

# 電子銃収束・発散力の測定結果 と初期レーザースポット直径の決定

第82回ERLビームダイナミクスWG  
PF研究棟2階会議室

2013年7月22日(月)14時30分  
加速器第七研究系  
宮島 司

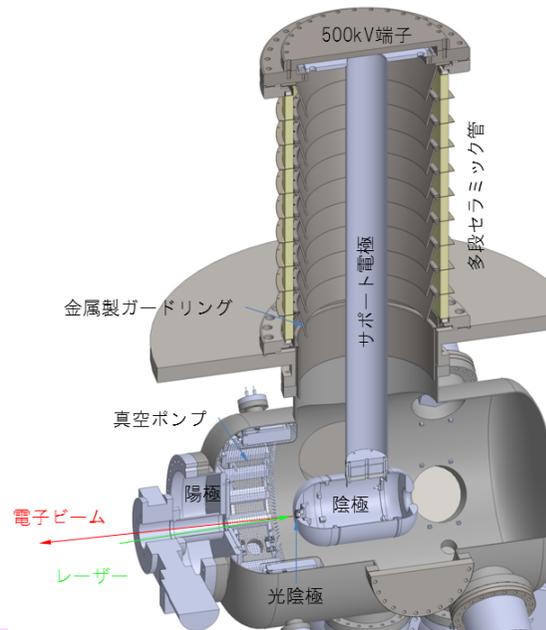
# 電子銃の収束・発散力測定のための目的

- 背景

- DC電子銃の場合には、電極形状により電子ビームに収束あるいは発散力を与えることができる
- ビームライン下流でのビーム性能を上げるには、上流側から正しくビームラインを理解できている必要がある

- 目的

- JAEA 500 kV光陰極DC電子銃の実際の収束力を測定することによって、電子ビームにどのような収束・発散力が働いているかを調べる

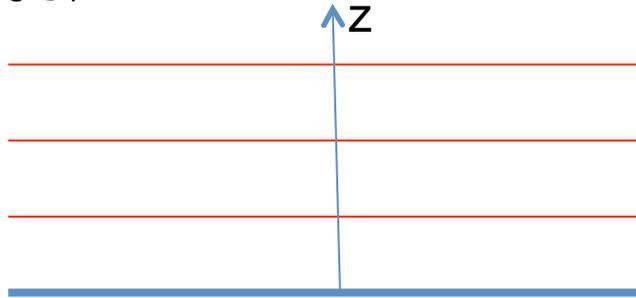


プレスリリース  
「次世代光源用光陰極直流電子銃から  
500keV大電流ビーム生成に成功」より

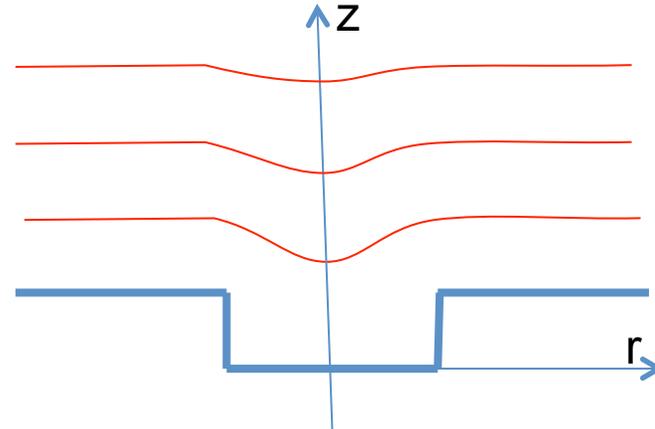
# 電子銃の収束・発散力

- 電子銃での収束・発散力の起源
  - 静電場の分布に起因

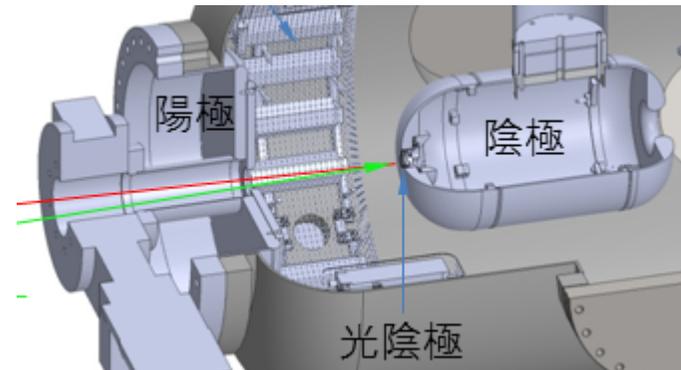
(1) 完全に平板の場合  
等電位面も陰極に対して平行でr方向の電場成分はなし(収束・発散力なし)



(2) 陰極面に凹みがある場合  
中心部分で電場が歪み、r方向の電場成分(収束力)が生じる



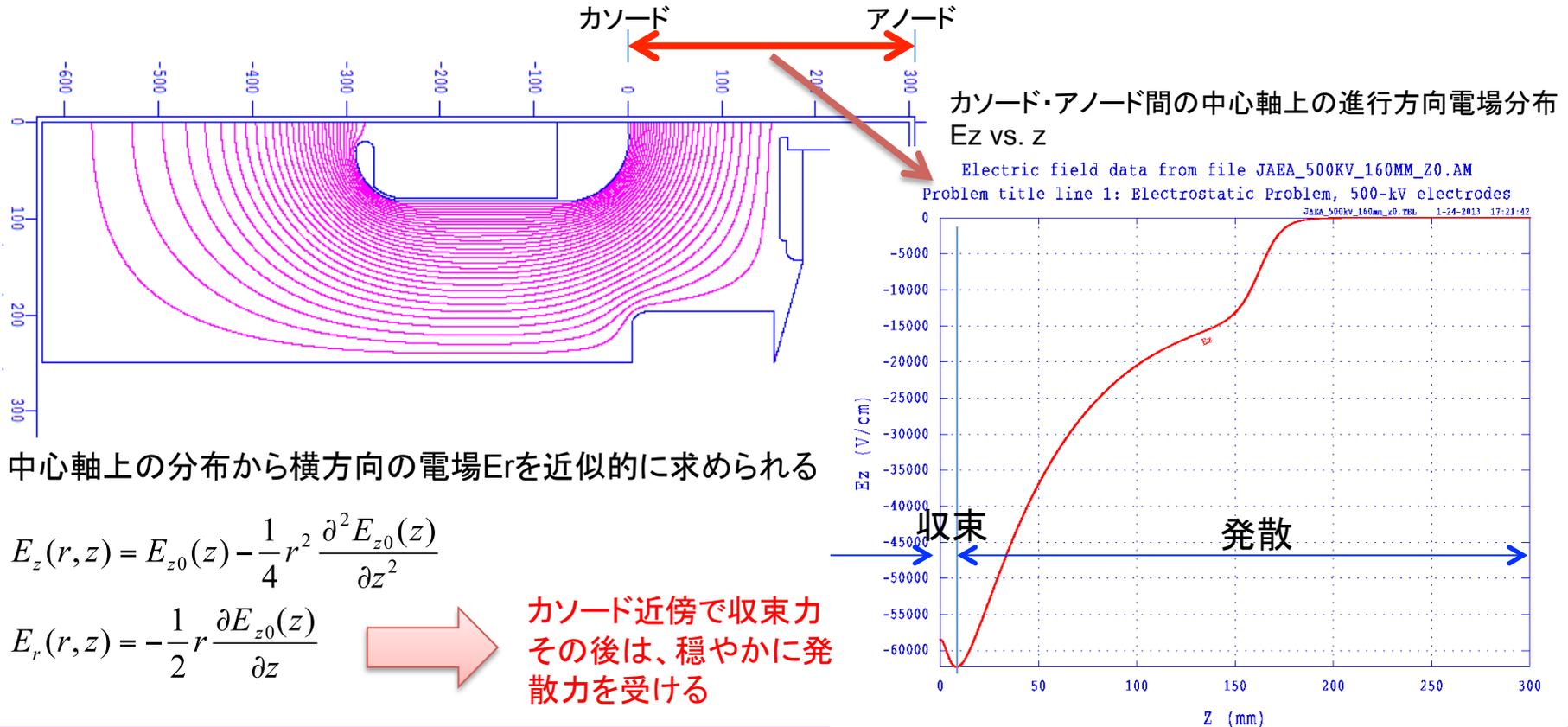
JAEA 光陰極500 kV電子銃の場合  
カソードパックを入れる部分にわずかに凹みがあり、カソード近傍では収束力が働く



# 軸対称の場合の電場分布と収束・発散力

- 軸対称の場合(電子を考える):
  - 軸上の進行方向電場 $E_z$ が減少する部分(絶対値では増加) $\Rightarrow$ 軸から $r$ 方向に外向きに電場が生じる $\Rightarrow$ 電子には収束力
  - 軸上の進行方向電場 $E_z$ が増加する部分(絶対値では減少) $\Rightarrow$ 軸から $r$ 方向に内向きに電場が生じる $\Rightarrow$ 電子には発散力

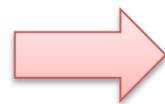
JAEA 光陰極500 kV電子銃の電場分布



中心軸上の分布から横方向の電場 $E_r$ を近似的に求められる

$$E_z(r, z) = E_{z0}(z) - \frac{1}{4} r^2 \frac{\partial^2 E_{z0}(z)}{\partial z^2}$$

$$E_r(r, z) = -\frac{1}{2} r \frac{\partial E_{z0}(z)}{\partial z}$$

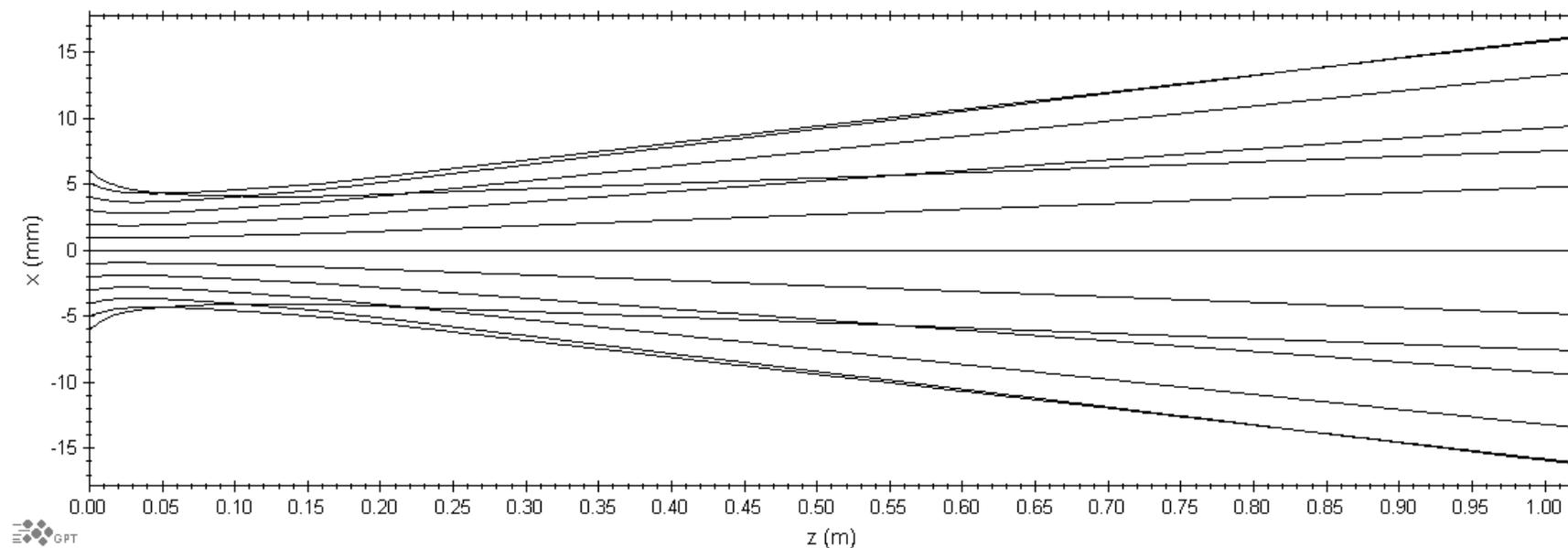


カソード近傍で収束力  
その後は、穏やかに発散力を受ける

# 粒子トラッキングによる収束・発散力の確認

- 西森さんから頂いた電場分布を基に電子のトラッキングを行い、収束・発散力を確認
- 電子銃全体としては、発散力として働く

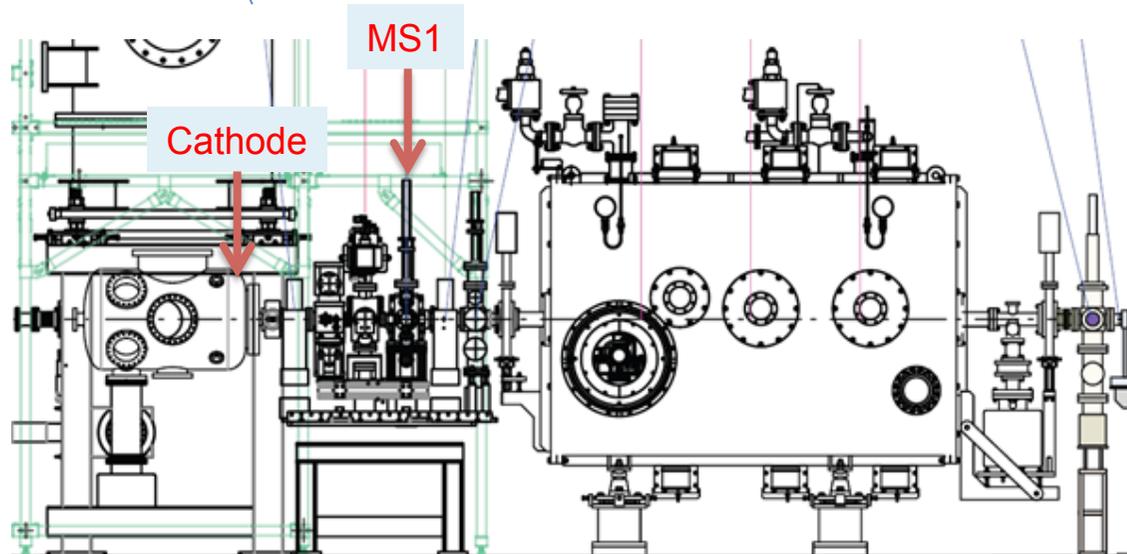
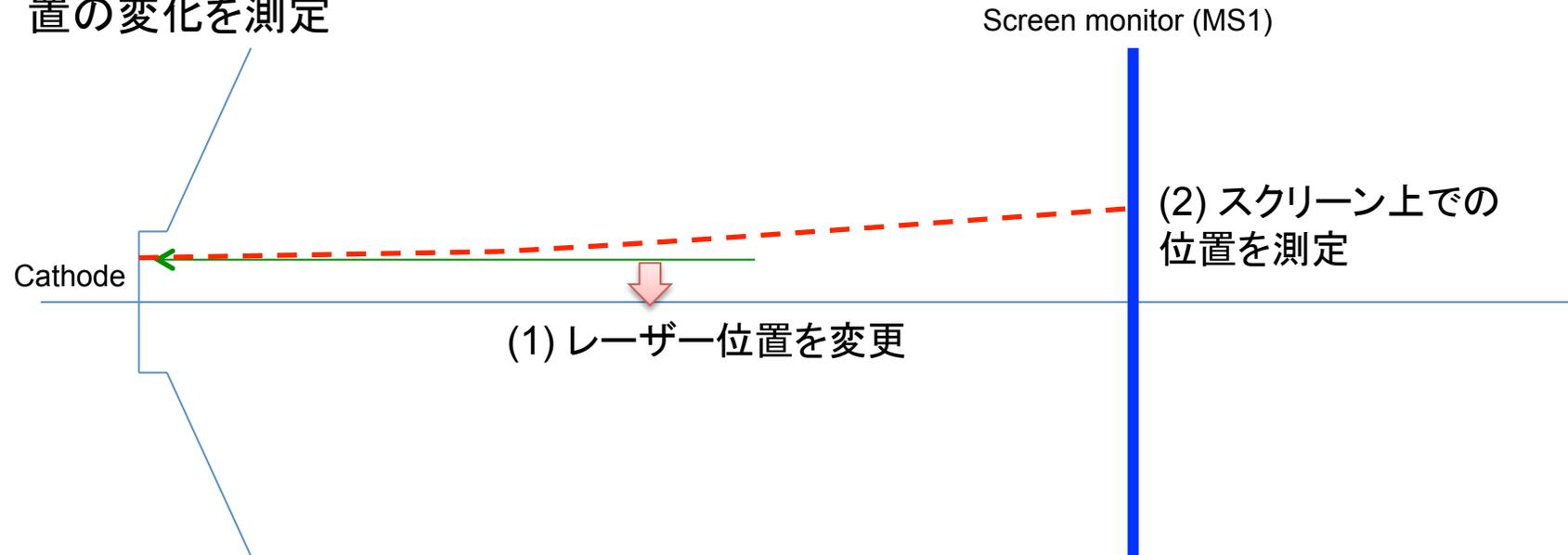
390 kV



- 実験で、これを測定し、電子銃(電極形状)が作る収束・発散がどのようになっているかを調べる

# 測定方法

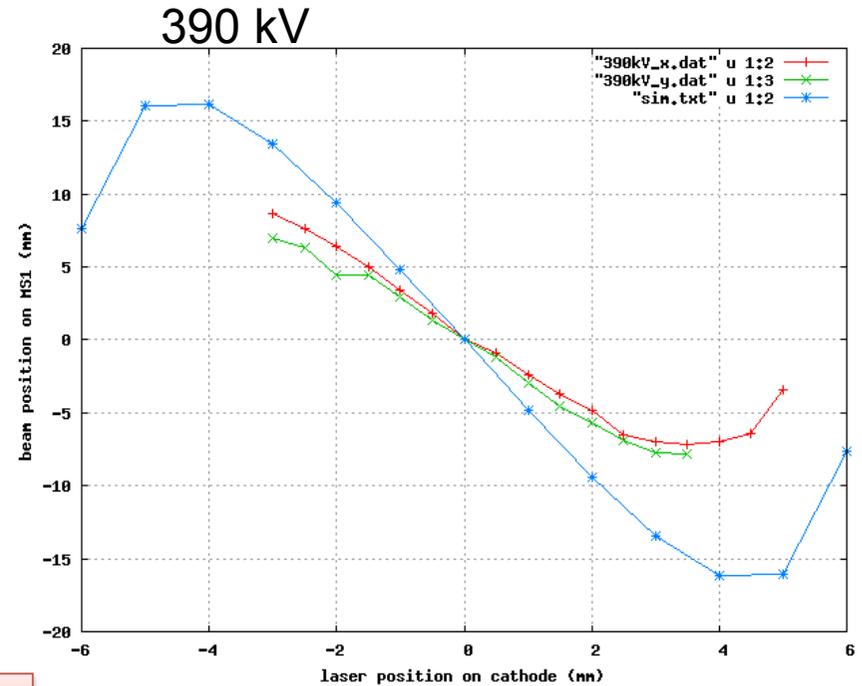
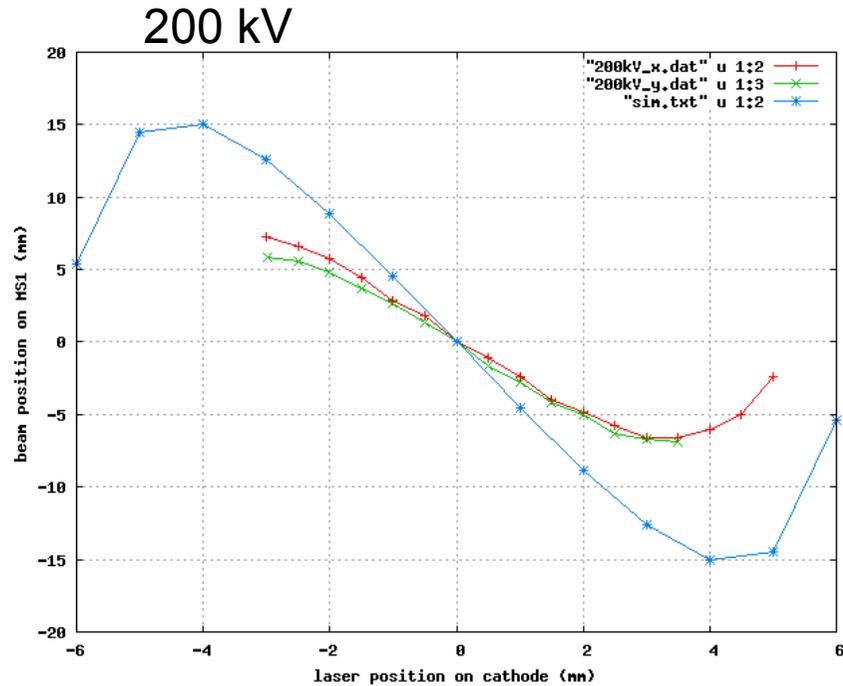
- カソード面のレーザー照射位置を変えながら、下流のスクリーンMS1上でのビーム位置の変化を測定



電子銃とMS1の間にはソレノイド電磁石とバンチャー空洞があるが、これらはすべてオフにして、純粹に電子銃による収束・発散効果のみを測定するようにした。

# 測定結果

- 電子銃加速電圧: 200 kV, 390 kVで測定



測定結果: 赤(水平方向)、緑(垂直方向)  
計算結果: 青(軸対称なので、x,yは同じ)

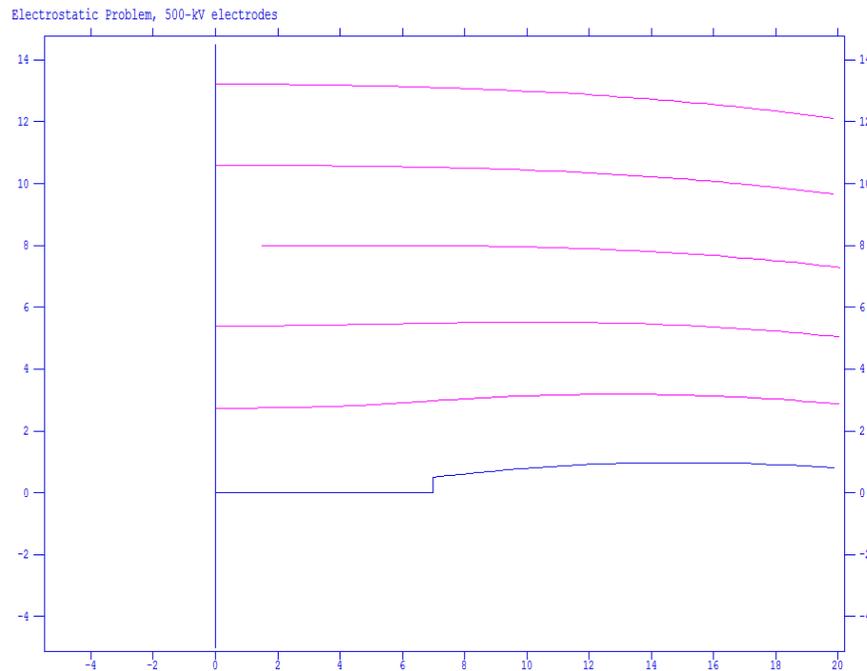
測定結果では、水平・垂直方向で大きな差はない⇒軸対称にできている  
しかし、計算結果と合わない

西森さんに相談して、カソード付近の電極形状を再確認した。

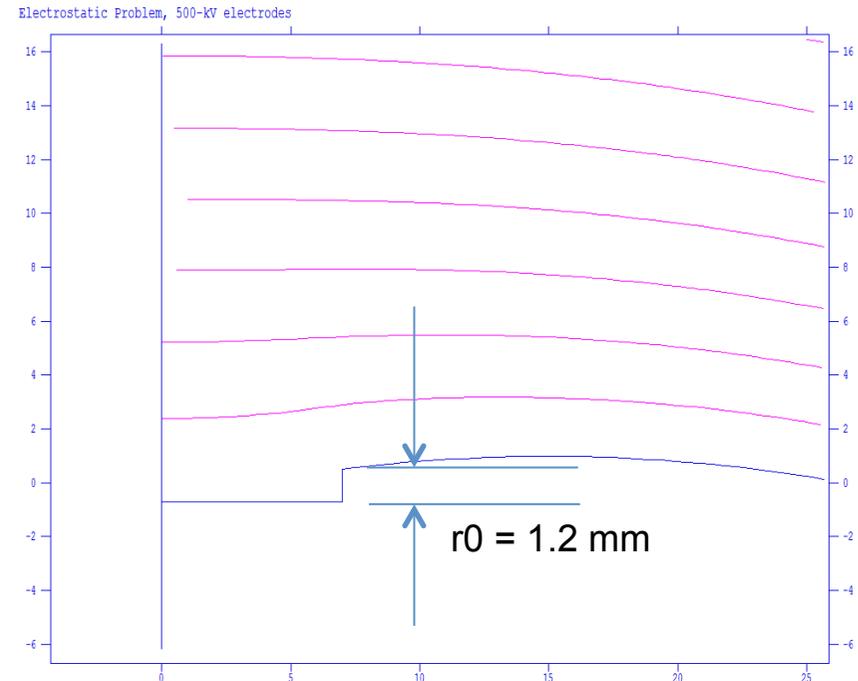
# カソード電極付近の凹み

- 凹みの部分のわずかな違いが下流では大きく見える
- カソード電極のPoisson入力ファイルでは、カソードパックと電極の間隙が異なるとのことであった
  - 元の入力ファイル: 間隙が0.5 mm
  - 西森さんから頂いた情報: 間隙が1.2 mm
- とりあえず、いくつかの凹みを試してみることにした ( $r0 = 0.9, 1.0, 1.2$  mm)

凹み:  $r0 = 0.5$  mm

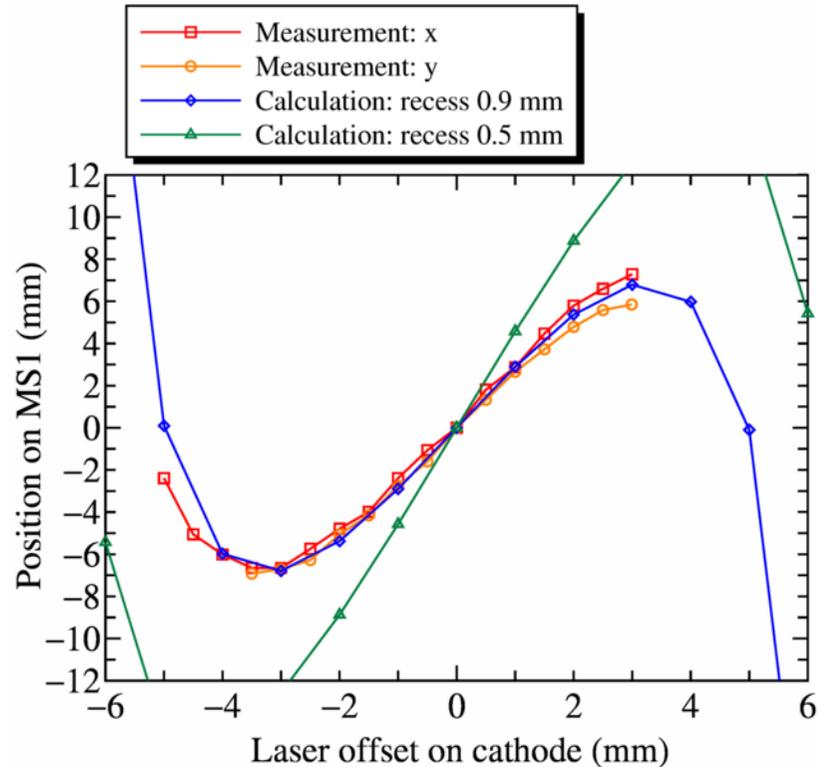


凹み:  $r0 = 1.2$  mm

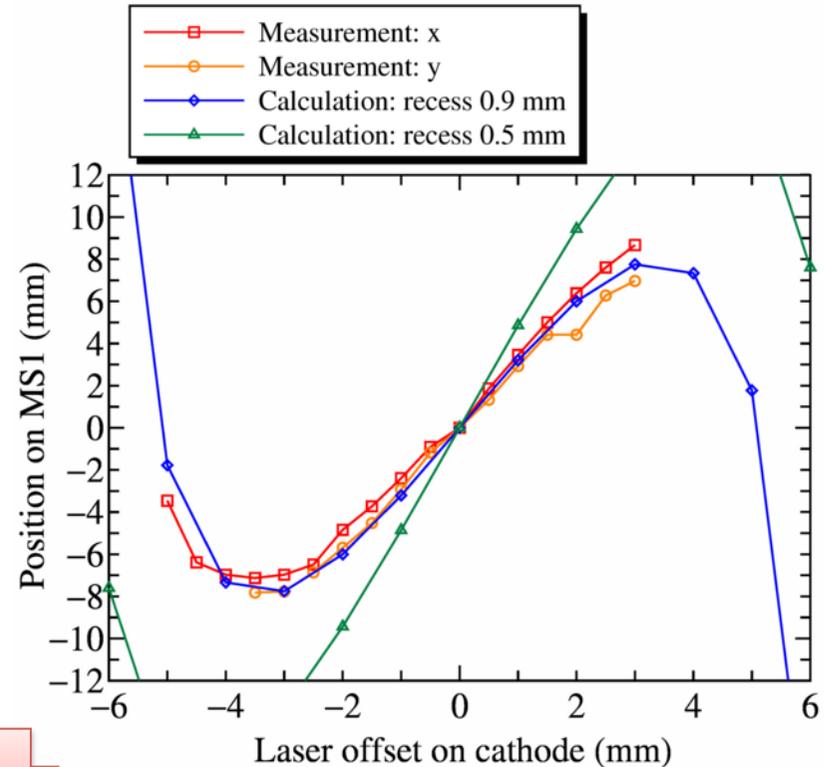


# カソード凹みの決定

- $r_0 = 0.9 \text{ mm}$  のとき実験結果を最もよく再現した  
200 kV



390 kV



$r_0 = 0.9 \text{ mm}$  のとき、二つの異なる電圧で実験結果をよく再現している

この結果より、シミュレーションで使用する電場分布として、 $r_0 = 0.9 \text{ mm}$  の凹みをもつ電極形状で計算したものを利用することとした。

# まとめ

- 電子銃の電場による収束・発散力を実験的に測定するために、レーザー位置を変えながらMS1上でのビーム位置変化の応答を測定した。
- この結果、これまでシミュレーションで使用していた電極形状では、測定結果を再現できないことがわかった。
- カソード付近のわずかな電極形状の違いでも、下流では大きく見えるため、カソード部分の凹みをわずかに変えながら、電場分布を計算して、トラッキングを実施した。
- カソード部分の凹みが0.9 mmのときに最もよく測定結果を再現することがわかった。
- この測定以降では、cERL phase1 コミッショニング用の計算では、カソード凹み 0.9 mmの電極形状を用いて計算を行っている。

# レーザースポットサイズの決定

第82回ERLビームダイナミクス打ち合わせ  
PF研究棟2階会議室

2013年7月22日(月)14時30分  
加速器第七研究系  
宮島 司

# 初期レーザースポットサイズの重要性

- 光陰極DC電子銃では、レーザーを光陰極面に当てて、電子ビームを取り出している。
- 光陰極から取り出されるビームは、照射するレーザースポット径によって決まる。
- 下流でのオプティクスは初期ビームサイズに依存するため、初期レーザースポットサイズを実験的に押さえておくことが重要

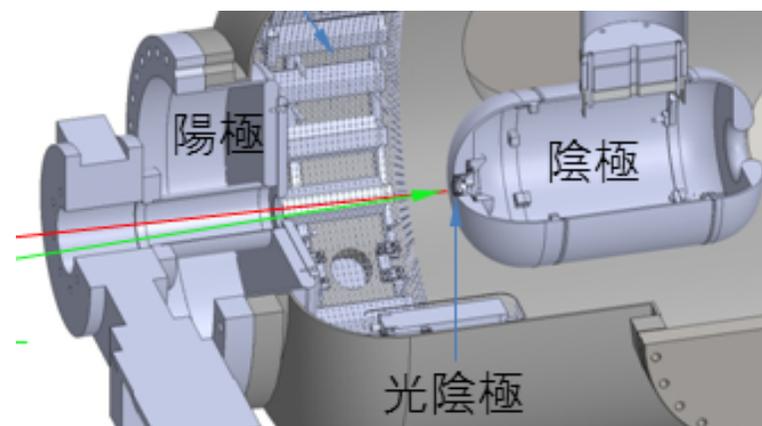
- 初期レーザースポットサイズの影響

- 初期電子ビームサイズ:  $d$
- 初期エミッタンス

$$\epsilon_n = \frac{d}{4} \sqrt{\frac{k_B T}{mc^2}}$$

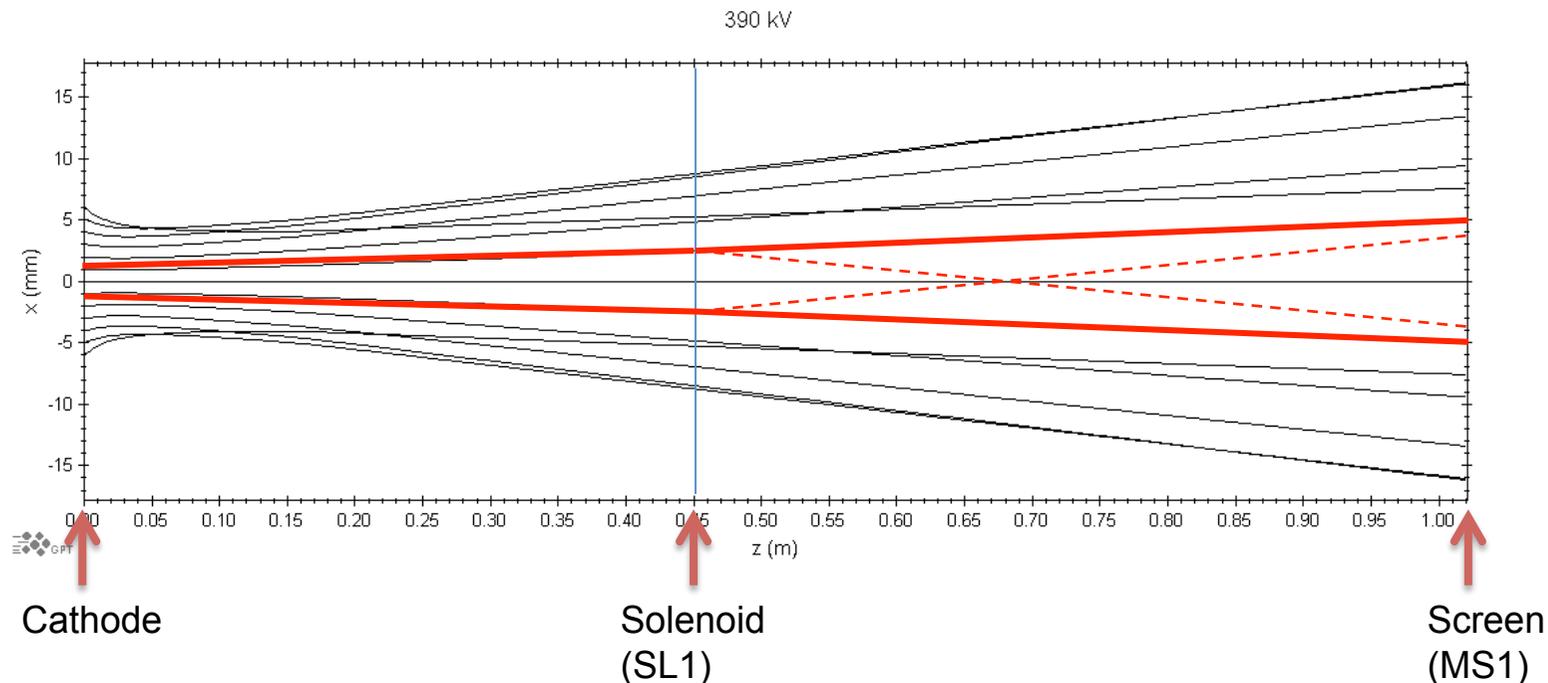
- ここでは、

- 実験的にレーザースポット直径を推定する方法
  - 最初の測定結果
  - 電子銃収束力確定後の再測定
- について紹介する



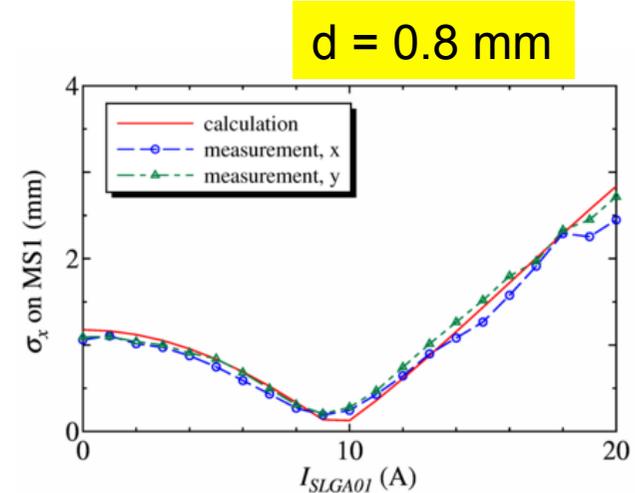
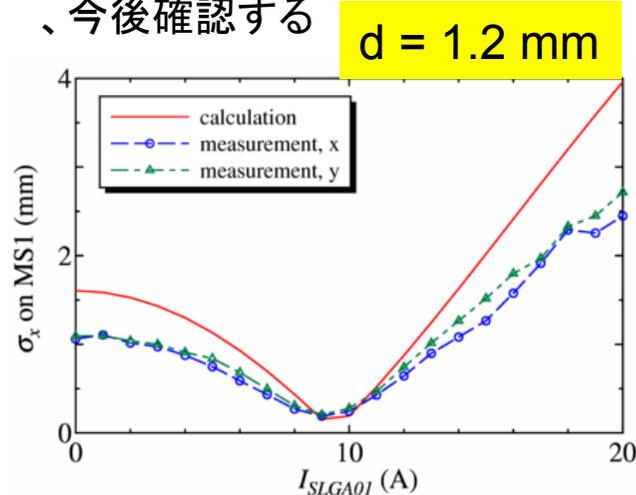
# レーザースポットサイズを推定する方法

- 電子銃から取り出されたビームサイズを下流のスクリーンモニタで観測する
- 空間電荷効果が効かない条件であれば、スクリーンモニタで測定したビームサイズから、光陰極面でのビームサイズ(=レーザースポットサイズ)を決めることができる
- ここでは、ソレノイド磁場による収束力を変えた時の、スクリーン上での応答を取ることにする。
- この測定で影響する項目
  - 各装置の間隔(ビームラインレイアウト)
  - ソレノイド励磁曲線の誤差(磁場ゼロのときの測定のみで、初期スポットサイズを決定できる)
  - 電子銃による収束作用

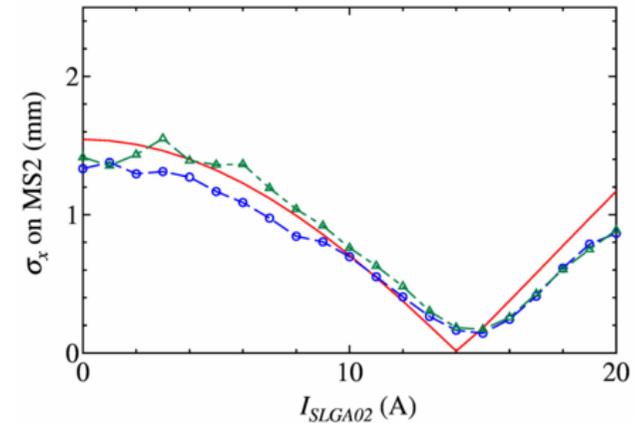
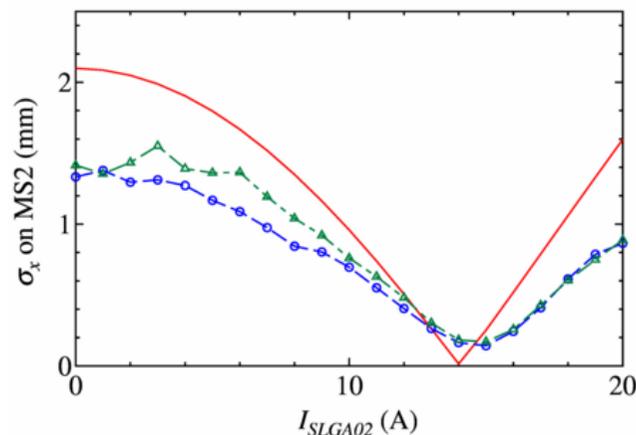


# ソレノイドの応答測定結果(4/22)

- 4月22日(月)にソレノイド1、2の応答測定を行った
- シミュレーションと比較したところ、ずれが大きかった
- 計算で、初期レーザー直径を1.2 mm から 0.8 mm とすると良く一致することがわかった
- レーザー輸送路の距離の精度で、カソード面での直径が小さくなる可能性はあるとのことなので、今後確認する



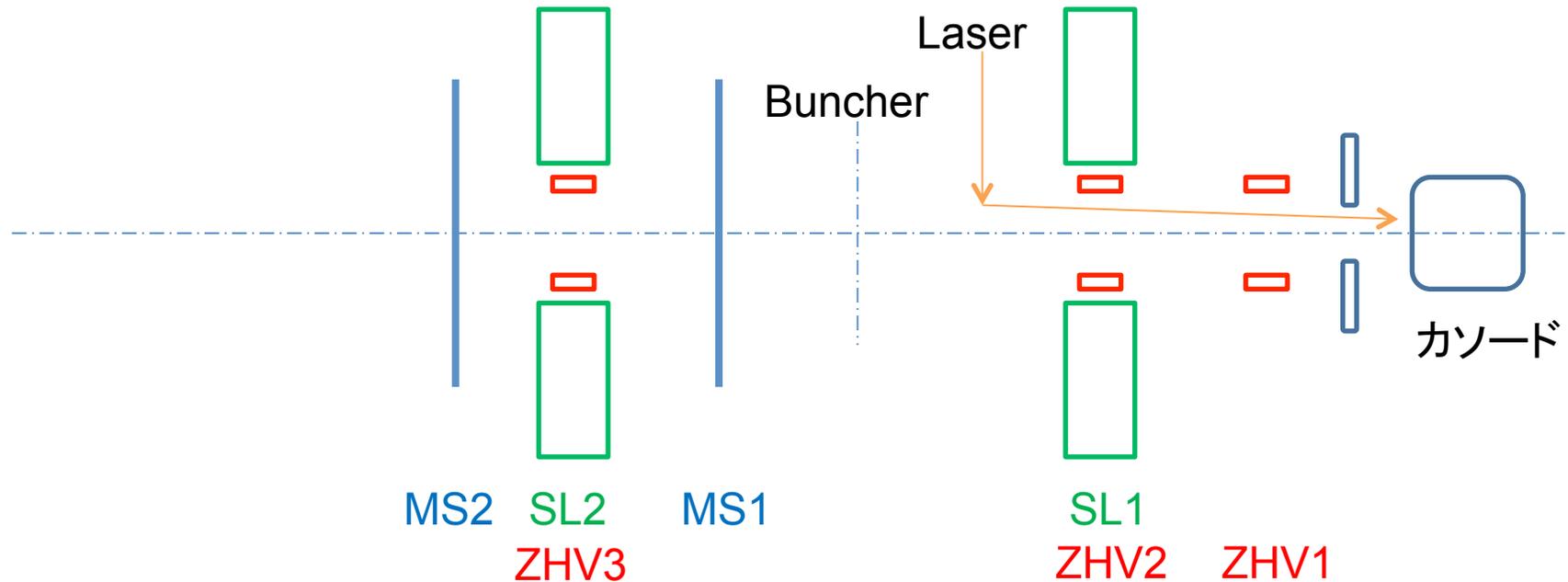
最小値を結ぶ位置はほぼ合っているので、電流と磁場の変換は合っている。初期スポット直径を変えると計算と測定結果がほぼ一致。



本当に、d = 0.8 mm という小さい値なのか？  
ここで考慮していないのは、

- ビームラインレイアウト
- 電子銃収束力

# ビームラインレイアウト(入射部近傍配置)



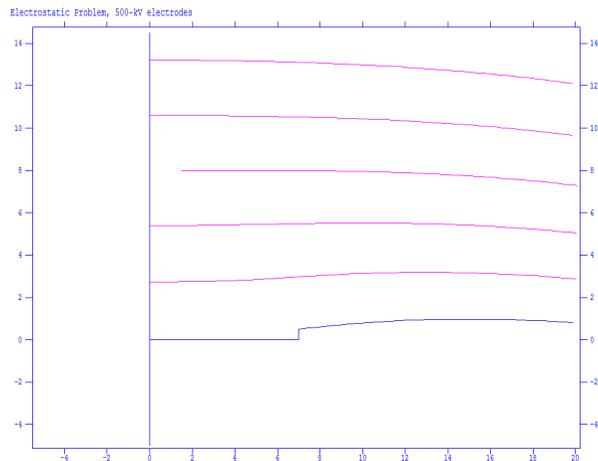
名称		距離(カソード面から※)	測定の差	測量位置
第1ステアリングコイル	ZHV01	233		
第1ソレノイド電磁石	SLGA01, PMGA01, ZHV02	448.791	-3.626	445.165
レーザー導入チェンバー		626.791		
バンチャー	CBGA01	809.291		
第1スクリーンチェンバー	MSGA01	1020.741		
第2ソレノイド電磁石	SLGA02, PMGA02, ZHV03	1219.791	-2.089	1217.702
第2スクリーンチェンバー	MSGA02	1372.228		

レーザートラッカーによる測量結果から、計算用入力ファイルを作っている。  
 実際、SL1, SL2の応答測定結果を比較すると、位置はほぼ合っているといえる。

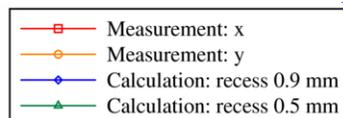
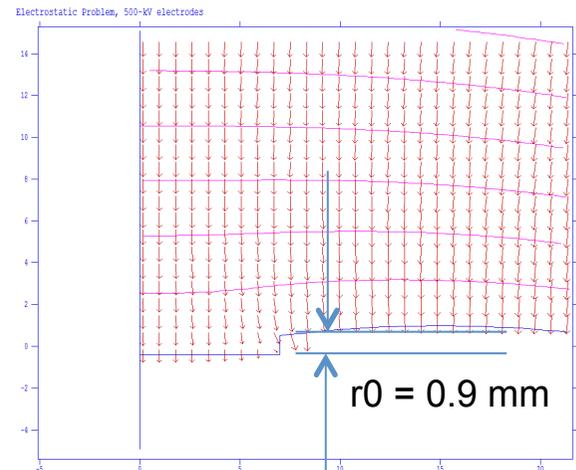
# 電子銃収束力の影響

- 5月22日の測定で、カソード電極凹みを当初想定していた0.5 mmから、0.9mmにするとほぼ測定結果が再現されることがわかった。

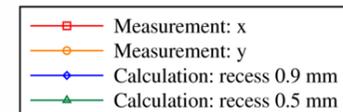
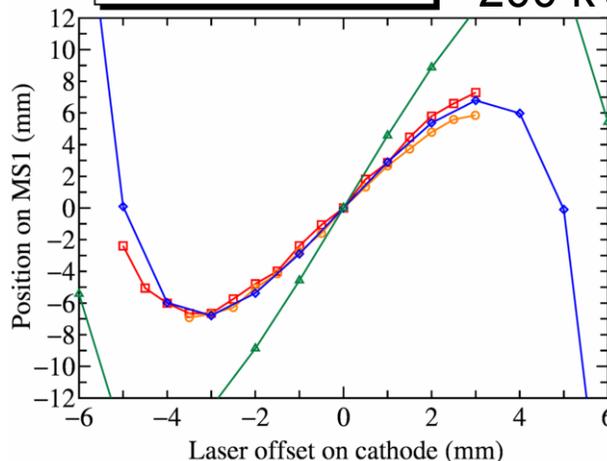
凹み:  $r_0 = 0.5$  mm



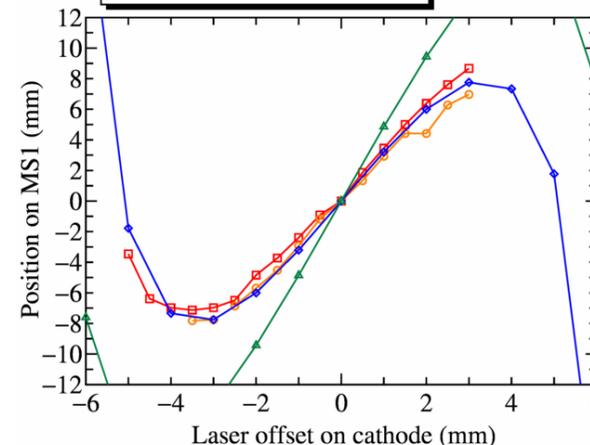
凹み:  $r_0 = 0.9$  mm



200 kV



390 kV

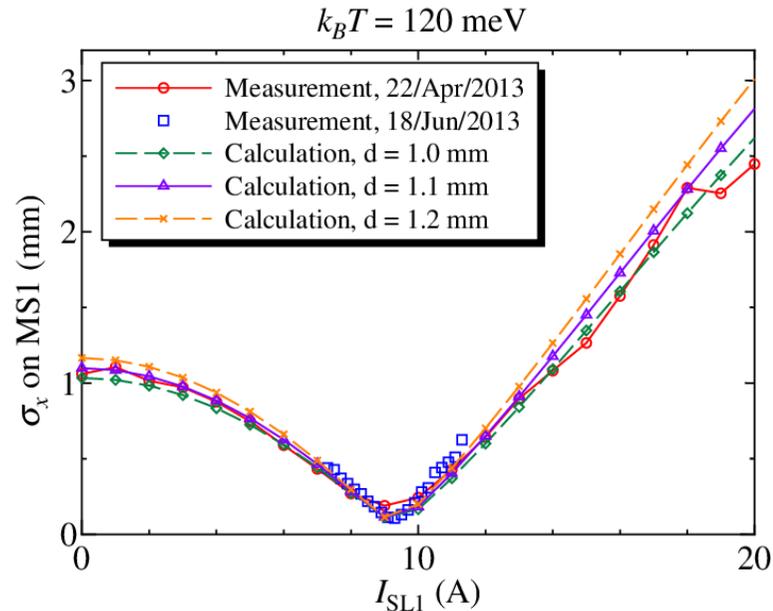


$r_0 = 0.9$  mmとすることで、電子銃収束力測定結果をどちらの加速電圧でも再現できた。

これを用いて、再度ソレノイド応答測定データの再現を試みる。

# 電子銃凹み0.9mmでの解析

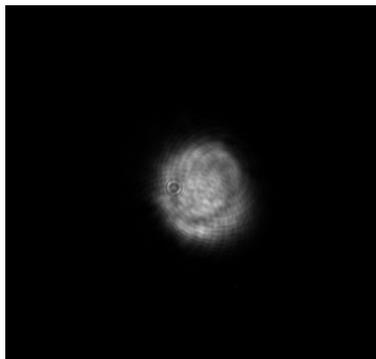
- 電子銃収束力測定結果から決めた電子銃凹み0.9mmの電場分布を使って、ソレノイド応答測定結果を再現するような初期レーザースポットサイズの推定を行った。
- $d = 1.0, 1.1, 1.2$  mm と3つのサイズについて計算



電子銃電場による発散力が弱まったため、初期スポットサイズを $d = 0.8$  mmまで小さくしなくても測定結果に近い値が得られるようになった。

3つのスポットサイズの計算結果を比較すると、 $d = 1.1$  mmのときに最もよく測定結果を再現

## レーザー輸送路途中に設置した仮想カソード面でのレーザースポットサイズ測定結果



画像からビームサイズを計算(フラットトップ分布と仮定)

縦方向: 1.09 mm

横方向: 1.02 mm

平均: 1.06 mm

電子銃電極形状校正後の結果とほぼ一致  
よって、レーザースポット直径 $d = 1.1$  mmとして解析を進める

# まとめ

- 電子銃光陰極面に照射しているレーザースポット直径(初期ビームサイズ)を決めるために、電子銃から出たビームのソレノイド応答測定を行った。
- 電子銃電極形状を最初の値(凹み0.5 mm)とすると、レーザースポット直径0.8 mmと推定された
- 電子銃電極形状較正後に再解析を行うと、レーザースポット直径 $d = 1.1$  mmでほぼ測定結果を再現できた
- レーザー輸送路上に設置された仮想カソード面で測定したレーザースポット直径は1.06 mmであった。
- ピンホール直径は1.2 mmであり、ほぼ近い値となった。
- 電極形状較正後の解析と、仮想カソード面での測定結果から、レーザースポット直径を1.1 mm と定めた
- 現在、この値を使って、数値計算と測定結果の比較を進めている。