

早稲田大学における光電子ビームエミッタンス測定

川合 啓^{1,A)}、柏木 茂^{A)}、工藤 経夫^{A)}、黒田 隆之助^{A)}、長澤 章雄^{A)}、
濱 義昌^{A)}、前田 健一^{A)}、鷲尾 方一^{A)}、浦川 順治^{B)}、早野 仁司^{B)}

^{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)} 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

早稲田大学理工学総合研究センターでは、高品質電子ビーム発生及びそれを用いた様々な応用実験を行うことを目的として、フォトカソード RF 電子銃システムの構築を行った。今回、それによって生成された約 4MeV の光電子ビームのエミッタンスを Q スキャン法とスリットスキャン法により測定し、空間電荷効果などによる測定誤差について評価を行った。また、ソレノイド電磁石によるエミッタンス補正効果やビーム電荷量を変化させたときの空間電荷効果によるエミッタンス変化について測定を行い、シミュレーションと比較した。本研究では、その結果について報告する。

1. はじめに

近年、レーザー技術の目覚ましい進歩に伴い、高品質電子ビームの生成が可能なフォトカソード RF 電子銃の開発が世界各国で行われている。早稲田大学理工学総合研究センターでは、フォトカソード RF 電子銃^[1]を中心としたコンパクトな加速器システムの構築を行い、高品質電子ビーム生成やそれを用いたさまざまな応用実験を行っている。^[2]ビームの高品質化を行うにあたり、それを評価するための高精度なビーム診断方法が必要不可欠である。そこで現在、約 4MeV の電子ビーム診断方法の研究・開発を行っている。また、応用実験としては、短パルス X 線発生やパルスラジオリシス実験などを行っている。

2. 早稲田大学におけるビーム診断

図 1 は、早稲田大学のビームラインである。

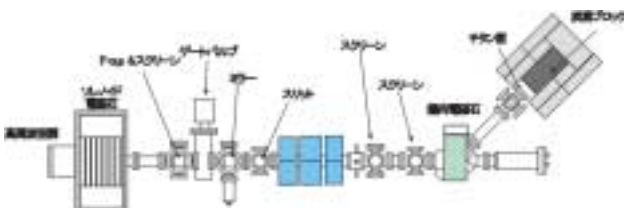


図 1 : ビームライン

ビームサイズは、蛍光スクリーンモニターによって測定している。パンチ長測定については、周波数解析による方法^[3]を考えている。エネルギーは偏向電磁石とスクリーンモニターを用いて測定され、電荷量はファラデーカップによって測定される。エミッタンス測定方法には、代表的なものとして Q スキャン法とスリットスキャン法がある。早稲田大学の電子ビームのエネルギーは約 4MeV と低く、空間電荷効果の影響が大きいと考えられるので、どちらの方法が適しているかについてシミュレーションによる測定精度の評価などを行った。

3. 光電子エミッタンス測定

3.1 Q スキャン法

Q スキャン法では四極電磁石の磁場強度を変化させ、下流でのビームサイズをスクリーンモニターで測定し、その磁場強度とビームサイズの関係からエミッタンスを導出する。この時、空間電荷効果を考慮せず線形な転送行列を用いて計算するので、低エネルギーのビームに対してこの方法を用いると、測定結果に誤差が生じることになる。そこで、PARMELA によるシミュレーションを行い、Q スキャン法の測定精度を評価した。その 1 例として、電荷量 1nC、エネルギー 4.5MeV の電子ビームに対して、PARMELA 上で四極電磁石を用いて Q スキャン法を行ったとき、それから求まるエミッタンスは 10.0mm-mrad であった。また、PARMELA から直接求められるエミッタンスは 5.94mm-mrad であった。したがって、早稲田大学における低エネルギー電子ビームでは空間電荷効果の測定への影響が大きいと考えられる。

3.2 スリットスキャン法

スリットスキャン法は、金属スリットで電子ビームの一部分を切り出し、その下流に設置したスクリーンで切り出した電子ビームのプロファイルを測定するという方法である。これを位相空間上で説明する。スリットを設置した場所での電子ビームの位相空間分布が図 2 のような楕円であるとすると、スリットで切り出された部分は、図の斜線部分である。

¹ E-mail: 8mitsu-boy@ruri.waseda.jp

スリット - スクリーン間がドリフトスペースだと仮定すると、切り出された電子ビームのスクリーン上での位相空間分布は図のように横方向に広がることになる。このスクリーン上の電子ビームの広がり x とスリット - スクリーン間の距離 L よりスリット上における運動量の広がり x_0' は、 $x_0' = x/L$ と表せる。よって、各々のスリットの位置で求めた運動量の広がり足を足し合わせることで、エミッタンス(位相空間分布)を求めることができる。^[4]

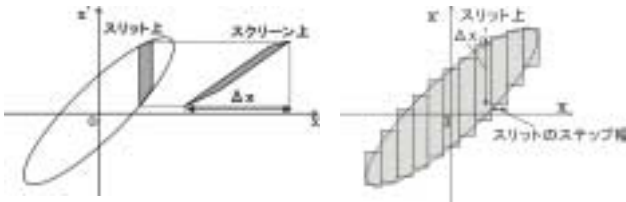


図 2 : 位相空間分布 図 3 : エミッタンスの計算

しかし、実際のスクリーンの位置での位相空間分布は、空間電荷効果による横方向運動量変化により図 2 よりもわずかに膨らむことになる。これによる測定誤差を調べるために PARMELA によるシミュレーションを行った。図 4 は、スリット幅 $400\mu\text{m}$ でビームの中心を切り出したときの位相空間分布の変化である。

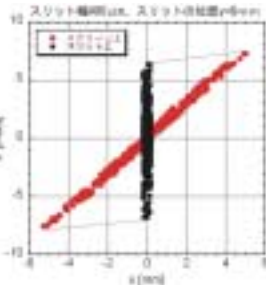


図 4 : スリット幅 $400\mu\text{m}$ でビームの中心を切り出したときの位相空間分布変化

図 4 より、空間電荷効果の影響により位相空間分布が縦方向にも広がっていることが分かる。このシミュレーションから計算したスリット位置での運動量の広がり x' 、元のスリット位置での運動量の広がり x_0' とする。誤差を

$$\Delta = \frac{\Delta x' - \Delta x_0'}{\Delta x_0'}$$

のように定義し、スリット幅とこの誤差 の関係をプロットしたものが図 5 である。図 5 の中の 3 本のプロットは、ビームの切り出す位置が異なっている (ビームの中心から 0mm 、 0.5mm 、 1mm)。図 5 から分かるように、スリット幅が大きいと切り出される電荷量が大きくなるため空間電荷効果による影響が増大し、誤差が大きくなる。また、精度を上げるためにスリット幅を狭くすると、切り出される電子が少なくなるためにスクリーン上でプロファイルが正確に測定できないという問題が生じる。今回は、

測定誤差を 5 % 程度に抑えるためにスリット幅を $200\mu\text{m}$ に設定した。

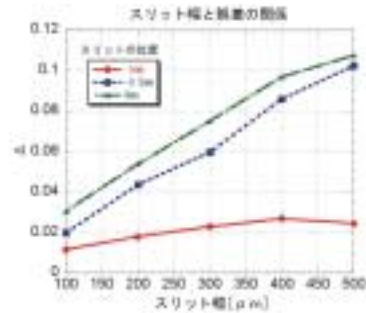


図 5 : スリット幅と誤差の関係

4 . ビーム実験

4.1 実験セットアップ

スリットはカソード面から 90.5cm 下流に設置し、スクリーンはそこからさらに 51cm 下流に設置した。スリット材料はタンゲステンであり、スリットの厚さ 1mm 、スリット幅 $200\mu\text{m}$ である。スリットは $200\mu\text{m}$ ステップで移動させた。今回の実験では、RF 電子銃下流に設置したエミッタンス補正用ソレノイド電磁石の電流量とビームの電荷量を変化させて、エミッタンスの測定を行った。

4.2 ソレノイド磁場強度と位相空間分布

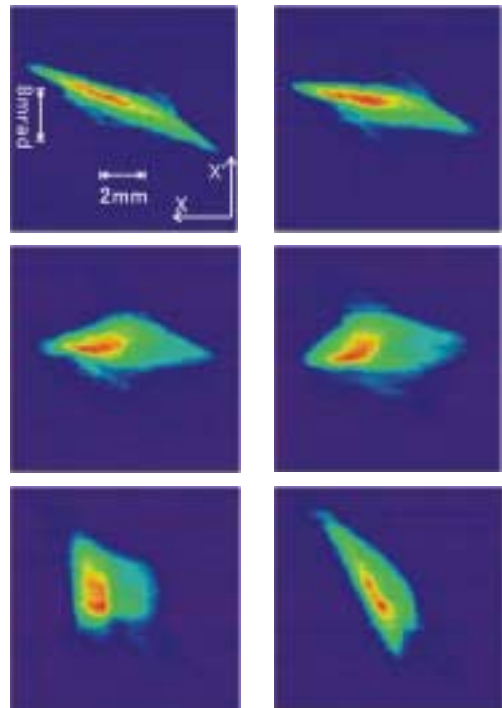


図 6 : 位相空間分布の変化の様子 (左上からソレノイド電流 97.5A 、 100A 、 102.5A 、 105A 、 107.5A 、 110A ; 100A がピーク磁場 1500G に相当)

図6は、スリットスキャン法により測定されたスリット位置での再構成された位相空間分布である。図6より、ソレノイド電流量を変えることで、位相空間分布が変化していることがわかる。図6の位相空間分布よりエミッタンスを導出し、ソレノイド電流量とエミッタンスの関係をプロットしたものが図7である。図7より、ソレノイド電流を変化させることでエミッタンスをコントロールできることが分かる。^[5]

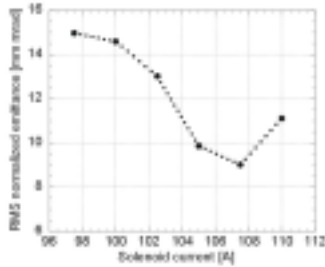


図7：ソレノイド電流とエミッタンスの関係

4.3 シミュレーションとの比較

このビーム実験結果の正当性を評価するためにシミュレーションとの比較を行った。

図8から、測定結果とシミュレーション結果の位相空間分布を比較すると変化の傾向が似ていることが分かる。ソレノイド電流とエミッタンスの関係をプロットしたものを図9に示す。図9で絶対値が異なるのは、シミュレーションでは初期エミッタンスを0として計算していることと、カソード上でのレーザープロファイルなどのパラメータを実際のものと正確に一致させられなかったためである。

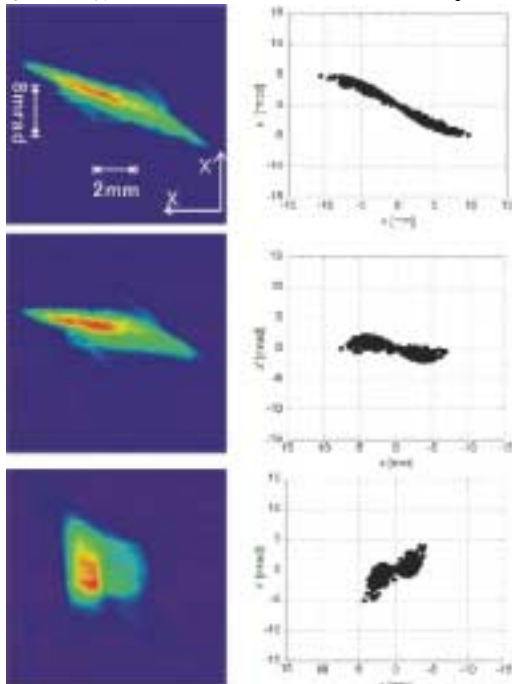


図8：測定より再構成された位相空間分布(左)とPARMELAによる計算結果(右)

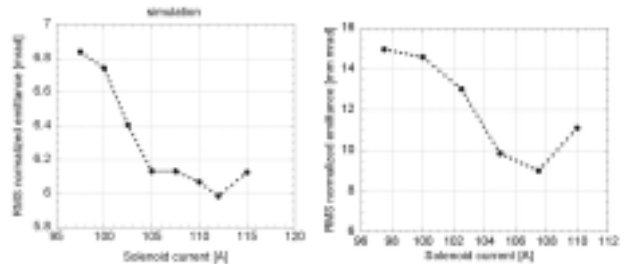


図9：測定結果(左)とシミュレーション(右)の比較

4 電荷量とエミッタンスの関係

図10に測定されたエミッタンスと電荷量の関係を示す。図の曲線はエミッタンスが

$$\varepsilon = \sqrt{\varepsilon_0^2 + \varepsilon_{sc}^2} = \sqrt{\varepsilon_0^2 + (a \cdot Q)^2}$$

のように初期エミッタンスと空間電荷効果によるエミッタンス(ここでは、電荷量に比例する量として仮定した)で表せるとしてフィッティングしたものである。そのフィッティング係数は、 $a=12[\text{mm-mrad/nC}]$ 、 $\varepsilon_0=10.5[\text{mm-mrad}]$ となった。図10より、電荷の増加に伴い、空間電荷効果によりエミッタンスが増大していることが測定された。また、レーザープロファイルや、空洞内のRF電場により決まるエミッタンスの効果も無視できないことが分かる。

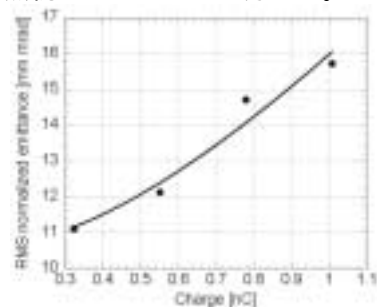


図10：ビーム電荷量とエミッタンスの関係

5 . まとめと今後の予定

スリットスキャン法により、空間電荷効果の影響が大きい約4MeVの電子ビームの位相空間分布を測定し、エミッタンス(位相空間分布)を求めることができた。今後は、ビームプロファイル測定の際のバックグラウンド除去方法を工夫したり、画像解像度・階調度を上げるなどして測定精度を上げていく予定である。また、ビームエミッタンスは、初期のビームサイズ(レーザースポットサイズに依存)にも関係しているため、今後詳しく調査していく予定である。

参考文献

- [1] X. J. Wang et al., Phys. Rev. E54-4, p.3121 (1996).
- [2] S.Kashiwagi, et al., in these proceedings.
- [3] R.Kuroda et al., PAC 2001, WPAH079
- [4] Y. Yamazaki, et al., KEK-PREPRINT-92-59
- [5] D.T.Palmer., Proceedings of PAC 1997, p.2893