなる。そこで、昨年度に引き続き、空間電荷効果による測定誤差の少ないスリット・スキャン法（以下スリット法）を用いて横方向エミッタンスの測定を行ってきた。

2 スリット法

2.1 スリット法

スリット法とは、ビームライン上に設置されたスリットにより電子ビームを細かく切り取り、その下流で切り取られた電子ビームのプロファイル（形状）または電荷量を測定することにより電子ビームの位相空間分布（エミッタンス）を求める方法である。スリットを 1 枚だけ使用し、蛍光スクリーンでビームプロファイルを測定する方法をシ

ングル・スリット法、スリットを 2 枚使用し、ファラデーカップで電荷量を測定する方法をダブル・スリット法という。（図 1 参照）

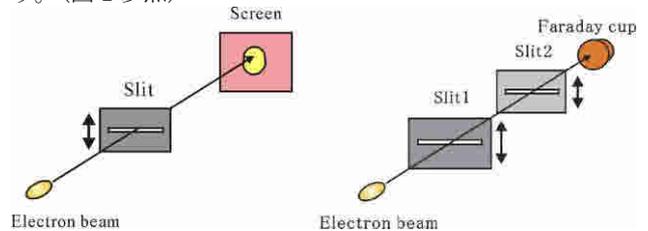


図 1：スリット法の概念図

昨年度まではシングル・スリット法でエミッタンスを測定していたが、この場合、切り取られたビームの電荷量が弱いと蛍光スクリーンが光らないといった問題や電荷量が十分な場合でもビームが蛍光スクリーン上でにじんでしまい実際よりもビームサイズを大きく測定し、エミッタンスを大きく算出してしまうなどの問題点がある。そこで今回は、ファラデーカップを用いてスリットで切り出された電子ビームの電荷量を測定するダブル・スリット法を取り入れた。

2.2 ダブル・スリット法

ダブル・スリット法を位相空間分布上で説明する。図 2 の斜線部分がスリット 1 で切り取られた部分の電子ビームである。スリット間がドリフトスペースだと仮定すると、スリット 1 で切り出された電子ビームは、スリット 2 に輸送される間に位相空間上で横に広がる。さらに、スリット 2 で細かく小片に分割し、分割した小片の電荷量を測定し、それらを総合してスリット 1 上での運動量方向の強度分布を再現する。同様の事をスリット 1 を動かして測定すれば全体のエミッタンス（位相空間分布）が求まる。（図 2 参照）

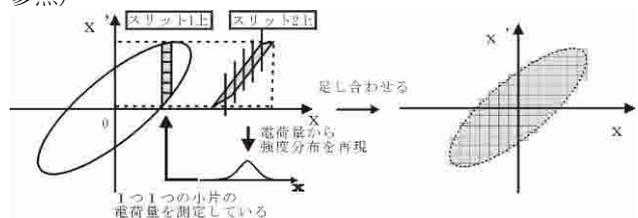
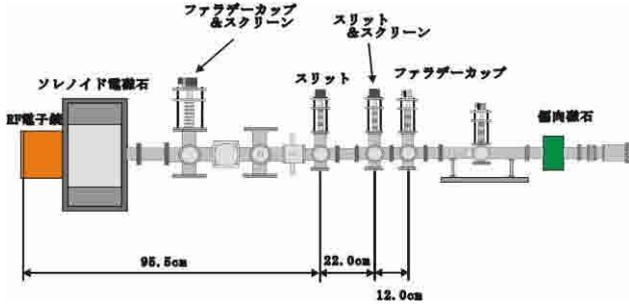


図 2：ダブル・スリット法による位相空間分布

3 実験結果

3.1 セットアップ

セットアップは図3のようにになっている。カソードから95.5cmの位置にスリット1(厚さ1mm)を、117.5cmの位置にスリット2(厚さ2mm)を設置した。スリットはタングステンでできており、スリット幅は200 μ m、スリットのステップ幅は200 μ mとした。



3.2 シングル・スリット法とダブル・スリットの比較

まず、エミッタンス補正用ソレノイド電磁石の電流量を変えてシングル・スリット法とダブル・スリット法によりそれぞれの場合における電子ビームの横方向エミッタンスを測定しその比較を行った。

図4より、ソレノイド電流量を変えることにより位相空間分布(エミッタンス)を制御できることがわかる[1]。また、図4(C,D)は、ソレノイド電流量を同値にして、シングル・スリット法とダブル・スリット法で再現される位相空間分布を比較したものである。どちらの方法で測定しても位相空間分布やエミッタンス値の変化の傾向はほぼ同様になることがわかる。エミッタンスが小さくなるときは、シングル・スリット法とダブル・スリット法のエミッタンスの値の差が広がり、エミッタンスが大きくなっているあたりでは逆に差は縮まっている(図5参照)。これは、エミッタンスが小さいときは電子ビームも絞られるため、電荷密度が高くなり、蛍光スクリーン上でのビームのにじみの効果が大きくなり、シングル・スリット法ではエミッタンスを大きく算出してしまふと考えられる。またエミッタンスが小さいときは、電子ビームは広がっているため、蛍光スクリーンが発光せず、シングル・スリット法ではエミッタンスを小さく算出してしまふと考えられる。

この実験での電子ビームの電荷量は、1バンチあたり約0.5nCであった。

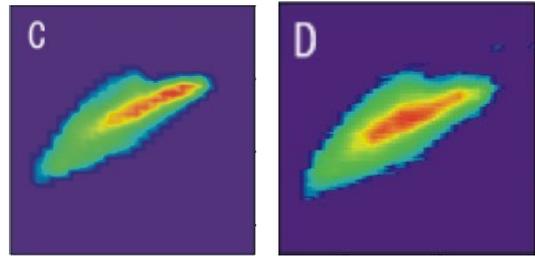
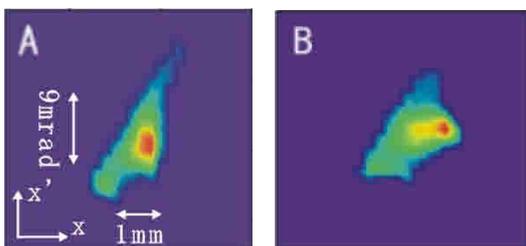


図4: ソレノイド電流量を変えたときの位相空間分布(A,B,Cは100A,98A,96A(ダブル・スリット法で測定)、Dは96A(シングル・スリット法で測定))

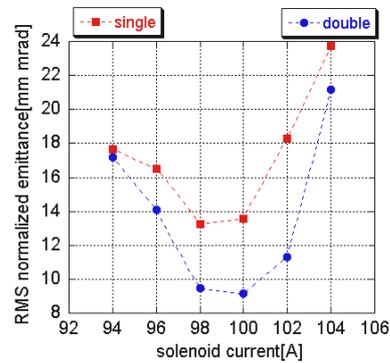


図5: ソレノイド電流 VS エミッタンス

3.3 レーザー入射位相とエミッタンスの関係

次に、カソード上でのレーザー入射位相を変化させ、各位相ごとにソレノイド電磁石の電流量を変えて、エミッタンスを測定した。今回は、すべてスリットのステップ幅を400 μ mにし、ダブル・スリット法でエミッタンスを測定した。

図6は、ソレノイド電流量を変えたときの横方向エミッタンスの変化を各位相ごとにプロットしたものである。図7は、各位相ごとの横方向エミッタンスの最小値をプロットしたものである。

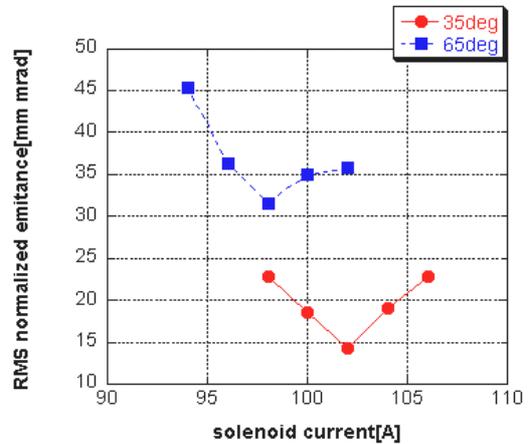


図6: ソレノイド電流量とエミッタンスの関係

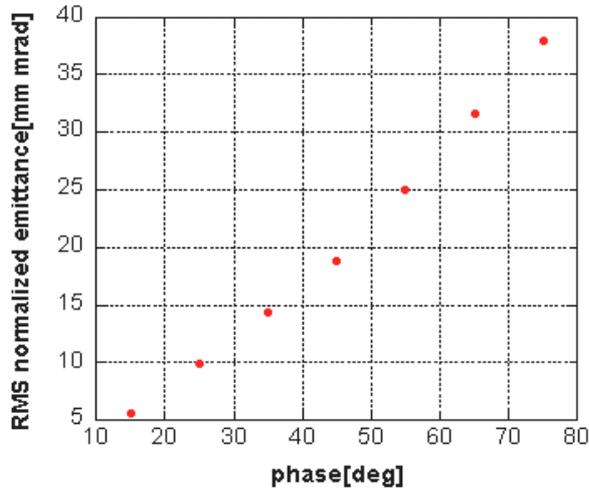


図7：位相とエミッタンスの関係

図6より、電子ビームのエネルギーが異なると、エミッタンスが最適値をとるソレノイド電磁石の電流量も異なることが確認された。また、図7より、レーザー入射位相を大きくしていくと、エミッタンスも大きくなることがわかる。これは、レーザー入射位相を大きくしていくとショットキー効果によりビームの電荷量も大きくなり、空間電荷効果の影響が大きくなることと、空洞出口でのRFによるビーム発散の効果による影響のためと考えられる。

4 バンチ長測定

4.1 ビームスペクトラム法

バンチ長を測定する方法のひとつにビームスペクトラム法[2]がある。ビームスペクトラム法とは、電極により電子ビームの信号を誘起し、それにより得られるビームスペクトラムを解析することで、バンチ長を求めるものである。この方法は簡単にバンチ長を測定でき、常時モニターとしては有効であるが、ビーム信号を解析し、RMSバンチ長を測定しているため、バンチの形状を測定することはできない。

4.2 RFキッカー

RFキッカー[3]とは、RF空洞内に生じた磁場（あるいは電場）によって電子ビームを横方向に回転させるようにキックすることで、時間方向の情報を空間情報に変換できるものである。

これによりキックされた電子ビームのプロファイルを下流に設置したプロファイルモニターで測定することで、バンチ長の測定が可能となる。早稲田大学では、S-band(2856MHz)で共振する方形空洞に TM_{120} モードを立たせ、その中心部の水平方向に生じる磁場で、ビームに垂直方向の力を与えることによってバンチを傾かせ、バンチ長を測定する。

現在は、Ansoft HFSS(High Frequency Structure Simulator)を用いて、3次元電磁場設計を行っている。

図8は実際にHFSSで電磁場設計した図である。XY平面にプロットされているものが電場であり、XZ平面にプロットされているものが磁場である。空洞の中心部に近づくほど磁場が強くなっている。

電子ビームは紙面の手前から奥側へと輸送される過程でXZ平面上の磁場で垂直方向に蹴られることになる。

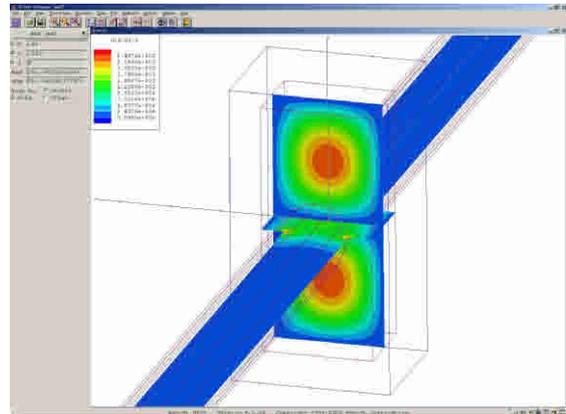


図8：RF空洞内の電磁場

5 まとめと今後の予定

早稲田大学では、今年度新たにダブル・スリット法を導入し横方向エミッタンスの測定を行った。今後は、スリットのステップ幅を小さくしたり、バックグラウンド除去方法を工夫したりして、測定精度を上げていく予定である。また、電荷量を一定にしてレーザー入射位相を変化させ、横方向エミッタンスを測定し、RFによるエミッタンス増大の影響も測定していく予定である。それとともに、シングル・スリット法でのスクリーンのしみによる効果を消すために、ワイヤースキャン等の他の測定法でエミッタンスを測定し、ダブル・スリット法で測定されるエミッタンスと比較する予定である。

また、RF空洞を作成し、RFキッカーを用いたバンチ長の測定を行い、ビームスペクトラム法の測定結果と比較していく予定である。

参考文献

- [1] D.T. Palmer, Proceedings of PAC, 1997, p.2843
- [2] R. Kuroda, *et al.*, Proceedings of EPAC, 2002., 1783
- [3] X.J. Wang, *et al.*, Nucl. Instr. And Meth., A 356, 1995, 159-166